

PROSIDING



Seminar Nasional *Teknik Mesin* 9



“Meningkatkan Penelitian dan
Inovasi di Bidang Teknik
Mesin Dalam Menyongsong
AFTA 2015 ”

Kamis, 14 Agustus 2014
Kampus Universitas Kristen Petra
Surabaya

Editor :
Fandi D. Suprianto
Oegik Soegihardjo
Joni Dewanto
Gan Shu San
Sutrisno

Penerbit:
Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121 - 131, Surabaya 60236

Didukung oleh :



PROSIDING SEMINAR NASIONAL TEKNIK MESIN 9

“Meningkatkan Penelitian dan Inovasi di bidang Teknik Mesin
Dalam menyongsong AFTA 2015”

Hak Cipta @ 2014 oleh SNTM 9
Program Studi Teknik Mesin
Universitas Kristen Petra

Dilarang mereproduksi, mendistribusikan bagian dari publikasi ini dalam segala bentuk maupun media tanpa seijin Program Studi Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Dipublikasikan dan didistribusikan oleh:
Program Studi Teknik Mesin
Universitas Kristen Petra,
Jl. Siwalankerto 121-131
Surabaya, 60236
INDONESIA

ISBN: 978-979-25-4418-3

TIM PENGARAH (REVIEWER):

- 1. Prof. Dr. Djatmiko Ichsani, M.Eng.**
(Institut Teknologi Sepuluh Nopember)
- 2. Prof. Dr. Ir. Djoko Suharto, M.Sc.**
(Institut Teknologi Bandung)
- 3. Prof. Dr. Ir. Eddy Sumarno Siradj, M.Sc.**
(Universitas Indonesia)
- 4. Prof. Ir. I.N.G. Wardhana, M.Eng., M.Sc.**
(Universitas Brawijaya)
- 5. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., PhD.**
(Institut Teknologi Sepuluh Nopember)
- 6. Prof. Dr. Kuncoro Diharjo, S.T., M.T.**
(Universitas Negeri Sebelas Maret)
- 7. Prof. Dr.-Ing. Ir. Mulyadi Bur**
(Universitas Andalas)
- 8. Prof. Dr. Ir. I Wajan Berata, DEA.**
(Institut Teknologi Sepuluh Nopember)
- 9. Prof. Dr. Ir. Yatna Yuwana Martawirya**
(Institut Teknologi Bandung)
- 10. Dr. Ir. M. Harly, M.T.**
(VEDC Malang)
- 11. Ir. Purnomo, M.Sc., PhD.**
(Universitas Gadjah Mada)
- 12. Dr.-Ing. Suwandi Sugondo, Dipl.-Ing.**
(Universitas Kristen Petra / PT. Agrindo, Tbk.)

PANITIA PELAKSANA

Ketua	: Dr. Willyanto Anggono S.T., MSc.
Sekretaris	: Ian Hardianto Siahaan, S.T., M.T.
Bendahara	: Dr. Ir. Ekadewi A Handoyo, M.Sc.
Pubdok	: Teng Sutrisno, S.T., M.T.
Acara	: Ir. Joni Dewanto, M.S.
Perlengkapan	: Ir. Philip Kristanto Roche Alimin, S.T., M.Eng.
Konsumsi	: Ir. Ninuk Jonoadji, M.T., M.M.
Editor	: Fandi D Suprianto, S.T., M.Sc. Dra. Gan Shu San, M.Sc. Ir. Joni Dewanto, M.S. Ir. Oegik Soegihardjo, M.Sc., MA. Teng Sutrisno, S.T., M.T.
Sponsorship	: Dr. Juliana Anggono, S.T., M.Sc.

SAMBUTAN KETUA PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

Presiden terpilih Bapak Jokowi pada masa kampanye merencanakan untuk menempatkan pengelolaan Perguruan Tinggi yang saat ini dalam naungan Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan ke dalam naungan Kementerian Riset dan Teknologi atau KEMENRISTEK. Perguruan Tinggi di Indonesia diharapkan mengambil peranan penting untuk lebih banyak lagi melaksanakan riset atau penelitian dengan melibatkan mahasiswa untuk membantu produktifitas industri bahan makanan dan potensi lain yang bisa dikembangkan dari setiap daerah di Indonesia. Bahkan, ditegaskan oleh salah satu tim sukses Joko Widodo, Jenderal (Purn) Luhut Binsar Panjaitan, bahwa riset-riset dapat dimaksimalkan untuk meningkatkan daya saing produk-produk Indonesia baik itu di sektor industri dan lainnya, sehingga Indonesia bisa memenangkan pasar Masyarakat Ekonomi ASEAN 2015 dan pasar global kedepannya.”Sehingga kita memiliki *research university* yang bagus untuk melakukan penelitian dalam berbagai bidang. Sehingga kita tidak menjadi market dari negara-negara lain”.

Mencermati hal di atas, maka dalam Seminar Nasional Teknik Mesin ke-9 ini kami mengambil thema "Meningkatkan Penelitian dan Inovasi di Bidang Teknik Mesin dalam Menyongsong AFTA 2015". Kami berharap SNTM menjadi wadah diskusi terkait penelitian dalam bidang teknik mesin di antara praktisi dan akademisi, sehingga memperluas wawasan semua yang hadir dan menghasilkan pemikiran maupun inovasi untuk meningkatkan mutu penelitian kita. Lebih lagi, melalui diskusi selama SNTM dapat dihasilkan penelitian-penelitian yang mendukung upaya untuk meningkatkan daya saing produk kita terhadap produk dari negara lain.

Seminar Nasional Teknik Mesin telah diselenggarakan delapan tahun berturut-turut. Kami bersyukur rekan-rekan peneliti tetap memberi kami kepercayaan dengan ikut berpartisipasi dalam seminar yang ke-9. Semoga kiranya SNTM membawa manfaat, semangat dan sukacita kita semua dalam meneliti. Kami pun berterima kasih kepada rekan-rekan Panitia yang telah berjerih lelah mempersiapkan segala sesuatu sehingga SNTM 9 ini dapat terselenggara dengan baik.

Selamat berdiskusi, selamat berseminar. Tuhan memberkati.

Surabaya, 11 Agustus 2014

KaProdi Teknik Mesin

Dr. Ir. Ekadewi A. Handoyo, M.Sc.

SAMBUTAN KETUA PANITIA

Pertama-tama mari kita panjatkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya Seminar Nasional Teknik Mesin 9 (SNTM 9) tahun 2014 yang merupakan seminar tahunan yang diadakan oleh Jurusan Teknik Mesin Universitas Kristen Petra dapat diselenggarakan dengan baik.

Dalam kesempatan ini, kami selaku panitia penyelenggara ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh peserta seminar yang telah bersedia untuk menyerahkan makalah mereka dalam seminar nasional ini. Semoga makalah-makalah yang dikirimkan pada seminar hari ini dapat memberikan dampak positif dalam perkembangan teknologi nasional serta terus menginspirasi kita semua untuk terus berkarya. Kami juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh *reviewer*, *keynote speaker*, panitia serta seluruh pihak yang telah mendukung acara ini sehingga acara Seminar Nasional Teknik Mesin 9 ini dapat berjalan dengan lancar.

Seminar Nasional Teknik Mesin 9 (SNTM 9) tahun ini mengambil tema “Meningkatkan Penelitian dan Inovasi di bidang Teknik Mesin Dalam Menyongsong AFTA 2015”. Maksud dari Seminar Nasional Teknik Mesin 9 ini adalah untuk mempersiapkan Indonesia dalam memasuki AFTA (Asian Free Trade Area) 2015 serta untuk menumbuhkan kontribusi para peneliti/ professional dalam mendukung pertumbuhan industri nasional, khususnya di bidang teknik mesin.

Pada Seminar Nasional Teknik Mesin 9 ini, panitia seminar menerima sebanyak 73 makalah dari peneliti/ professional dan setelah melalui evaluasi oleh para reviewer dan panitia seminar, sebanyak 53 makalah seminar yang akhirnya dapat masuk kedalam prosiding seminar nasional.

Akhir kata, kami selaku panitia penyelenggara seminar mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila terdapat kesalahan maupun kekurangan yang terdapat baik pada seminar ini.

Salam sejahtera dan semoga Tuhan Yang Maha Esa terus memberkati kita semua.

Surabaya, 14 Agustus 2014

Ketua Panitia SNTM 9

Dr. Willyanto Anggono, ST, MSc.

KATA PENGANTAR

Seminar Nasional Teknik Mesin (SNTM) merupakan even tahunan yang diselenggarakan oleh Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra. Output dari seminar ini diharapkan dapat memberikan dampak secara nasional, sehingga topik aktual dan terkini selalu diangkat menjadi tema utama seminar. SNTM yang ke 9 ini mengusung tema **“Meningkatkan Penelitian dan Inovasi di bidang Teknik Mesin Dalam menyongsong AFTA 2015”**.

Kualitas penelitian yang baik dalam bidang Teknik Mesin sangat berperan dalam mendukung pertumbuhan industri nasional. Melalui Seminar Nasional Teknik Mesin 9 ini, karya-karya penelitian yang terpilih diharapkan dapat memberikan solusi bidang teknik mesin secara efektif, hemat energi, dan ramah lingkungan sehingga mampu meningkatkan kesiapan industri nasional untuk menghadapi persaingan akibat skema *‘free flow of goods’* yang akan diterapkan di ASEAN.

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa sebab hanya oleh karena anugerahNya maka SNTM dapat terselenggara secara rutin dan bahkan jumlah makalah dan peserta pada SNTM 9 ini mengalami peningkatan dari tahun sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa forum diskusi antar akademisi dan profesional semakin diminati. Ruang lingkup makalah dikelompokkan menjadi empat bidang, yaitu Konversi Energi, Rekayasa Mekanik & material, Manufaktur, dan Otomotif, sedangkan kualitas makalah dijaga dengan baik melalui proses review yang ketat. Setiap abstrak yang masuk telah direview dan direkomendasi oleh tiga orang reviewer yang sangat berkompeten di bidangnya.

Akhir kata kami ucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku Prosiding SNTM 9 ini. Terlepas dari segala kekurangan yang ada, kiranya segenap upaya yang telah dilakukan dapat bermanfaat bagi kemajuan dan penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia, serta menjadi pendorong untuk menghasilkan karya-karya penelitian lanjutan yang semakin baik.

Surabaya, Agustus 2014

Tim Editor

DAFTAR ISI

	Halaman
SUSUNAN REVIEW	ii
SUSUNAN PANITIA.....	iii
SAMBUTAN KETUA JURUSAN.....	iv
SAMBUTAN KETUA PANITIA	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii

DESAIN

<p>1. STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PERUBAHAN DESAIN FLYWHEEL TERHADAP WAKTU PENGOSONGAN ENERGI KINETIK <i>H. Laksana Guntur¹⁾, W. Hendrowati²⁾</i></p>	D1-D6
<p>2. STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK PUTARAN SINGLE DAN TRIPLE PENDULUM PADA SIMULATOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT-SISTEM PENDULUM <i>H. Laksana Guntur¹⁾, W. Hendrowati²⁾, Mukhtasor³⁾, R.W.Prastianto⁴⁾, I.S. Arif⁵⁾, H. Setiyawan⁶⁾</i></p>	D7-D10
<p>3. RANCANG BANGUN ALTERNATIF <i>AIR TO HYDRAULIC PRESSURE BOOSTER (INTENSIFIER)</i> PADA SISTEM HIDROLIK PENGGERAK <i>LIFTING TABLE</i> <i>Iwan Agustiawan¹⁾, Mansur Ependi²⁾, Usep Ali Albayumi³⁾</i></p>	D11-D14
<p>4. ANALISA KOMPONEN KRITIS PADA DESAIN <i>AUTOMATIC GUIDED VEHICLES (AGV) SUBSYSTEM LIFTING</i> DENGAN PEMBEBANAN STATIS MENGGUNAKAN SOFTWARE ABAQUS 6.11 <i>Joko Setia Pribadi¹⁾, Fauzun²⁾, Muslim Mahardika³⁾</i></p>	D15-D20
<p>5. KAJIAN AWAL PENGARUH CRUSH INITIATORS TERHADAP PENYERAPAN ENERGI DAN GAYA TUMBUKAN PUNCAK PADA TABUNG BUJUR SANGKAR BERDINDING TIPIS <i>J. Istiyanto¹⁾, S. Hakimani¹⁾, D.A. Sumarsono¹⁾, G. Kiswanto¹⁾, A.S. Baskoro¹⁾, S. Supriadi¹⁾</i></p>	D21-D26
<p>6. APLIKASI PENGGUNAAN METODE <i>MOIRE PATTERN</i> UNTUK MENGETAHUI KARAKTERISTIK SEBARAN NILAI <i>STRESS-DISPLACEMENT</i> PADA MATERIAL BAJA AISI 304 BERBASIS <i>IMAGE PROCESSING</i> <i>Mohammad Khoirul Effendi¹⁾, Agus Sigit Pramono²⁾, Ari Surya Yulianto³⁾, Hanif Pribadi⁴⁾</i></p>	D27-D32
<p>7. FLUIDSIM PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER MODULE UNTUK RANCANGAN MESIN PRESS HIDROLIK BOTOL PLASTIK <i>Ninuk Jonoadji, Ian Hardianto Siahaan</i></p>	D33-D38
<p>8. PENGEMBANGAN DESAIN SEPEDA UNTUK PASIEN PASCA STROKE <i>Tri Andi Setiawan, I Made Londen Batan</i></p>	D39-D42
<p>9. OPTIMASI JUMLAH <i>COMPARTMENT</i> TANGKI TRUK BAHAN BAKAR MINYAK DENGAN MENGGUNAKAN <i>FINITE ELEMENT APPLICATION</i></p>	

- Willyanto Anggono¹⁾, Adi Sanjaya²⁾, Fandi Dwiputra Suprianto³⁾, Tubagus Putra Wijaya⁴⁾..... D43-D46
10. APLIKASI SUSTAINABLE PRODUCT DEVELOPMENT DALAM OPTIMASI JUMLAH BAUT PADA SAMBUNGAN RESERVOIR TEKAN PIPA HYDRANT DENGAN MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT APPLICATION
Willyanto Anggono¹⁾, Ninuk Jonoadji²⁾, Ricky Subiyanto³⁾, Michael Surya Chandra Tanoto⁴⁾.... D47-D50
11. ANALISA TEGANGAN PADA DESAIN *FRAME AUTOMATIC GUIDED VEHICLES* (AGV) DENGAN PEMBEBANAN STATIS MENGGUNAKAN *SOFTWARE ABAQUS 6.11*
Zainal Abadi¹⁾, Fauzun²⁾, Muslim Mahardika³⁾ D51-D54
12. ANALISA GETARAN PEMASANGAN SABUK DALAM-DALAM PADA POROS POMPA SENTRIFUGAL TEBAL 4,5 MM LEBAR 98 MM
Erwen Martianis D55-D60
13. SIMULASI STRUKTUR DAN PEMBUATAN MESIN TEKAN *RIVET* DENGAN SISTEM HIDROLIK YANG DIKONTROL DENGAN *PROGRAMMABLE LOGIC CONTROL (PLC)*
Taufiq Hidayat¹⁾, Beni Tri Sasongko²⁾, Muslim Mahardika³⁾ D61-D66
14. DESAIN MODEL 3D MASSIVELY PARALLEL ROBOTS (3D-MPRs) BERBASIS KONTROL NEURO-FUZZY (NF)
Roche Alimin¹⁾, Hans Natalius¹⁾, Felix Pasila²⁾ D67-D70
15. SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC* PADA TRI-STAR *WHEELCHAIR*
Rafiuddin Syam, Wahyu H. Piarah dan Alfian Djafar D71-D74
16. APLIKASI KENDALI *FUZZY LOGIC* UNTUK MODEL *EXCAVATOR* PNEUMATIK
Rafiuddin Syam¹⁾, Irdam²⁾ dan Wahyu H. Piarah¹⁾ D75-D78

KONVERSI ENERGI

17. ANALISA HIDRAULIK JARINGAN PERPIPAAN SATU FASE CAIR MENGGUNAKAN METODE ITERASI HARDY CROSS
Achilleus Hermawan¹⁾, Joko Waluyo²⁾, Indarto³⁾ K1-K4
18. SIMULASI NUMERIK DENGAN PENDEKATAN 3D-URANS ALIRAN YANG MELINTASI SUSUNAN EMPAT SILINDER SIRKULAR DEKAT DINDING PADA “SMALL-GAP”
A. Grummy Wailanduw¹⁾, Triyogi Yuwono²⁾, Wawan Aries Widodo³⁾ K5-K8
19. SIMULASI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUDUT *SWIRL VANES* PADA *RADIALLY STRATIFIED FLAME CORE BURNERS* TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
Atok Setiawan¹⁾ & Senna Septiawan²⁾ K9-K14
20. STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN *BODI PENGANGGU* TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN PADA TIGA SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN STAGGER PADA JARAK ANTAR SILINDER $L/D = 2$ dan $T/D = 1,5, 2$ dan 3 “Studi kasus untuk $BP 30^\circ$ dan tanpa BP pada $Re = 2.2 \times 10^4$ ”
Bantacut¹⁾, Wawan Aries Widodo²⁾ K15-K20
21. STUDI EKSPERIMENTAL *CO-FIRING* BATUBARA DENGAN SEKAM PADI DALAM *BUBBLING FLUIDIZED BED COMBUSTOR* (BFBC)
Fransisko Pandiangan¹⁾, Tri Agung Rohmat²⁾, I Made Suardjaja³⁾ K21-K26

22. KARAKTERISASI UNJUK KERJA PLANT GASIFIKASI BATUBARA TIPE UPDRAFT DENGAN VARIASI EQUIVALENCE RATIO <i>Muhammad Trifiananto¹⁾, Bambang Sudarmanta²⁾</i>	K27-K32
23. SEPARASI ALIRAN MELINTASI “BUMP” DENGAN RADIUS KELENGKUNGAN YANG BESAR <i>Sutardi¹⁾ dan Guntur Muda A. A.</i>	K33-K38
24. RANCANG BANGUN VISKOMETER DIGITAL <i>Ridwan¹⁾, Ridha Iskandar²⁾</i>	K39-K42
25. STUDI EKSPERIMEN PENGARUH <i>INLET DISTURBANCE BODY</i> TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN SECARA <i>STAGGERED</i> DALAM SALURAN SEMPIT BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR <i>Sofia Benyakart¹⁾, Wawan Aries Widodo²⁾</i>	K43-K48
26. PERSAMAAN RUGI TEKANAN FLUIDA NANO Al_2O_3 -AIR PADA PROSES PENDINGINAN DALAM PIPA <i>Sudarmadji¹⁾, Sudjito Soeparman²⁾, Slamet Wahyudi³⁾, Nurkholis Hamidi⁴⁾</i>	K49-K54
27. KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGGUNAAN NANOPARTIKEL PADA KINERJA PENGKONDISI UDARA <i>Sumeru¹⁾, Triaji Pangripto Pramudantoro²⁾, Ismail Wellid³⁾</i>	K55-K58
28. STUDI NUMERIK RADIUS <i>VOLUTE TONGUE</i> RUMAH KEONG PADA BLOWER SENTRIFUGAL <i>Sutrisno¹⁾, Suwandi. S.²⁾, Ayub. S.³⁾</i>	K59-K62
29. KARAKTERISASI UNJUK KERJA MESIN DIESEL GENERATOR SET SISTEM DUAL FUEL SOLAR DAN SYNGAS BATUBARA <i>Zuhri Tamam¹⁾, Bambang Sudarmanta²⁾</i>	K63-K68
30. MENILAI PERFORMANSI GAS AIR HEATER DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP BERKAPASITAS 660 MW (STUDI KASUS PLTU CIREBON) <i>Hery Sonawan¹⁾, M. Luqmanul Hakim</i>	K69-K74
31. MSWT-01 (<i>MOBILE SURFACE WATER TREATMENT</i>), PENJERNIH AIR MULTI FUNGSI DARI INSTITUSI PENDIDIKAN VOKASI UNTUK MASYARAKAT <i>Gamawan Ananto¹⁾, Albertus B. Setiawan²⁾</i>	K74-K80
32. PENGARUH BENTUK DAN UKURAN GELOMBANG PLAT PENYERAP TERHADAP EFISIENSI KOLEKTOR SURYA <i>Ekadewi A. Handoyo, Gideon Indrata</i>	K81-K84

MANUFAKTUR

33. EVALUASI RANCANGAN SEPEDA <i>PASCA STROKE</i> DITINJAU DARI ASPEK PERAKITAN DENGAN MENGHITUNG EFISIENSI DESAIN PERAKITAN <i>Ahmad Anas Arifin¹⁾, I Made Londen Batan²⁾</i>	M1-M6
34. EVALUASI RANCANGAN DALAM RANGKA PENGEMBANGAN SEPEDA <i>PASCA STROKE</i> BERDASARKAN MEKANISME GERAK, ERGONOMI, DAN KEKUATAN MATERIAL MENGGUNAKAN <i>SOFTWARE CATIA V5R20</i> <i>Arifa Candrawati Imama¹⁾, I Made Londen Batan²⁾</i>	M7-M14

35. ANALISIS TINGKAT PERFORMANCE MESIN *INJECTION* PADA PT XYZ DENGAN METODE *OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE)*
Hana Catur Wahyuni, Setiawan M15-M18
36. STUDI LAPISAN PELINDUNG PADA KOMPOSIT PLASTIK-KARET TERHADAP KETAHANAN PEMAPARAN CUACA
Heru Sukanto ¹⁾, Kresna Nurhadewa ²⁾, Wijang Wisnu Raharjo ¹⁾ M19-M24
37. PENGARUH KEKASARAN PERMUKAAN LAPISAN ENAMEL TERHADAP KEKUATAN REKAT GESER KOMPOSIT TAMBAL GIGI
Lega Putri Utami¹⁾, kusmono²⁾ M25-M28
38. *EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS (EMA)* UNTUK MENGETAHUI *MODAL PARAMETER* PADA ANALISIS DINAMIK BALOK KAYU YANG DIJEPIT DI SATU UJUNG
Oegik Soegihardjo ¹⁾, Suhardjono ²⁾, Bambang Pramujati ³⁾, Agus Sigit Pramono ⁴⁾ M29-M34
39. *STUDI PERTUMBUHAN BUTIR PRIOR AUSTENIT* AKIBAT PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN SELAMA PEMANASAN AWAL BAJA HSLA
Richard A.M. Napitupulu^{*}) M35-M38
40. STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JENIS CAIRAN DIELEKTRIK TERHADAP MRR, EWR DAN VWR PADA TEGANGAN 340 VOLT DAN 580 VOLT DENGAN PROSES *DRILLING* EDM MENGGUNAKAN SPARK GENERATOR TIPE RELAKSASI (RC)
Susiswo¹⁾, Suhardjono²⁾ dan Bambang Pramujati³⁾ M39-M42
41. PENINGKATAN SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS PERMUKAAN BAJA TAHAN KARAT AISI 410 DENGAN TEKNIK PLASMA HELIUM-METANA
Wahyu Anhar¹⁾, Viktor Malau²⁾, Tjipto Sujitno³⁾ M43-M46
42. STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK KEAUSAN PERMUKAAN AKIBAT *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION*
Yusuf Kaelani¹⁾, Muhammad Hasry²⁾ M47-M50
43. RANCANG BANGUN *RIVET JOINT MACHINE* DENGAN METODE *FUNCTIONAL MODELLING* PADA PERANCANGAN KONSEPTUAL
Beni Tri Sasongko¹⁾, Taufiq Hidayat²⁾, Muslim Mahardika³⁾ M51-M54
44. PENGARUH METODE Pengerjaan DINGIN DAN *BLASTING ABRASIVE* TERHADAP KARAKTERISTIK MATERIAL BIOMEDIS
Mirza Pramudia ¹⁾, Khamdi Mubarak ²⁾ M55-M58
45. DESAIN KOMPOSIT EPOKSI BERPENGISI SERBUK SABUT KELAPA DAN ALUMINIUM UNTUK BAHAN KAMPAS REM DENGAN VARIASI BENTUK GEOMETRI ALUR KAMPAS
Eko Marsyahyo¹⁾, Eko Yohanes S²⁾, Yafhed Octavianus³⁾, Virginia C.W⁴⁾ M59-M62
46. PENGARUH VARIASI TEMPERATUR INTERPASS PADA PROSES PENGELASAN SMAW AISI 304L TERHADAP *FERRIT CONTENT* KEKUATAN TARIK DAN IMPAK
Moh. Syaiful Amri¹⁾, Sulistijono²⁾ M63-M68
47. LAJU PENETRASI KOROSI PADA MATERIAL ALTERNATIF BANGUNAN KAPAL
Prantasi Harmi Tjahjanti¹⁾, Eko Panunggal²⁾, Darminto³⁾, Wibowo Harso Nugroho⁴⁾ M69-M74

48. PENGARUH WAKTU GESEK TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BAJA ST42 SEBAGAI DASAR PROSES OPERASIONAL LAS GESEK (*FRICTION WELDING*) DALAM UPAYA MEMPRODUKSI KOMPONEN PENGAIT
Nur Husodo¹⁾, Budi Luwar Sanyoto²⁾, Sri Bangun Setyawati³⁾ Rachmad Hidayat⁴⁾ M75-M80

OTOMOTIF

49. SISTEM PENGAMAN SEPEDA MOTOR DENGAN STANDAR TENGAH HIDROLIK DAN PENERAPANNYA PADA SEPEDA MOTOR MATIC YAMAHA MIO SPORTY
Joni Dewanto dan Ferryando Tanicka 01-04
50. OPTIMASI UNJUK KERJA MESIN SINJAI 650 CC MELALUI PENGATURAN SISTEM PENDINGINAN ENGINE
Bambang Sudarmanta¹⁾, Ary Bachtiar Krisna Putra²⁾, Devy Ratna Sari³⁾, Dwi Cahyo Andrianto⁴⁾ 05-08
51. MENEJEMEN ENERGI UNTUK PENGATURAN FWD, RWD, 4WD, DAN SAAT BELOK DENGAN *DIRECT WHEEL DRIVE*
Herry Sufyan Hadi¹⁾, I Nyoman Sutantra²⁾, Bambang Sampurno²⁾ 09-016
52. PROTOTYPE SISTEM HEADLAMP DENGAN PERGERAKAN ADAPTIVE STEERING
Ian Hardianto Siahaan, David Setiawan Prayogo 017-022
53. STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK *SHOCK ABSORBER* UNTUK MEN-CARI KOMPONEN PENGGANTI *SHOCK ABSORBER* SISTEM SUSPENSİ MOBİL PEDESAAN (GEA)
Wiwiek Hendrowati^{1,a)}, Harus L.G.^{1,b)}, Agus S.P.^{1,c)} dan I.N. Sutantra^{1,d)} 023-026

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PERUBAHAN DESAIN FLYWHEEL TERHADAP WAKTU PENGOSONGAN ENERGI KINETIK

H. Laksana Guntur¹⁾, W. Hendrowati²⁾

Lab. Vibrasi dan Sistem Dinamis, Jurusan Teknik Mesin, FTI, ITS^{1,2)}

Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia^{1,2)}

Phone: 0062-31-5946230, Fax: 0062-31-5946230^{1,2)}

E-mail : haruslg@me.its.ac.id¹⁾, wiwiek@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Flywheel banyak digunakan sebagai penyimpan energi kinetik berlebih pada sebuah mekanisme tertentu sehingga kelebihan energi kinetik tersebut bisa dimanfaatkan saat dibutuhkan. Salah satu sistem pemulihan energi kinetik terbuang yang memanfaatkan flywheel dan banyak digunakan pada kendaraan roda empat adalah Kinetik Energy Recovery System (KERS). KERS digunakan untuk menyimpan energi kinetik terbuang pada kendaraan selama proses pengereman. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh perubahan desain flywheel terhadap waktu pengosongan energi kinetik. Penelitian dilakukan dengan cara memvariasikan putaran dari motor penggerak sebagai representasi dari kecepatan awal kendaraan, menghitung waktu pengosongan energi untuk masing-masing flywheel, serta menghitung energi kinetik yang tersimpan oleh masing-masing flywheel untuk setiap putaran yang berbeda. Hasil dari penelitian ini adalah desain flywheel 1 memiliki massa 3,004 kg, inersia 0,0162 kg.m² dan radius girasi 0,07 m, waktu pengosongan energi kinetiknya adalah 3,4 detik – 8,14 detik dan pemulihan energi kinetiknya adalah sebesar 11,9 J – 706,7 J. Desain flywheel 2 memiliki massa 3,016 kg, inersia 0,0033 kg.m² dan radius girasi 0,0033 m. Waktu pengosongan energi kinetiknya adalah 1,66 detik – 5,34 detik dan pemulihan energi kinetiknya adalah sebesar 1,3 J – 159,5 J. Desain flywheel 3 memiliki massa 3,02 kg dengan inersia 0,0192 kg.m² dan radius girasi 0,08 m. Waktu pengosongan energi kinetiknya adalah 3,82 detik – 16,98 detik dan pemulihan energi kinetiknya adalah sebesar 19,7 J – 5475,8 J. Secara umum bisa disimpulkan bahwa besar pemulihan dan waktu pengosongan energi kinetik dari flywheel sebanding dengan radius girasinya.

Kata kunci: flywheel, pemulihan energi kinetik, waktu pengosongan energi kinetik, radius girasi.

1. PENDAHULUAN

Hasil penelitian Lei Zuo mengatakan sekitar 5.8% dari energi kendaraan terbuang akibat proses pengereman [1]. Pada penelitiannya, Zuo juga mengungkapkan bahwa *regenerative braking* dapat meningkatkan efisiensi kendaraan hingga 30%. Pada penelitian lain, Farad menyebutkan bahwa energi dari pengereman yang bisa dimanfaatkan untuk *regenerative braking* adalah 30% dari total energi pengereman yang dihasilkan selama proses pengereman [2]. *Kinetic Energy Recovery System (KERS)* adalah teknologi yang digunakan untuk memulihkan energi kinetik yang terbuang selama proses pengereman menjadi energi yang bisa digunakan oleh kendaraan sebagai tambahan tenaga pada saat kendaraan berakselerasi. Pada sistem pengereman konvensional, untuk mengurangi atau menghentikan laju kendaraan, energi kinetik yang timbul akibat adanya kecepatan kendaraan diubah menjadi energi panas melalui gesekan antara kanvas rem (*disc pad*) dengan piringan cakram (*disc*) atau tromol (*brake drum*) yang kemudian dilepaskan ke udara. *KERS* mengubah energi kinetik yang terbuang selama pengereman tersebut ke dalam bentuk energi lain yang mudah dimanfaatkan, seperti energi listrik. Salah satu komponen utama pada *KERS* yang digunakan sebagai penyimpan energi kinetik berlebih atau terbuang adalah *Flywheel*. Energi tersebut kemudian disimpan untuk dapat digunakan kembali oleh kendaraan saat dibutuhkan. Sistem pengereman yang memanfaatkan *KERS* ini lebih dikenal dengan *Regenerative Braking System*.

Pengembangan *KERS* saat ini umumnya berupa elektrik *KERS*. Suatu sistem yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik menggunakan lima macam perubahan bentuk energi (kinetik – listrik – kimia – listrik – kinetik) sehingga sistem ini memiliki efisiensi yang rendah, sekitar 36% .

Sesuai dengan hukum dasar fisika bahwa mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi yang lain akan menghasilkan kerugian energi (*losses*). Suatu sistem yang lebih efisien dikenal dengan sistem mekanikal *KERS*. Energi kinetik kendaraan selama pengereman disimpan pada sebuah *flywheel* yang berputar cepat sehingga tidak terjadi perubahan bentuk energi. Dalam sistem ini desain *flywheel* menjadi sangat penting untuk dapat menyimpan energi kinetik sebanyak dan secepat mungkin serta mampu dikembalikan ke dalam energi kinetik kendaraan seefisien mungkin.

Pada kendaraan perkotaan, dimana umumnya kendaraan berjalan lambat dan memiliki pola stop and go, energi kinetik yang terbuang akibat pengereman sangat besar. Suatu penelitian di Edinburg menunjukkan data 47% dari siklus berkendara merupakan pengereman termasuk kondisi idle [3]. Pada kecepatan tinggi, *Regenerative Braking System* mampu meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar kurang lebih sebesar 20%. Pada kendaraan besar dan berat seperti bus dan truk besar energi kinetik yang hilang selama pengereman ini sangat besar. Pada penelitian ini dibuat suatu model *KERS* yang mampu memodelkan kendaraan serta komponen-komponen mekanikal *KERS* lainnya dan diteliti pengaruh perubahan desain *flywheel* terhadap waktu pengosongan energi kinetik pada model *KERS* tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Pemodelan Mekanisme KERS

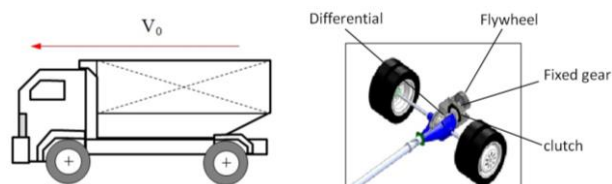
Mekanisme model *KERS* terdiri dari *clutch*, sebuah transmisi tetap dari sepasang roda gigi lurus dan *flywheel* sebagai media penyimpan energi kinetik. Dalam penelitian ini mekanisme *KERS* tersebut dimodelkan terpasang pada

differential truk Dutro 110 LD seperti terlihat pada Gambar 1. Energi kinetik kendaraan diteruskan melalui poros roda penggerak dan diperbesar putarannya melalui rasio gigi differential dan transmisi roda gigi lurus sebelum menggerakkan *flywheel*. Spesifikasi dari truk Dutro 110 LD yang dimodelkan dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan spesifikasi tersebut diketahui bahwa rasio final gear sebesar 5.125 dan ukuran roda berdiameter 23 inch atau 0.584 m. Variasi kecepatan awal kendaraan sebelum pengereman divariasikan sebesar 15 km/jam hingga 60 km/jam dengan penambahan kecepatan sebesar 5 km/jam. Model KERS dibuat dengan skala putaran 1:120. Sehingga besar putaran *flywheel* untuk setiap variasi kecepatan dapat ditabelkan sebagai berikut.

Rancang Bangun Mekanisme Model KERS Sederhana

Mekanisme KERS sederhana yang dibuat dalam penelitian ini menggunakan motor listrik sebagai model dari energi kinetik kendaraan, tiga buah *flywheel* dengan penampang yang berbeda, dan sebuah mini generator sebagai sensor kecepatan angular dari *flywheel*.



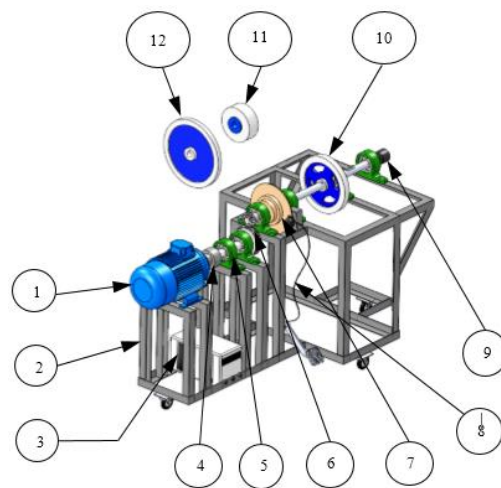
Gambar 1. Pemodelan Mekanisme KERS pada Kendaraan

Tabel 1. Spesifikasi Kendaraan truck Dutro 110 LD

SPESIFIKASI	BAGIAN	NILAI
TRANSMISI	Perbandingan gigi	
	Gigi ke-1	5,339
	Gigi ke-2	2,792
	Gigi ke-3	1,593
	Gigi ke-4	1
	Gigi ke-5	0,788
	Gigi mundur	5,339
RODA DAN BAN	Final gear	5,125
	Jumlah roda	6
	Berat	30 kg
	Ukuran Rim	16x5.50F-115
	Ukuran ban	7.00-16-14PR

Tabel 2. Putaran *Flywheel* Model KERS

Kecepatan awal (km/jam)	Jari-jari roda (m)	Rasio Final Gear	Rasio Fixed Gear	N <i>Flywheel</i> (rpm)
15	0.292	5.125	2	459.26
20	0.292	5.125	2	612.35
25	0.292	5.125	2	765.43
30	0.292	5.125	2	918.52
35	0.292	5.125	2	1071.61
40	0.292	5.125	2	1224.70
45	0.292	5.125	2	1377.78
50	0.292	5.125	2	1530.87
55	0.292	5.125	2	1683.96
60	0.292	5.125	2	1837.04



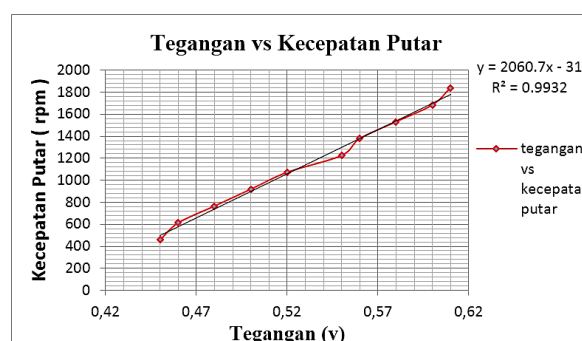
Keterangan gambar:

1. Motor listrik sebagai representasi energi kinetik kendaraan
2. Rangka
3. Pengatur kecepatan putar motor listrik (*Variable Speed Drive*)
4. *Coupling*
5. *Bearing*
6. Transmisi roda gigi lurus
7. *One-way Clutch*
8. Mekanisme penggerak *One-way Clutch*
9. Generator listrik sebagai pembaca putaran *flywheel*
10. *Flywheel* ke-1
11. *Flywheel* ke-2
12. *Flywheel* ke-3

Gambar 2. Desain Mekanisme Model KERS

Tabel 3. Luaran voltase mini generator

N <i>Flywheel</i> (rpm)	Tegangan (volt)
459.26	0,45
612.35	0,46
765.43	0,48
918.52	0,5
1071.61	0,52
1224.70	0,55
1377.78	0,56
1530.87	0,58
1683.96	0,6
1837.04	0,61



Gambar 3. Grafik Tegangan Listrik vs Kecepatan Putar Mini Generator

Kalibrasi Sensor Kecepatan Angular

Kalibrasi sensor dilakukan dengan cara mengukur tegangan yang dihasilkan oleh mini generator untuk setiap variasi kecepatan putar yang telah ditetapkan. Pada tahap ini model KERS dioperasikan dengan putaran tertentu kemudian putaran *flywheel* diukur menggunakan stroboscope sedangkan luaran voltase/tegangan listrik dari mini generator

diukur menggunakan oscilloscope. Hasil pengukuran tegangan yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil pengukuran tegangan listrik tersebut kemudian dibuat grafik dan selanjutnya dilihat trendline dari grafik yang dihasilkan

Metode Pengujian

Pengujian diawali dengan memasang *flywheel* yang akan diuji ke model KERS kemudian dilakukan pengaturan frekuensi VSD untuk mendapatkan putaran *flywheel* yang divariasikan. Untuk memastikan putaran sesuai dengan yang diinginkan, putaran *flywheel* diukur menggunakan stroboscope. Hasil pengaturan frekuensi pada VSD dicatat untuk pengujian selanjutnya.

Setelah langkah pengaturan frekuensi selesai dilakukan selanjutnya dilakukan pengujian. *Flywheel* diputar dengan frekuensi motor yang telah ditetapkan. Probe oscilloscope dipasang pada terminal + dan - dari penyearah output generator. Setelah putaran *flywheel* stabil, oscilloscope dinyalakan (melakukan proses scanning) dan dilakukan pengereman hingga *flywheel* berhenti. Selanjutnya proses scan diakhiri dan data yang dihasilkan disimpan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

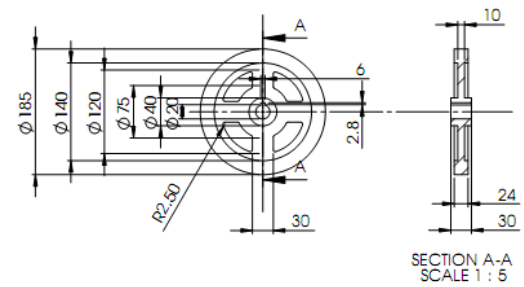
Perencanaan Flywheel

Dalam merencanakan desain *flywheel* yang akan digunakan dalam pengujian terdapat beberapa faktor yang dipertimbangkan yaitu: material yang digunakan, putaran *flywheel*, angka keamanan, dimensi *flywheel* dan massa *flywheel*. *Flywheel* dibuat menggunakan baja AISI 1045 dengan tegangan tarik maksimum 72 ksi atau 496,44 MPa dan massa jenis 0,283 lb/in³ atau 7849,99 kg/m³. Berdasarkan rancangan pengujian yang telah ditetapkan, *flywheel* dioperasikan dengan rentang kecepatan putar 400 rpm – 2000 rpm. Untuk menjamin keamanan selama operasi digunakan angka keamanan untuk komponen dinamis yaitu 2. Jari-jari maksimum *flywheel* yang digunakan adalah 0.062 m. Massa *flywheel* yang digunakan ditetapkan sebesar 3 kg.

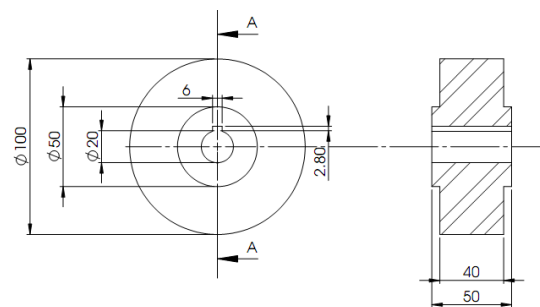
Gambar 4 menunjukkan detail dimensi dari desain *flywheel* 1, *flywheel* 2 dan *flywheel* 3 secara berurutan. *Flywheel* 1 menggunakan tipe ring dengan web, volume 0.000382 m³, massa 3.04 kg, inersia 0.0162 kg.m² dan radius girasi 0.07 m. *Flywheel* 2 menggunakan tipe ring dengan web, volume 0.000384 m³, massa 3.02 kg, inersia 0.0033 kg.m² dan radius girasi 0.033 m. *Flywheel* 3 menggunakan tipe ring dengan web, volume 0.000385 m³, massa 3.02 kg, inersia 0.0192 kg.m² dan radius girasi 0.08 m.

Waktu Pengosongan Energi Kinetik Sesaat Setelah Pengereman

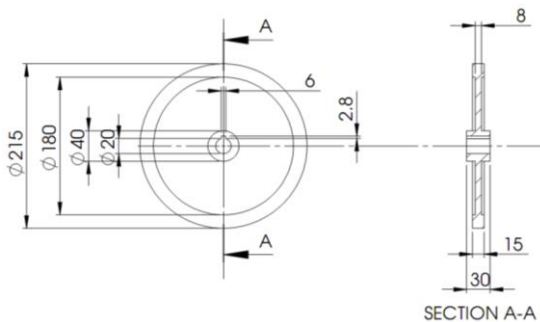
Untuk mengetahui waktu pengosongan energi kinetik masing-masing *flywheel* dilakukan pengujian dengan cara memutar *flywheel* sampai dicapai kecepatan putar *flywheel* sesuai putaran yang divariasikan. Putaran *flywheel* diukur menggunakan stroboscope sebagai representasi dari kecepatan kendaraan sesaat sebelum pengereman. Setelah itu dilakukan pengereman dan putaran *flywheel* setelah pengereman diukur menggunakan mini generator dan hasilnya ditampilkan dalam oscilloscope. Gambar 5 menunjukkan contoh grafik kecepatan putar *flywheel* 3 setelah pengereman dari kecepatan putar awal 1837,04 rpm. Lama waktu pengosongan energi kinetik untuk ketiga *flywheel* pada setiap putaran awal yang divariasikan dapat dilihat pada Tabel 4.



(a) Flywheel 1

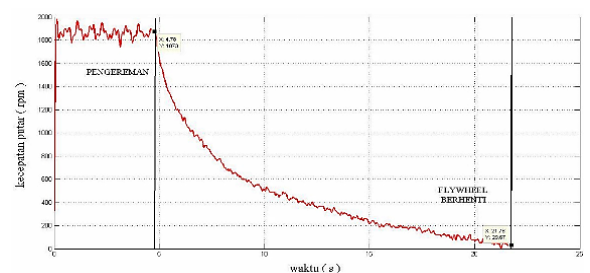


(b) Flywheel 2

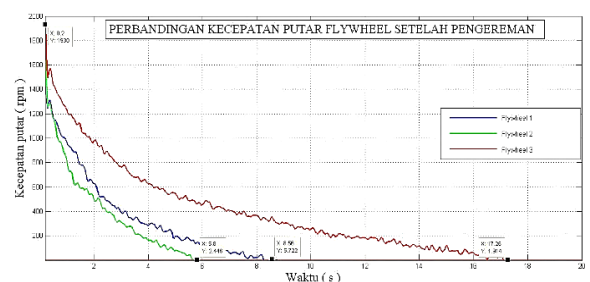


(c) Flywheel 3

Gambar 4. Desain Ketiga Flywheel



Gambar 5. Grafik Kecepatan Putar Flywheel 3 Sesaat Setelah Pengereman dari Kecepatan Putar 1830rpm



Gambar 6. Grafik Perbandingan Kecepatan Putar Flywheel 1, 2 dan 3 Setelah Pengereman



Tabel 4. Waktu Pengosongan Energi Kinetik Masing-Masing *Flywheel* dengan Berbagai Variasi Kecepatan Awal

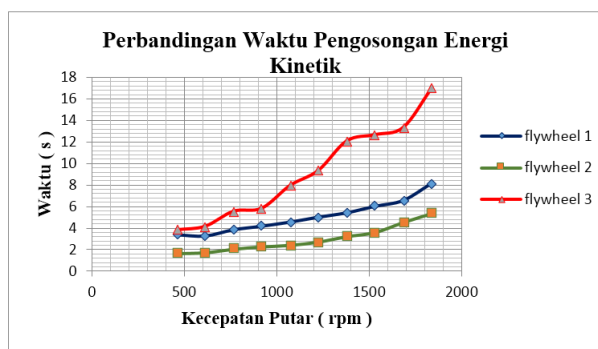
Kecepatan Putar (rpm)	Flywheel 1		Flywheel 2		Flywheel 3	
	N (rpm)	Waktu (s)	N (rpm)	Waktu (s)	N (rpm)	Waktu (s)
459.26	457	3,4	457.8	1,66	477.1	3,82
612.35	629,6	3,28	607.9	1,74	597.2	4,14
765.43	825,9	3,86	774	2,06	776.1	5,54
918.52	932	4,18	942.3	2,28	903.7	5,82
1071.61	1071	4,56	1072	2,42	1054	7,94
1224.70	1258	5,02	1358	2,72	1162	9,34
1377.78	1402	5,42	1342	3,22	1368	12,08
1530.87	1571	6,02	1565	3,6	1528	12,66
1683.96	1476	6,56	1514	4,52	1733	13,34
1837.04	1768	8,14	1750	5,34	1837	16,98

Perbandingan Waktu Pengosongan Energi Kinetik

Pada pembahasan grafik sebelumnya terlihat bahwa kecepatan putar ketiga *flywheel* membentuk kurva parabolik serta waktu pengosongan energi kinetiknya akan semakin besar dengan bertambahnya kecepatan awal sebelum pengereman. Berikut ini akan ditampilkan perbandingan dari kecepatan putar ketiga *flywheel* serta waktu pengosongan energi kinetiknya pada salah satu kecepatan awal yang divariasikan.

Gambar 6 memperlihatkan perbandingan penurunan kecepatan putar pada masing-masing *flywheel* setelah dilakukan pengereman dari kecepatan putar 1830 rpm. Pada grafik terlihat kurva penurunan kecepatan putar ketiga *flywheel* terjadi secara cepat sesaat setelah pengereman, sementara penurunan kecepatan putar semakin berkurang seiring bertambahnya waktu sehingga kurva semakin melandai. Pada grafik di atas terlihat pula kurva penurunan kecepatan *flywheel* 1, 2 dan 3 proporsional terhadap radius girasi masing-masing *flywheel*. Kurva penurunan kecepatan *flywheel* 1 terlihat berhimpit dengan kurva kecepatan putar *flywheel* 2 sedangkan kurva kecepatan putar *flywheel* 3 jauh berbeda dari kedua *flywheel* lainnya.

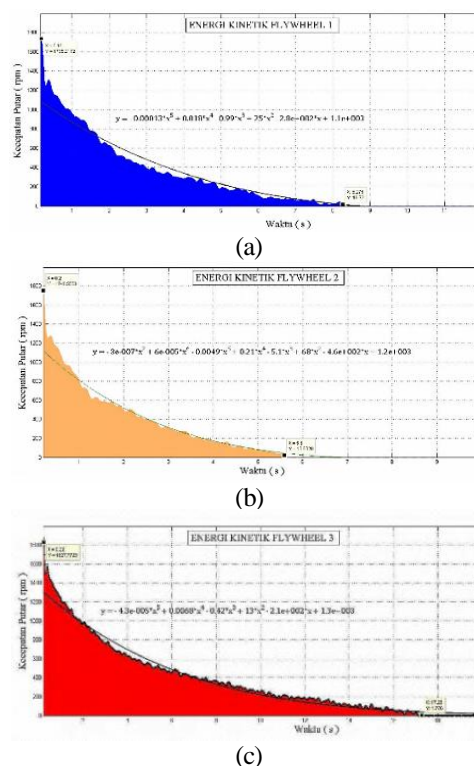
Gambar 7 menggambarkan waktu pengosongan energi kinetik dari ketiga macam penampang *flywheel* untuk tiap putaran yang divariasikan, dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa *flywheel* 3 memiliki waktu pengosongan energi kinetik paling lama. Sedangkan *flywheel* yang memiliki lama waktu pengosongan energi kinetik terkecil adalah *flywheel* 2. Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa semakin besar radius girasi *flywheel*, durasi waktu pengosongan energi *flywheel* akan semakin besar pula.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Waktu Pengosongan Energi Kinetik Masing-Masing *Flywheel* Setelah Dilakukan Pengereman dari Berbagai Kecepatan Putar yang Divariasikan

Tabel 5. Jumlah Energi Kinetik yang Tersimpan pada Masing-Masing *Flywheel* Secara Teoritis pada Berbagai Kecepatan Awal

N Flywheel (rpm)	Energi Kinetik (J)		
	Flywheel 1	Flywheel 2	Flywheel 3
459.26	18.72	3.81	22.18
612.35	33.27	6.78	39.44
765.43	51.99	10.59	61.62
918.52	74.87	15.25	88.73
1071.61	101.90	20.76	120.77
1224.70	133.09	27.11	157.74
1377.78	168.45	34.31	199.64
1530.87	207.96	42.36	246.47
1683.96	251.63	51.26	298.23
1837.04	299.46	61.00	354.92



Gambar 8. Kurva kecepatan putar masing-masing *flywheel* setelah pengereman dengan kecepatan awal 1837,04 rpm (a) *flywheel* 1, (b) *flywheel* 2, (c) *flywheel* 3

Perhitungan Energi Kinetik yang Tersimpan Pada Flywheel Setelah Pengereman

Waktu pengosongan energi kinetik setelah pengereman dipengaruhi oleh besarnya energi kinetik yang tersimpan pada *flywheel*. Semakin besar energi yang tersimpan maka semakin lama pula waktu pengosongan energi kinetiknya. Secara teoritis energi kinetik yang tersimpan dalam sebuah *flywheel* yang berputar dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

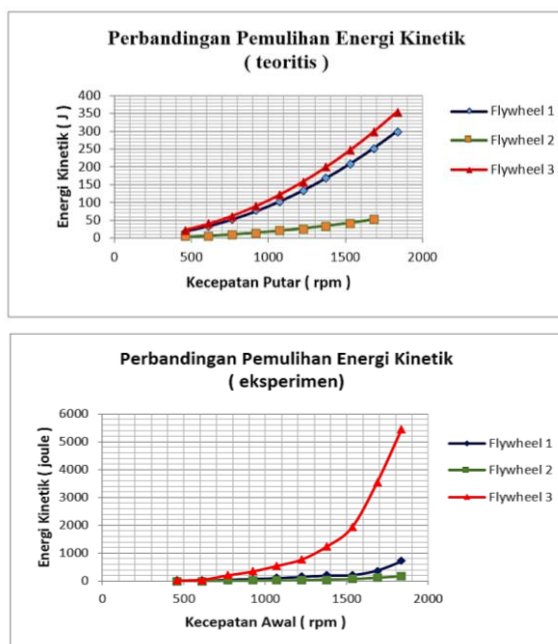
$$E = \frac{1}{2} I (\omega_t^2 - \omega_0^2) \quad (1)$$

Jumlah total energi kinetik yang tersimpan pada masing-masing *flywheel* merupakan jumlah total energi kinetik yang terbuang hingga *flywheel* berhenti. Jumlah energi kinetik yang tersimpan pada masing-

masing *flywheel* setelah pengereman secara teoritis dapat dilihat pada Tabel 5. Pada kenyataannya nilai kecepatan sudut (ω) *flywheel* setelah pengereman selalu berubah setiap waktu hingga akhirnya bernilai 0 pada saat *flywheel* berhenti berputar. Dengan demikian untuk menghitung jumlah energi kinetik yang tersimpan pada masing-masing *flywheel* maka terlebih dahulu harus dicari persamaan kurva kecepatan putar *flywheel* setelah pengereman terhadap fungsi waktu. Kemudian dengan cara meng-integral-kan persamaan tersebut dengan batas waktu mulai pengereman hingga *flywheel* berhenti maka akan didapatkan luasan di bawah kurva atau jumlah total energi kinetik yang tersimpan pada masing-masing *flywheel*. Gambar 7 menunjukkan grafik kecepatan putar masing-masing *flywheel* pada kecepatan awal 60 km/jam atau 1837,04 rpm. Sedangkan hasil perhitungan energi kinetik dengan cara pengujian secara eksperimen dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Jumlah Energi Kinetik yang Tersimpan pada Masing-Masing *Flywheel* Secara Eksperimen pada Berbagai Kecepatan Awal

N <i>Flywheel</i> (rpm)	Energi Kinetik (J)		
	<i>Flywheel</i> 1	<i>Flywheel</i> 2	<i>Flywheel</i> 3
459.26	11.94	1.32	19.7
612.35	18	2.2	40.77
765.43	38.7	7.06	197.3
918.52	70.2	9.35	335.48
1071.61	100.6	15.07	540.9
1224.70	148.9	23.9	772.3
1377.78	193.8	45.15	1240.8
1530.87	210.1	60.1	1923.6
1683.96	372.4	105.98	3526.8
1837.04	706.67	159.53	5475.82



Gambar 9. Grafik Perbandingan Jumlah Energi Kinetik yang Tersimpan pada Masing-Masing *Flywheel* Secara Teoritis dan Eksperimen

Perbandingan Pemulihan Energi Kinetik

Gambar 9 memperlihatkan perbandingan energi kinetik yang tersimpan pada *flywheel* 1, 2 dan 3 setelah pengereman dengan perhitungan secara teoritis dan eksperimen. Pada grafik di atas terlihat bahwa dengan kecepatan awal sebelum pengereman yang semakin besar, jumlah energi kinetik yang tersimpan pada masing-masing *flywheel* setelah dilakukan pengereman akan semakin besar pula. Jumlah energi kinetik yang tersimpan pada masing-masing *flywheel* sesuai dengan besar radius girasinya. Semakin besar radius girasi *flywheel* maka kemampuan *flywheel* tersebut dalam menyimpan energi juga akan semakin besar. Besar energi kinetik yang tersimpan pada *flywheel* 1 dan 3 secara teoritis terlihat tidak jauh berbeda, namun pada perhitungan secara eksperimen terlihat perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini terjadi karena hasil pengerjaan *flywheel* 1 yang kurang sempurna sehingga timbul vibrasi pada putaran tinggi. Besar energi kinetik yang tersimpan pada *flywheel* 2 baik secara teoritis maupun perhitungan secara eksperimen jauh lebih kecil dibanding energi kinetik yang tersimpan pada kedua *flywheel* lainnya. Secara umum hasil perhitungan energi kinetik secara eksperimen lebih besar dibandingkan dengan perhitungan secara teoritis hal ini karena perhitungan secara eksperimen menggunakan luasan di bawah kurva kecepatan putar sebagai representasi energi kinetik yang tersimpan pada *flywheel* setelah pengereman.

4. KESIMPULAN

Artikel ilmiah ini menyajikan hasil studi dan analisa pengaruh perubahan desain *flywheel* terhadap waktu pengosongan energi kinetik. Penelitian dilakukan dengan cara memvariasikan putaran dari motor penggerak sebagai representasi dari kecepatan awal kendaraan, menghitung waktu pengosongan energi untuk masing-masing *flywheel*, serta menghitung energi kinetik yang tersimpan oleh masing-masing *flywheel* untuk setiap putaran yang berbeda. Hasil dari penelitian ini adalah desain *flywheel* 1 memiliki massa 3,004 kg, inersia 0.0162 kg.m² dan radius girasi 0.07 m, waktu pengosongan energi kinetiknya adalah 3,4 detik-8,14 detik dan pemulihan energi kinetiknya adalah sebesar 11,9 J-706,7 J. Desain *flywheel* 2 memiliki massa 3,016 kg, inersia 0,0033 kg.m² dan radius girasi 0,0033 m. Waktu pengosongan energi kinetiknya adalah 1,66 detik-5,34 detik dan pemulihan energi kinetiknya adalah sebesar 1,3 J-159,5 J. Desain *flywheel* 3 memiliki massa 3,02 kg dengan inersia 0,0192 kg.m² dan radius girasi 0,08 m. Waktu pengosongan energi kinetiknya adalah 3,82 detik-16,98 detik dan pemulihan energi kinetiknya adalah sebesar 19,7 J-5475,8 J. Secara umum bisa disimpulkan bahwa besar pemulihan dan waktu pengosongan energi kinetik dari *flywheel* sebanding dengan radius girasinya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani and Y. Zhou, "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions," *Smart Mater. Struct.*, IOP Publishing, Vol. 19, 045003(10pp), (2010).
- [2] B. Cao, J. Wang, J. Guo, "Study on braking force distribution of electric vehicles", IEEE, 2009.
- [3] L. Zuo, "Energy harvesting shock absorber", New York States Premier Conference for Advance Energy, 2011.



- [4] S. Farad,"Effect of different regenerative braking strategies on braking performance and fuel in hybrid electric bus employing cruise vehicle simulation", SAE International Journal Fuels Lubrication, Vol.1, 2008.

STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK PUTARAN SINGLE DAN TRIPLE PENDULUM PADA SIMULATOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT-SISTEM PENDULUM

H. Laksana Guntur¹⁾, W. Hendrowati²⁾, Mukhtasor³⁾, R.W.Prastianto⁴⁾, I.S. Arif⁵⁾, H. Setiyawan⁶⁾

Lab.Sistem Dinamis dan Vibrasi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS^{1,2)}

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS^{3,4)}

Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS^{5,6)}

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Phone: 0062-31-5946230, Fax: 0062-31-5946230^{1,2)}

E-mail :haruslg@me.its.ac.id¹⁾

ABSTRAK

Pada sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut-sistem single pendulum horisontal sering terjadi kasus dimana pendulum tidak bisa berputar, sehingga tidak bisa menghasilkan daya listrik seperti yang diharapkan. Hal ini bisa terjadi karena beberapa faktor, desain pendulum dan ponton yang tidak sesuai dengan karakteristik frekwensi dan amplitudo gelombang laut, momen yang ditimbulkan oleh sistem pendulum tidak cukup besar untuk bisa memutar sistem pembangkit listrik, dan sering terjadi posisi pendulum segaris dengan arah datangnya gelombang. Paper ini menyajikan hasil studi eksperimen tentang karakteristik putaran pendulum, single dan triple pendulum, pada simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Triple pendulum dengan variasi panjang lengan yang berbeda diusulkan sebagai pengganti single pendulum karena beberapa kelebihan yang dimiliki, yaitu bisa mengakomodasi 3 frekwensi gelombang laut dan menciptakan kondisi unbalance sehingga diharapkan bias berputar lebih tinggi pada semua kondisi gelombang laut. Pada penelitian ini dibuat simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang terdiri dari motor listrik dan mekanisme slider-crank sebagai penghasil gerak osilatif pengganti gelombang laut, ponton, pendulum dan generator listrik. Pada eksperimen, putaran motor listrik divariasikan, $n=10$ rpm, 20 rpm dan 30 rpm, sesuai dengan frekwensi gelombang laut yang ada di perairan Indonesia. Sedangkan amplitudo gerak osilatif ponton divariasikan $A=0.04$ m dan 0.06 m. Karakteristik putaran single dan triple pendulum diukur, hasilnya dibandingkan dan dianalisa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa triple pendulum berputar searah untuk semua kondisi pengujian, putaran 10 rpm sampai 30 rpm dan amplitudo 0.04 m-0.06 m. Hanya pada putaran 10 rpm dan amplitudo 0.06 m saja triple pendulum berputar bolak-balik. Sementara untuk single pendulum pada putaran 20 rpm dan 30 rpm serta amplitudo 4 cm, pendulum tidak bergerak, dan pada putaran 10 rpm serta amplitudo 0.06 m, pendulum berputar bolak-balik.

Kata kunci: pembangkit listrik tenaga gelombang laut, sistem pendulum, triple pendulum, unbalance

1. PENDAHULUAN

Sekitar tiga per empat dari wilayah NKRI berupa laut dengan luas 5,8 juta kilometer persegi yang menghubungkan lebih dari 13.466 pulau dengan total panjang garis pantai 95 ribu km [1]. Hal ini menunjukkan kalau Indonesia memiliki potensi sumber daya kelautan yang sangat besar. Salah satu potensi tersebut adalah energi gelombang laut. Teknologi pengembangan energi dari laut dapat memecahkan masalah energi listrik di negara kita salah satunya dengan pengembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut-Sistem Bandulan (PLTGL-SB). PLTGL-SB merupakan salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan gelombang laut sebagai sumber energinya.

Teknologi pembangkit listrik tenaga gelombang laut di Indonesia pertama kali dikembangkan pada tahun 2002 oleh Zamrisyaf (Staf Puslitbang PLN), menggunakan sistem bandul, atau dikenal dengan istilah PLTGL-SB. Pada awalnya model ponton yang dipakai masih sangat sederhana, hanya berupa drum-drum yang dirakit menjadi satu. Drum-drum ini hanya berfungsi memberikan daya apung saja terhadap sistem bandul, sedang gelombang laut yang membentur rakitan drum tersebut akan pecah di sela-sela drum. Akibatnya energi gelombang laut yang berupa momentum tidak dapat diserap sepenuhnya oleh sistem

sehingga tidak optimal dalam menggerakkan rakitan drum, yang selanjutnya bandul tidak bergerak maksimal.

Sistem ponton dipilih sebagai solusi untuk menggantikan rakitan drum tersebut sebagai penopang sistem bandulnya. Dengan ponton diharapkan problem penyerapan energi atau momentum yang terjadi bisa maksimal. Energi yang dihasilkan dari PLTGL-SB ini sangat tergantung pada gerakan ponton dan pendulum/bandul. Gerakan yang terjadi pada ponton adalah gerakan translasi dan rotasi, akibat hampasan gelombang dan tekanan air di bawah permukaan laut. Gerakan ponton ini kemudian menyebabkan gerakan rotasi pada sistem pendulum yang dimanfaatkan untuk memutar generator.

Pada sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut-sistem single pendulum horisontal sering terjadi kasus dimana pendulum tidak bisa berputar, sehingga tidak bisa menghasilkan daya listrik seperti yang diharapkan. Hal ini bisa terjadi karena beberapa faktor, desain pendulum dan ponton yang tidak sesuai dengan karakteristik frekwensi dan amplitudo gelombang laut, momen yang ditimbulkan oleh sistem pendulum tidak cukup besar untuk bisa memutar sistem pembangkit listrik, dan sering terjadi posisi pendulum segaris dengan arah datangnya gelombang. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada artikel ini disajikan hasil studi eksperimen tentang karakteristik putaran pendulum, single

dan triple pendulum, pada simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Triple pendulum dengan variasi panjang lengan yang berbeda diusulkan sebagai pengganti single pendulum karena beberapa kelebihan yang dimiliki, yaitu bisa mengakomodasi 3 frekwensi gelombang laut dan menciptakan kondisi unbalance sehingga diharapkan bias berputar lebih tinggi pada semua kondisi gelombang laut. Pada penelitian ini dibuat simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang terdiri dari motor listrik dan mekanisme slider-crank sebagai penghasil gerak osilatif pengganti gelombang laut, ponton, pendulum dan generator listrik.

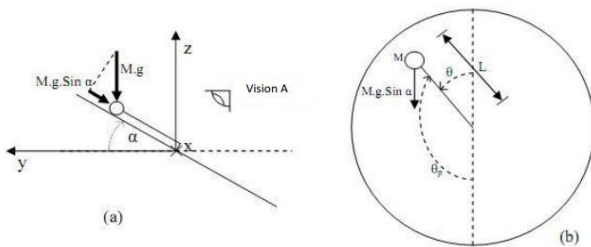
2. DASAR TEORI SINGLE DAN TRIPLE PENDULUM

Bagian ini menjelaskan tentang dasar teori yang mendukung bahwa triple pendulum dengan variasi panjang lengan yang berbeda memiliki beberapa kelebihan yang dimiliki, yaitu bisa mengakomodasi 3 frekwensi gelombang laut dan menciptakan kondisi unbalance sehingga diharapkan bias berputar lebih tinggi pada semua kondisi gelombang laut. Gambar 1 dan 2 menunjukkan model matematis kondisi quasi statis saat ponton dengan single dan triple pendulum membentuk sudut kemiringan α . Pada model matematis bisa diuraikan persamaan kesetimbangan momen dari sistem pendulum akibat kemiringan ponton. Dengan M : massa pendulum, L : panjang lengan pendulum, g : percepatan gravitasi bumi, dan α : kemiringan sudut ponton.

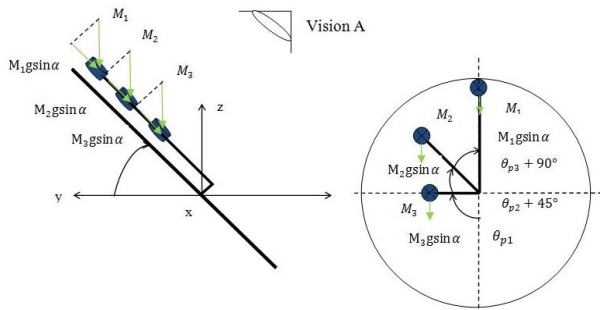
$$\Sigma T = J_p \cdot \ddot{\theta}_p \quad (1)$$

$$-M \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \theta_p \cdot L - C_t \cdot \dot{\theta}_p = M \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta}_p \quad (2)$$

$$0 = M \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta}_p + C_t \cdot \dot{\theta}_p + M \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \theta_p \cdot L \quad (3)$$



Gambar 1. Model matematis ponton dengan single-pendulum pada sudut kemiringan ponton α .



Gambar 2. Model matematis ponton dengan triple-pendulum pada sudut kemiringan ponton α .

Sedangkan untuk triple-pendulum, kesetimbangan momen yang terjadi bisa diuraikan dalam persamaan (4) - (9). Dari persamaan dinamis kesetimbangan momen pada sistem single dan triple pendulum bisa disimpulkan bahwa triple pendulum bisa menghasilkan momen penggerak lebih besar, menciptakan kondisi ketidaksetimbangan dan memiliki tiga

frekwensi pribadi yang mampu mengakomodasi 3 daerah frekwensi gelombang laut.

$$\Sigma T = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p \quad (4)$$

$$M_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin \theta_p \cdot L_1 + M_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 45^\circ) \cdot L_2 + M_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \sin(\theta_p + 90^\circ) \cdot L_3 - C_T \dot{\theta}_p = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p \quad (5)$$

Karena, $M_1 = M_2 = M_3 = M$, maka :

$$M \cdot g \cdot \sin \alpha (L_1 \sin \theta_p + L_2 \sin(\theta_p + 45^\circ) + L_3 \sin(\theta_p + 90^\circ) - C_T \dot{\theta}_p = J_{p1} \ddot{\theta}_p + J_{p2} \ddot{\theta}_p + J_{p3} \ddot{\theta}_p \quad (6)$$

$J_p = ML^2$, maka :

$$\Sigma J_p = ML_1^2 \ddot{\theta}_p + ML_2^2 (\ddot{\theta}_p + 45^\circ) + ML_3^2 (\ddot{\theta}_p + 90^\circ) - C_T \dot{\theta}_p \quad (7)$$

$$M \cdot g \cdot \sin \alpha (L_1 \sin \theta_p + L_2 \sin(\theta_p + 45^\circ) + L_3 \sin(\theta_p + 90^\circ) - J_{p1} \ddot{\theta}_p + J_{p2} \ddot{\theta}_p + J_{p3} \ddot{\theta}_p - C_T \dot{\theta}_p = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p \quad (8)$$

$$M \cdot g \cdot \sin \alpha (L_1 \sin \theta_p + L_2 \sin(\theta_p + 45^\circ) + L_3 \sin(\theta_p + 90^\circ) - ML_1^2 \ddot{\theta}_p + ML_2^2 (\ddot{\theta}_p + 45^\circ) + ML_3^2 (\ddot{\theta}_p + 90^\circ) - C_T \dot{\theta}_p = \Sigma J_p \ddot{\theta}_p \quad (9)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, ponton dibuat dalam bentuk plat datar. Pergerakan ponton merupakan simulasi dari gerak gelombang laut. Ponton dibatasi hanya dapat dibatasi dalam arah sumbu x dan y saja. Penggerak ponton ini menggunakan motor DC. Sebuah generator diletakkan di dalam ponton, yang dihubungkan dengan pendulum melalui sebuah poros vertikal memanjang yang berfungsi juga sebagai pengukur putaran pendulum.

Skema pengujian simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut-sistem bandul bisa dilihat pada Gambar 3 dan 4. Cara kerja dari simulator ini adalah sebagai berikut: jika motor berputar, akan diteruskan pada sebuah pulley. Antara pulley dengan ponton dihubungkan oleh *connecting rod*, dimana *connecting rod* inilah yang membuat sudut olakan ponton. Kemudian ponton akan bergerak osilatif naik-turun. Pergerakan ponton akan memutar pendulum, dan dari perputaran pendulum akan memutar poros penyangga di bawahnya. Nantinya perputaran poros inilah yang akan memutar generator dan kemudian menghasilkan energi listrik.

Pada realitanya pada PLTGL-SB, inputan gerak ponton berasal dari gelombang laut yang seringkali tidak beraturan dan bisa datang dari berbagai sisi ponton datar. Kompleksnya pergerakan gelombang laut disederhanakan untuk menjadi batasan masalah mengenai input gerak ponton. Pada simulator ini gerakan tersebut diakibatkan adanya gerakan rotasi dari motor DC yang dikonversi menjadi gerakan translasi. Agar dapat menjadi simulasi dari gelombang laut, maka putaran *output* motor harus disesuaikan dengan karakteristik gelombang laut yang ada. Dari data yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, diperoleh data bahwa amplitudo gelombang laut Indonesia berkisar antara 0,25-0,75 m. Dalam penelitian kali ini untuk menentukan sudut olakan ponton digunakan

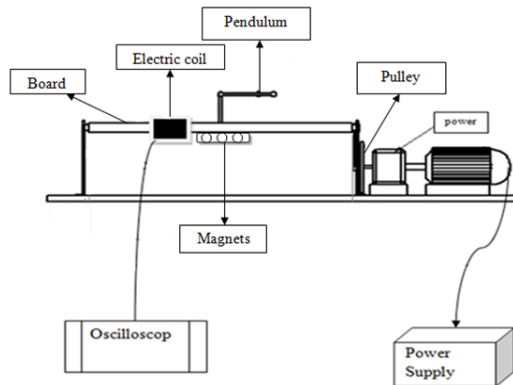
amplitudo gelombang laut sebesar 0,75 m, dan nilai periode gelombang laut yang telah diketahui sebelumnya yaitu 3, 6 dan 9 detik. Dengan menggunakan periode (T) yang sudah didapatkan dari penelitian sebelumnya didapatkan tiga periode dalam gelombang laut, yaitu 3, 6 dan 9 detik. Maka frekuensi putaran motor yang harus diberikan bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan (10).

$$f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

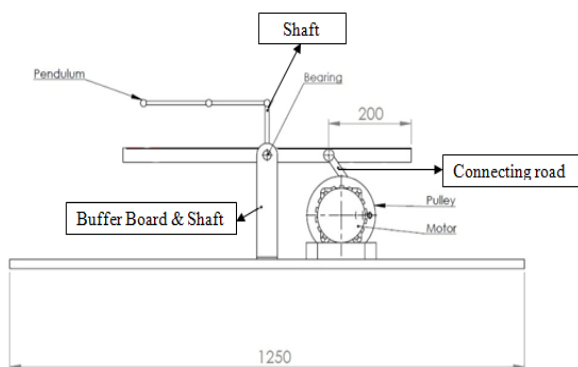
Pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan variabel putaran motor dan amplitudo untuk single dan triple pendulum, dimana L: panjang lengan pendulum, M: massa pendulum, A: amplitudo gerakan ponton, dan n: putaran motor.

L1 = 30 cm	M1 = 100 gr	A1 = 4 cm	n1 = 10 rpm
L2 = 20 cm	M2 = 100 gr	A2 = 6 cm	n2 = 20 rpm
L3 = 10 cm	M3 = 100 gr		n3 = 30 rpm

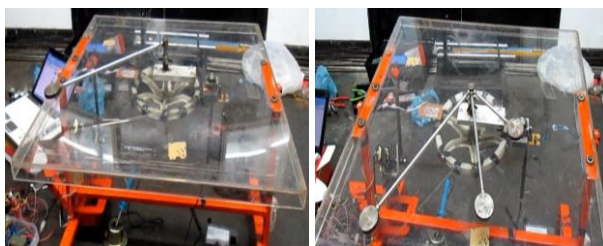
Gambar 5 (a) dan 5 (b) menunjukkan foto simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut single dan triple pendulum/bandul.



Gambar 3. Skema pengujian simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut-sistem bandul (Tampak depan).



Gambar 4. Skema pengujian simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut-sistem bandul (Tampak samping).

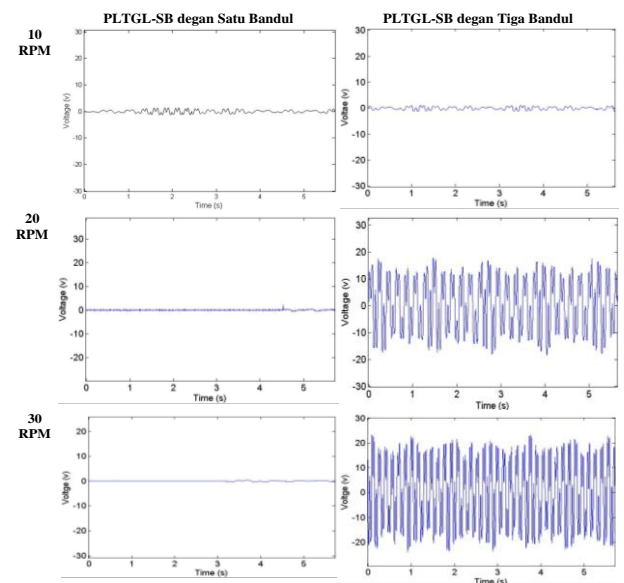


(a) Single pendulum (b) Triple pendulum

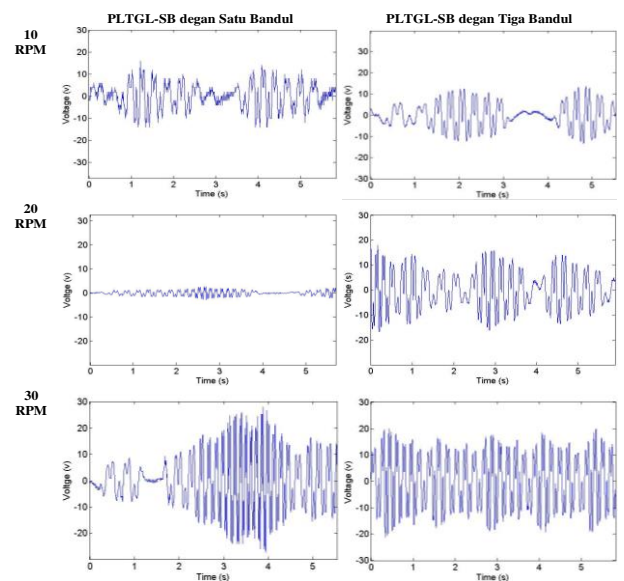
Gambar 5. Foto simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem single dan triple pendulum/bandul.

4. HASIL DAN ANALISA

Hasil pengujian/pengukuran karakteristik putaran dari bandul pada simulator PLTGL-SB sistem satu bandul ditampilkan dalam grafik voltase sebagai fungsi waktu. Besarnya putaran dan simpangan bandul berbanding lurus dengan nilai voltase hasil pengukuran dengan oscilloscope. Sedangkan arah putaran diamati secara visual, serta tercermin dari besar tanda positif-negatif pada voltase hasil pengukuran. Gambar 6 menunjukkan hasil pengukuran putaran-yang ditunjukkan oleh nilai voltase dari sistem satu dan tiga bandul pada PLTGL-SB untuk amplitudo gelombang 4 cm dan frekwensi gelombang 10-30 rpm. Sedangkan Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran putaran-yang ditunjukkan oleh nilai voltase dari sistem satu dan tiga bandul pada PLTGL-SB untuk amplitudo gelombang 6 cm dan frekwensi gelombang 10-30 rpm.



Gambar 6. Hasil pengukuran putaran (nilai voltase) dari sistem satu dan tiga bandul pada PLTGL-SB untuk gelombang dengan amplitudo 4 cm dan frekwensi 10-30 rpm.



Gambar 7. Hasil pengukuran putaran (nilai voltase) dari sistem satu dan tiga bandul pada PLTGL-SB untuk gelombang dengan amplitudo 6 cm dan frekwensi 10-30 rpm.



Hasil pengukuran menunjukkan bahwa untuk amplitudo gelombang 4 cm, sistem satu bandul hampir tidak berputar pada semua frekwensi gelombang 10-30 rpm. Hal ini bisa dilihat dari nilai simpangan maksimum voltase hasil pengukuran, yang berbanding lurus dengan putaran bandul. Sedangkan untuk sistem tiga bandul, hanya pada frekwensi gelombang rendah 10 rpm saja bandul berputar dengan kecepatan dan simpangan rendah. Tapi pada 20 rpm dan 30 rpm, bandul berputar dengan kecepatan tinggi, yang ditunjukkan oleh nilai simpangan maksimum voltase hasil pengukuran. Pada pengujian dengan amplitudo gelombang yang lebih tinggi 6 cm, baik sistem satu bandul maupun tiga bandul, berputar pada semua frekwensi 10-30 rpm. Tetapi, putaran sistem satu bandul cenderung tidak stabil dan simpangannya lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem tiga bandul.

5. KESIMPULAN

Paper ini menyajikan hasil studi eksperimen tentang karakteristik putaran pendulum, single dan triple pendulum, pada simulator pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa triple pendulum berputar searah untuk semua kondisi pengujian, putaran 10 rpm sampai 30 rpm dan amplitudo 0.04 m-0.06 m. Hanya pada putaran 10 rpm dan amplitudo 0.06 m saja triple pendulum berputar bolak-balik. Sementara untuk single pendulum pada putaran 20 rpm dan 30 rpm serta amplitudo 4 cm, pendulum tidak bergerak, dan pada putaran 10 rpm serta amplitudo 0.06 m, pendulum berputar bolak-balik.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih dan penghargaan kami sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian ini, khususnya Kementerian Riset dan Teknologi, melalui program Hibah Penelitian INSINAS dan LPPM-ITS.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nurullah, A. dan Perdana, A. 2013. Jurnal Nasional: *Mengembangkan Ekonomi Kelautan*. Jakarta Pusat: www.jurnas.com.
- [2] IEA-OES. 2006. *Ocean Energy: Global Technology Development Status*, Powertech Labs Inc.
- [3] Lewandowski, E.M., "The Dynamic of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping", World Scientific, New Jersey (2004).
- [4] Hendratmoko, H. dkk. 2012. *Studi Eksperimen Pengaruh Lunas Bilga terhadap Gerakan Rolling*. Surabaya: ITS.
- [5] Bhattacharyya, Rameswar. *Dynamic of Marine Vehicles*. Maryland: A Wiley Series, (1978).



RANCANG BANGUN ALTERNATIF AIR TO HYDRAULIC PRESSURE BOOSTER (INTENSIFIER) PADA SISTEM HIDROLIK PENGGERAK LIFTING TABLE

Iwan Agustiaawan¹⁾, Mansur Ependi²⁾, Usep Ali Albayumi³⁾

Jurusan Teknik Mesin - Institut Teknologi Nasional, Bandung^{1,2)}

Jalan PKH Hasan Mustapa No. 23 Bandung 40124^{1,2)}

Phone : (022)7272215 , Fax : (022)7202892^{1,2)}

PT Dirgantara Indonesia, Bandung³⁾

Email: iwan.agustiaawan@gmail.com¹⁾

ABSTRAK

Air to hydraulic pressure booster (intensifier) adalah komponen yg digunakan untuk meningkatkan tekanan udara (air pressure) sistem pneumatik menjadi tekanan hidrolik (hydraulic pressure) untuk menghasilkan tekanan hidrolik yang besar pada actuator. Aplikasi booster (intensifier) pada sistem hidrolik sudah komersil digunakan dalam berbagai mesin antara lain hydraulic steam machine, automotive lift machine dan punch press machine. Untuk booster kapasitas air to hydraulic pressure 1:20 buatan japan harganya antara 6-7 Juta rupiah dan buatan china harganya antara 3-4 juta rupiah. Berdasarkan mahalnnya harga booster tersebut dilakukan rancang bangun alternatif booster yang dapat digunakan dengan biaya lebih murah. Tujuan dari rancang bangun adalah memperoleh model fisik dan kinerja aktual air to hydraulic pressure booster dalam gabungan sistem hidrolik dan pneumatik yang diaplikasikan sebagai penggerak sebuah lifting table. Hasil yang diperoleh dari rancang bangun adalah konstruksi air to hydraulic pressure booster menggunakan 1 (satu) pneumatic cylinder double acting with double rod dan 2 (dua) hydraulic cylinder double acting with single rod dengan perbandingan luas penampang pneumatic piston terhadap hydraulic piston sebesar 16:1, perbandingan air pressure terhadap hydraulic pressure secara teoritik 1:16 dan secara eksperimental 1:9 karena terdapat pressure drop pada booster akibat gesekan. Total biaya membangun booster (intensifier) adalah sebesar 1,5 juta rupiah.

Kata kunci: air pressure, hydraulic pressure, booster, intensifier.

1. PENDAHULUAN

Saat ini umumnya terdapat 3 (tiga) cara penggunaan sistem penggerak mekanisme mesin di industri modern yaitu elektrik, hidrolik dan pneumatik. Cara elektrik yaitu menggunakan motor listrik, hidrolik menggunakan daya fluida cair bertekanan, dan pneumatik menggunakan daya udara bertekanan. Hidrolik dan pneumatik sistem adalah teknologi yang terus berkembang, dimana pentransferan energinya menggunakan fluida cair dan udara bertekanan. Dapat dikatakan hidrolik dan pneumatik adalah sebagai salah satu sistem yang mendorong perkembangan industri, dikarenakan sistem hidrolik dan pneumatik dipergunakan untuk mendorong, menarik, mengatur, mengarahkan peralatan dalam industri modern. Dalam dunia pembangkitan daya listrik (*power plant*), proses pemesian, dan proses industri yang menggunakan daya besar, karena sifat *flexibility*, *maintainability*, optimasinya pada daya besar dan keuntungan lainnya, sehingga menjadikan hidrolik dominan karena digunakan sebagai sistem untuk pengontrolan daya besar. Sementara pneumatik menjadi alternatif yang semakin dominan digunakan pada proses industri otomatisasi terutama industri pengolahan dan pengemasan makanan/minuman/obat-obatan karena sifat kemudahan pengopasian, ketelitian dan kebersihan, keamanannya.

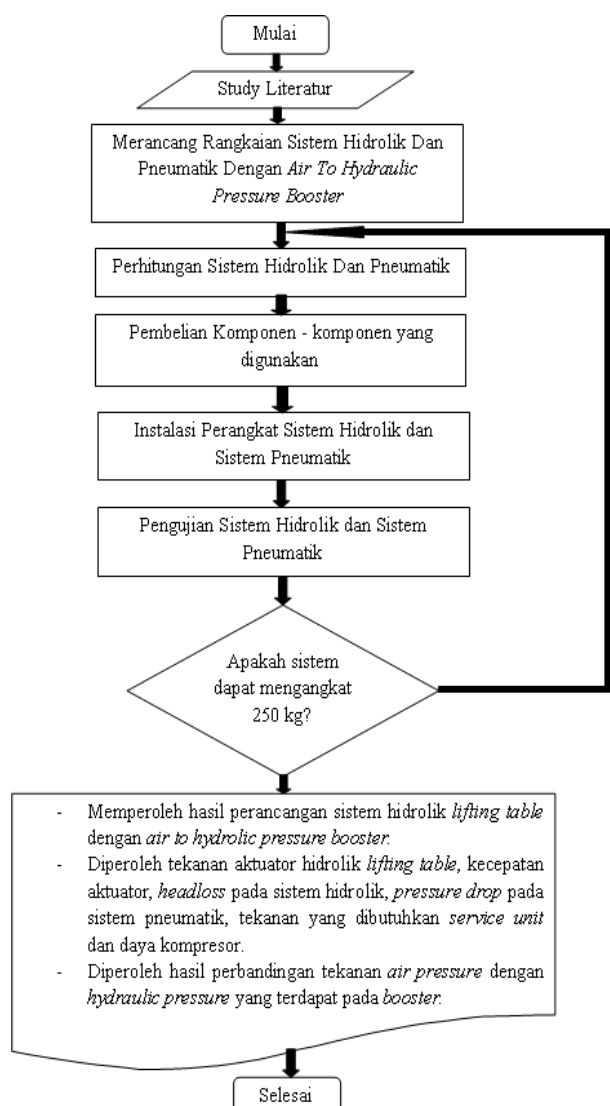
Air to hydraulic pressure booster atau disebut dengan *intensifier*, adalah komponen yang digunakan untuk meningkatkan tekanan udara (*air pressure*) sistem pneumatik menjadi tekanan hidrolik (*hydraulic pressure*) untuk menghasilkan daya/tekanan hidrolik yang besar pada aktuator. Sistem yang menggunakan *Air to hydraulic pressure booster* merupakan kombinasi sistem pneumatik sebagai *input* dan hidrolik sebagai *output* yang bertujuan menghemat energi inputnya. Aplikasi *booster (intensifier)* pada sistem hidrolik

sudah komersil digunakan dalam berbagai mesin hidrolik antara lain *hydraulic steam machine*, *automotive lift machine* dan *punch press machine*. Untuk *booster* kapasitas *air to hydraulic pressure* 1:20 buatan japan harganya antara 6-7 Juta rupiah dan buatan china harganya antara 3-4 juta rupiah. Berdasarkan mahalnnya harga *booster* tersebut dilakukan rancang bangun alternatif *booster* yang dapat digunakan dengan biaya lebih murah. Tujuan dari rancang bangun adalah memperoleh model fisik rancangan *air to hydraulic pressure booster* dalam gabungan sistem hidrolik dan pneumatik yang diaplikasikan pada sebuah *lifting table* kapasitas angkat maksimum 250 kg, mengetahui kinerjanya melalui perhitungan secara teoritik dan pengujian secara eksperimental perbandingan tekanan *air pressure* dengan *hydraulic pressure* yang terdapat pada *booster (intensifier)*. Dengan penelitian ini, diharapkan model *Air to hydraulic pressure booster (intensifier)* yang diperoleh dapat menjadi pertimbangan atau alternatif untuk digunakan karena konstruksinya yang sederhana dan biaya membangunnya yang relatif murah dan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut.

2. METODOLOGI

Secara garis besar metodologi / langkah yang digunakan dalam rancang bangun *Air to hydraulic pressure booster (intensifier)* dinyatakan pada Gambar 1. Untuk membangun sistem hidrolik penggerak *lifting table* kapasitas angkat maksimum 250 kg dengan *air to hydraulic pressure booster*, langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut: perancangan yang dilakukan dimulai dari studi literatur dan observasi lapangan mengenai sistem hidrolik dan pneumatik dengan perangkat *air to hydraulic pressure booster* yang telah diterapkan diberbagai mesin. Perancangan bertujuan

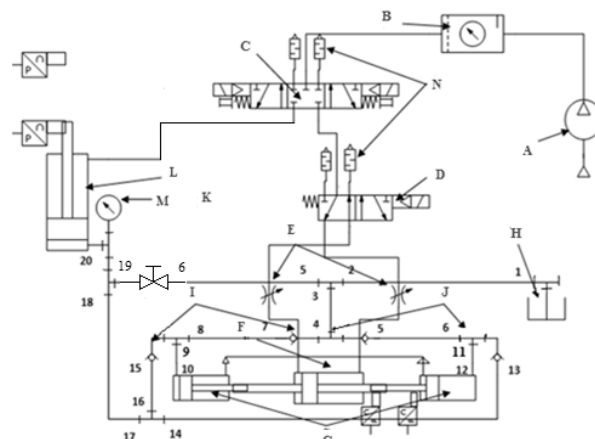
untuk memperoleh spesifikasi model booster dan sistem hidroliknya berdasarkan kriteria yang telah ditentukan. Berdasarkan model hasil perancangan kemudian dibangun (diwujudkan secara fisik) yang selanjutnya dilakukan pengujian untuk mengetahui kinerja actual.



Gambar 1. Flow Chart Perancangan dan Pengujian Sistem Hidrolik Lifting Table

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan diuraikan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, yang kemudian dianalisis perbandingannya. Gambar 2 memperlihatkan rancangan *flow circuit* sistem hidrolik dengan *air to hydraulic pressure booster* menggunakan software D&C scheme editor 5. Software D&C scheme editor 5 merupakan suatu software yang khusus digunakan untuk merancang *flow circuit* gabungan sistem hidrolik dan sistem pneumatik. Dari Gambar 2 terdapat beberapa komponen hidrolik dan pneumatik yaitu (A) Kompresor, (B) *Service unit*, (C) DCV 5/3, *double selenoid with spring return*, (D) DCV 5/2, *single selenoid with spring return*, (E) *Throttle Valve*, (F) *Actuator double acting with double rod* sebagai *primemover*, (G) *Actuator hydraulic sebagai booster*, (H) *Reservoir*, (I) *Check valve*, (J) *Tee connection*, (K) *Manual Valve*, (L) *Actuator hydraulic*, (M) *Pressure gauge*, (N) *Silencer*.



Gambar 2. Flow circuit gabungan sistem hidrolik dan pneumatik

Data perancangan yang sudah ditentukan adalah sebagai berikut:

Table 1. Data Perancangan

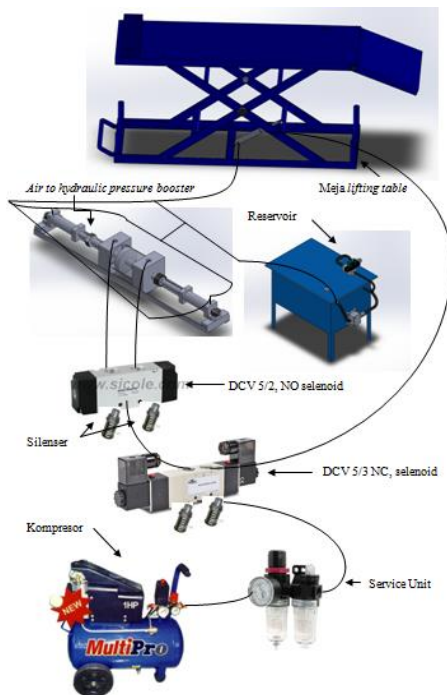
Beban maksimum	250 Kg
Diameter piston hidrolik <i>lifting table</i> (D_p)	40 mm
Diameter rod hidrolik <i>lifting table</i> (D_R)	20 mm
Panjang lengan aktuator <i>lifting table</i> (L_A)	175 mm
Kecepatan aktuator <i>lifting table</i> extend (V)	2,11 cm/s
Diameter pipa hidrolik 1/4"	9,25 mm
Panjang selang hidrolik	2,2 m
Diameter piston hidrolik <i>pressure booster</i> (D_p)	25 mm
Diameter rod hidrolik <i>pressure booster</i> (D_R)	15 mm
Diameter piston pneumatik <i>pressure booster</i> (D_p)	100 mm
Diameter rod pneumatik <i>Primeover</i> (D_p)	25 mm
Diameter luar selang pneumatik (D_o)	6 mm
Diameter dalam selang pneumatik (D_i)	4 mm
Panjang selang pneumatik	3 m
Discharge Kompresor (Q_{kom})	126 $\frac{\text{liter}}{\text{menit}}$

Pada Gambar 3 memperlihatkan instalasi gabungan dari sistem hidrolik dan sistem pneumatik yang dilengkapi penerapan *air to hydraulic pressure booster*. Sistem digerakan oleh sebuah kompresor yang menghasilkan udara bertekanan (*air pressure*) yang telah disetting tekanannya pada *service unit* untuk menggerakan suatu sistem pneumatik, dimana sistem pneumatik ini digunakan untuk menggerakan silinder pneumatik *double acting with double rod* atau *primemover booster*. Ketika tekanan udara (*air pressure*) mendorong silinder pneumatik maka pergerakan tersebut menghasilkan gaya pada silinder hidrolik untuk memompa oli hidrolik, dimana perbedaan silinder hidrolik dan silinder pneumatik dengan gaya yang sama maka menghasilkan tekanan yang besar tergantung pada perbandingan luas penampang silinder tersebut. Tekanan hidrolik (*hydraulic pressure*) yang dihasilkan *booster* tersebut diteruskan untuk mengangkat aktuator hidrolik pada *lifting table* untuk mengangkat meja dan beban yang sudah ditentukan.

Proses perhitungan untuk memperoleh perbandingan *air pressure* terhadap *hydraulic pressure* pada *booster* adalah sebagai berikut:

Berdasarkan analisis statika pada struktur *lifting table*, diperoleh kebutuhan gaya aktuator hidrolik untuk menggerakan *lifting table*. Untuk mendapatkan tekanan hidrolik

yang bekerja pada saat aktuator bergerak mendorong beban diperoleh melalui persamaan sebagai berikut:



Gambar 3. Instalasi gabungan sistem hidrolik dan pneumatic dengan air to hydraulic pressure booster

$$P_{beban} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Setelah didapatkan tekanan pembebanan dilanjutkan kembali untuk mencari debit fluida hidrolik pada aktuator melalui persamaan sebagai berikut:

$$Q = V \cdot A \quad (2)$$

Setelah mendapatkan debit fluida hidrolik pada aktuator dicari kecepatannya dalam selang hidrolik melalui persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Kecepatan udara yang digunakan untuk mendapatkan bilangan Reynolds. Dari bilangan Reynolds dengan diagram Moody didapatkan nilai f (friction factor) untuk mengetahui aliran laminar atau aliran turbulen dalam pipa, maka dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \quad (4)$$

Diketahui:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{massa jenis oli} &= 860 \text{ kg/m}^3 \\ \mu &= \text{viskositas mutlak} &= 0.032 \text{ kg/m.s} \end{aligned}$$

Setelah nilai f tersebut didapat maka hitung *head losses* pada sistem hidrolik dan pneumatik dengan persamaan berbagai *headloss*:

Headloss pada pipa lurus:

$$H_{l_{mayor}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Menghitung *headloss* pada *fitting/tee*:

$$H_{l_{minor}} = n \cdot k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

Menghitung *headloss* pada DCV:

$$H_{l_{minor}} = n \cdot k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

Menghitung perbedaan tekanan antara sisi masuk pipa dan sisi keluar pipa sering kali menggunakan rumus Bernoulli seperti berikut ini:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (8)$$

Menghitung tekanan *hydraulic pressure double acting* H_p dapat dihitung:

$$H_p = A_p \times \left(\frac{R^2 - r^2}{r^2} \right) \quad (9)$$

Dimana :

A_p = Air pressure (bar)

R = Air Piston radius (m)

r = Plunger Piston radius (m)

Menghitung daya kompresor pada tekanan absolut secara teori dengan tekanan maksimum tank kompresor 8 bar dan terdapat pengaruh tekanan luar atmosfer (absolut) dari pengukuran alat ukur tekanan dengan persamaan:

$$W_k = C_p \cdot (T_2 - T_1) \cdot \dot{m} \quad (10)$$

Tabel 2. Hasil perhitungan teoritik

Tekanan Service Unit	4 bar
Beban <i>lifting table</i>	250 Kg
Tekanan pada <i>air Pressure Booster</i> (P_{air})	3 bar
Tekanan pada <i>Hydraulic Pressure Booster</i> (P_{Hvd})	27 bar
Kecepatan aktuator <i>lifting table</i> (V)	0,021 $\frac{m}{s}$
Debit aktuator pneumatik (Q)	$2,39 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$
Daya sistem pneumatik (W)	99,5 Watt

Pengujian alat dilakukan pada berbagai beban yang ditentukan. Pengujian alat dilakukan dengan maksud untuk mengetahui apakah alat dapat bekerja sesuai dengan tujuan dan fungsinya. Sasaran pengujian alat ini adalah untuk mengetahui perbandingan tekanan *input* (*air pressure*) dengan tekanan *output* (*hydraulic pressure*) pada *booster* untuk proses pangangkatan *lifting table* dengan beban yang berbeda-beda. Proses pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja alat, adapun pengujiannya yaitu dengan memberi beban yang bervariasi pada alat kemudian mengamati hasilnya dan menghitung waktu penarikan pada beban yang bervariasi. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1. Beban 54 kg yaitu berat dari *meja lifting table*.

Dari Tabel 3 hasil perhitungan teoritik dan pengujian diperoleh tekanan *input air pressure* 2,5 bar lebih kecil dibandingkan dengan tekanan *hydraulic pressure* 22 bar dan memiliki perbandingan kurang lebih 9 kali lipat maka tekanan tersebut sangat efektif dan efisien untuk penggunaan pada *lifting table*. Kecepatan aktuator hidrolik *lifting table* secara teoritik yaitu 0,021 m/s sedangkan pada saat pengujian kecepatan aktuator yaitu 0,0039 m/s pergerakan pada saat *extend* lambat karena dipengaruhi oleh berat beban, *head losses* dan gesekan baik dari struktur *lifting table* maupun silinder hidrolik dan pneumatik tersebut. Daya sistem pneumatik pada tekanan 4 bar hasil teoritik 99,5 Watt dan pengujian daya 17,48 Watt, ini disebabkan karena debit dan tekanan yang dihasilkan lebih kecil sehingga mempengaruhi daya pada sistem.



Tabel 3. Hasil pengujian

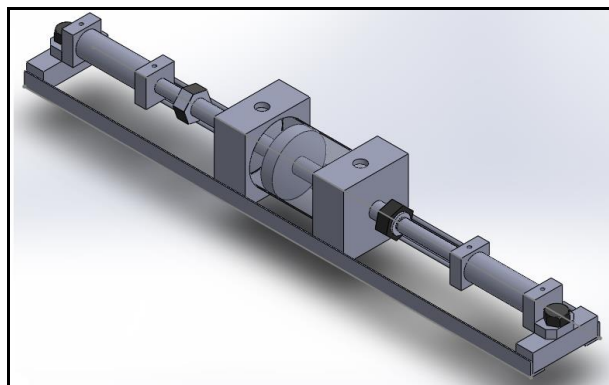
No	Tekanan Tersedia pada service unit	Beban <i>Lifting Table</i>	<i>Extend</i>	
			Tekanan Air pressure booster (P_{air})	Tekanan Hydraulic pressure booster (P_{Hvd})
1.	4 bar	54 kg	2,5 bar	22 bar
2.	5 bar	54 kg+60 kg	3,7 bar	39,5 bar
3.	6 bar	54 kg+106 kg	5,5 bar	58,5 bar

<i>Extend</i>				
Kecepatan Aktuator <i>Lifting table</i> (V)	Debit Pneumatik (Q)	Gaya Aktuator Hidrolik (F)	Daya Sistem	
$0,0039 \frac{m}{s}$	$4,37 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$	2763,2 N	17,48 Watt	
$0,0035 \frac{m}{s}$	$3,96 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$	4961,2 N	19,78 Watt	
$0,00245 \frac{m}{s}$	$2,78 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$	7347,6 N	16,69 Watt	

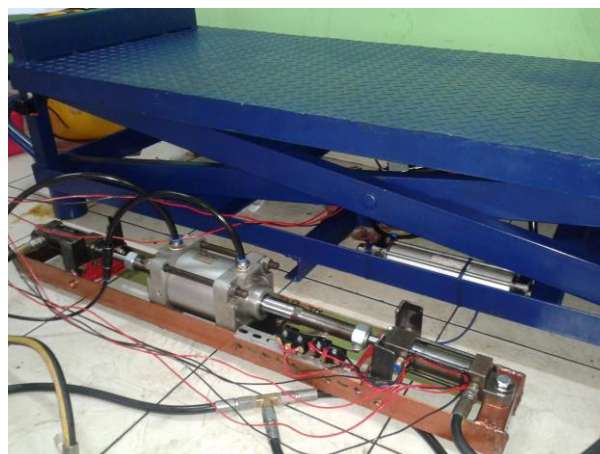
4. KESIMPULAN

Konstruksi model *Air to hydraulic pressure booster (intensifier)* merupakan konfigurasi dari 1 (satu) *pneumatic cylinder double acting with double rod* dan 2 (dua) *hydraulic cylinder double acting with single rod* dengan perbandingan luas penampang *pneumatic piston* terhadap *hydraulic piston* sebesar 16:1. Perbandingan *air pressure* terhadap *hydraulic pressure* secara teoritik 1:16 dan secara eksperimental 1:9 karena terdapat *pressure drop* pada booster akibat gesekan. Gambar 4 memperlihatkan konstruksi *Air to hydraulic pressure booster (intensifier)*.

Pada aktuator pengangkat *lifting table*, melalui perhitungan secara teoritik diperoleh tekanan pada kompresor yang dibutuhkan adalah 4 bar untuk mengangkat beban *lifting table* 250 kg dan dari hasil pengujian tekanan 4 bar dapat mengangkat beban *lifting table* 54 kg dan beban yang diterima oleh aktuator *lifting table* sudah mencapai 281,6 Kg. Beban yang diterima oleh aktuator dipengaruhi oleh posisi atau kedudukan aktuator untuk mengangkat beban, dalam rancangan struktur *lifting table* tersebut posisi aktuator hidrolik kurang optimal. Gambar 5 memperlihatkan sistem hidrolik dan pneumatik sebagai penggerak *lifting table*.



Gambar 4. *Air to hydraulic pressure booster (intensifier)*



Gambar 5. Sistem hidrolik dan pneumatic dengan *Air to hydraulic pressure booster (intensifier)* penggerak *lifting table*

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Esposito, Anthony. (2003). *Fluid Power with Applications*. Ohio: Miami University, Oxford.
- [2] Albayumi, Usep Ali. (2011). *Panduan Pelatihan Hidrolik Pneumatik Diklat PT. Dirgantara Indonesia*. Bandung.
- [3] Fox & McDonald. (1998). *Introduction to Fluid Mechanics*. Jhon Welley & Sons Inc.
- [4] Patient, Peter dkk. (1985). *Pengantar Ilmu Teknik Pneumatika*. Jakarta: Gramedia.
- [5] Thomas Krist. (1993). *Dasar – Dasar Pneumatik*. Jakarta: Erlangga.
- [6] Sistem Pneumatik. Dipetik 10 juni 2013, dari: <http://nugroho.staff.uui.ac.id/2009/02/01/apa-sih-pneumatik-itu/>
- [7] Pressure intensifier. Dipetik 29 juni 2013, dari: http://www.Internet/BOOKCHAPTER_Pressure_intensifier_circuits_Other_Technologies_content_from_Hydraulics_Pneumatics.htm
- [8] Mekanika fluida. Dipetik 16 oktober, 2013, dari: <http://ryanhutamaputera.wordpress.com/2012/04/20/mekanika-fluida/>

ANALISA KOMPONEN KRITIS PADA DESAIN *AUTOMATIC GUIDED VEHICLES* (AGV) *SUBSYSTEM LIFTING* DENGAN PEMBEBANAN STATIS MENGGUNAKAN SOFTWARE ABAQUS 6.11

Joko Setia Pribadi¹⁾, Fauzun²⁾, Muslim Mahardika³⁾

Mahasiswa S2 Program Studi Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada¹⁾

Program Studi Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada^{2,3)}

Jalan Grafika No 2, Yogyakarta 555281, Indonesia

Phone: 0274-521673, Fax: 0274-521673

E-mail :joko.setia.p@mail.ugm.ac.id¹⁾

ABSTRAK

Analisa tegangan pada desain *Material Handling Equipment* (MHE) sangat diperlukan untuk mengidentifikasi kekuatan pengangkatan komponen dalam melakukan kerja, sehingga tidak mengalami kegagalan dalam fungsi kerjanya. Salah satu jenis MHE adalah *Automatic Guided Vehicle* (AGV). komponen pada AGV akan mengalami pembebanan yang bervariasi dan terus berulang seiring dengan bongkar muat barang. Subsystem lifting adalah bagian yang akan mengangkat beban secara langsung, kondisi naik, turun dan berputar akan berakibat terjadinya konsentrasi tegangan pada komponen-komponen subsystem lifting. AGV pada penelitian ini didesain dengan dimensi 1,47m×0,82m dan tinggi dari permukaan roda bawah sampai ujung lifting atas 1,52m, mampu untuk mengangkat beban maksimal 100 kg dengan ketinggian pengangkatan maksimum 0,57 meter. Kontruksi lifting menggunakan material baja karbon ASTM A36 juga terpasang komponen linear guide, ball screw dan bearing yang menggunakan material SUJ2 atau ASTM E52100. Penelitian ini bertujuan menganalisa subsystem lifting desain AGV terhadap beban statis guna mengetahui besarnya, tegangan, von mises, regangan (strain) untuk mengetahui komponen kritis dari desain tersebut apakah beban yang diterima oleh AGV dapat dikategorikan masih dalam batas aman. Metode elemen hingga menggunakan software Abaqus digunakan untuk menganalisa besarnya tegangan dan regangan pada subsystem lifting terhadap beban statis tersebut. Analisa dilakukan pada kondisi pengangkatan beban maksimal pada ketinggian minimal, ditengah dan maksimal. Setelah dilakukan analisa menggunakan software abaqus 6.11 pada saat lifting mengangkat beban pada ketinggian 30mm, 285mm dan 570mm didapatkan hasil dari 24 komponen penyusun subsystem lifting, komponen yang mengalami tegangan maksimal melebihi tegangan yiel material adalah komponen carriage dan meja penyangga yaitu mencapai 850,50 Mpa dan 486.10 Mpa. Sedangkan komponen yang melebihi tegangan ijin material adalah poros carriage, mounting linear blok atas kanan dan kiri, pemegang fork kanan dan kiri serta mast.

Kata kunci: metode elemen hingga, abaqus, lifting AGV, MHE.

1. PENDAHULUAN

Mobil robot atau *Automatic Guided Vehicle* AGV banyak sekali ragamnya, tergantung dari jenis pekerjaan apa yang akan dilakukan terutama dalam dunia industri. Salah satu jenis *Material Handling Equipment* (MHE) seperti conveyor, crane dan kerekan, elevator dan lift, sistem penyimpanan dan pengambilan otomatis dan sebagainya yang berfokus pada proses mentransfer sesuatu barang dari satu tempat ke tempat lain terutama di sektor industri atau industri gudang [1].

Komponen-komponen pada *Automatic Guided Vehicle* (AGV) akan mengalami pembebanan yang bervariasi dan terus berulang seiring dengan bongkar muat barang, tak terkecuali komponen pada subsystem lifting. Oleh karena itu perlu dilakukan evaluasi kekuatan pada subsystem tersebut untuk mengetahui kemampuan dan keamanan komponen dalam menjalankan fungsinya apakah beban yang diterima oleh AGV dapat dikategorikan masih dalam batas aman sehingga dapat diperoleh kepastian dalam pengoperasian maupun tindakan preventif dalam bentuk perbaikan desain.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah menganalisa komponen kritis pada subsystem lifting desain *Automatic Guided Vehicle* (AGV) terhadap beban statis menggunakan metode finite element dengan software abaqus 6.11. Spesifikasi desain AGV adalah sebagai berikut, dimensi 1,47 m × 0,82 m dan tinggi dari permukaan roda bawah

sampai ujung lifting atas 1,52 m, mampu untuk mengangkat beban maksimal 100 kg dengan ketinggian pengangkatan maksimum 0,57 meter

Analisa elemen hingga merupakan suatu teknik numerik. Dalam metode elemen hingga, semua kompleksitas dari sebuah problem tetap dipertahankan sebagaimana adanya, seperti variasi bentuk, syarat batas, dan beban. Solusi penyelesain yang dicapai dari metode elemen hingga merupakan pendekatan dari solusi eksaknya [2].

Metode *finite element* digunakan untuk menyelidiki efek dari perubahan konfigurasi, struktur dan dimensi anggota *sub-frame* pada karakteristik kekakuan komponen suspensi yang kompleks bagian rangka dasar kendaraan. Analisa kekakuan elemen hingga dilakukan dengan menggunakan software ABAQUS. Bahan yang digunakan untuk analisis finite elemen adalah baja dengan *modulus Young* 206,8 Gpa dan *poisson ratio* 0,29 [3].

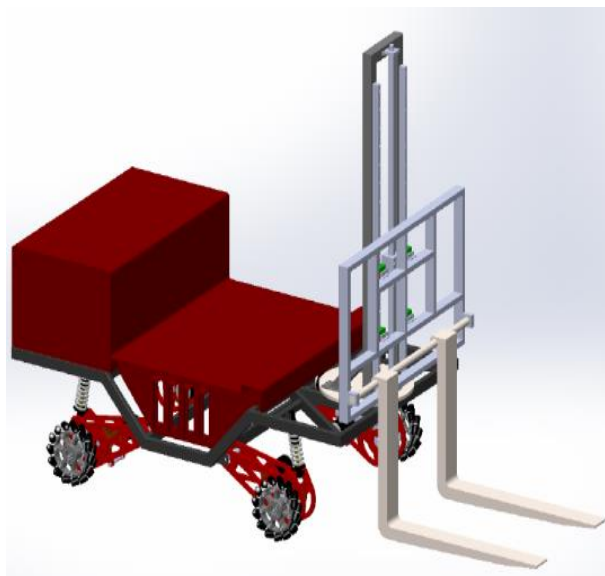
Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi komponen-komponen kritis pada desain, sehingga menghindari terjadinya faktor kegagalan, mampu memberikan hasil yang maksimal dalam pembuatan prototype AGV, memberikan kontribusi pada pengembangan dan penguasaan di bidang teknologi manufaktur khususnya pada pengembangan sistem otomasi *material handling*.

2. METODOLOGI

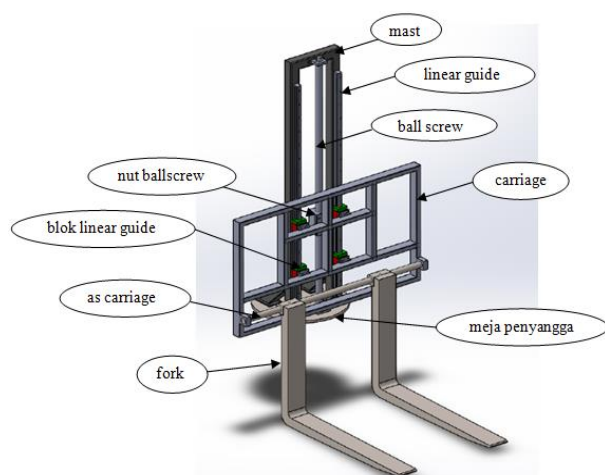
Pembuatan desain *Automatic Guided Vehicle* (AGV)

Keberhasilan dalam pembuatan AGV sebagai alat yang bisa membantu pekerjaan dengan dikendalikan secara otomatis tidak terlepas dari faktor desain, pemilihan material, proses pembuatan (manufaktur), dan sistem kendali. AGV dalam penelitian ini akan digunakan untuk mengantarkan barang dari satu lokasi ke lokasi lain (*point to point*) dalam sistem tertutup (pabrik/instansi). AGV didesain dengan menggunakan roda *mecanum* dan kontrol kamera sehingga tanpa jalur khusus pada lantai.

Pembuatan *geometri* AGV dalam penelitian ini menggunakan *software* CAD solidwork. Kemudian *geometri* disimpan dalam *file* parasolid untuk di *import* dalam *software* Abaqus 6.11. Model merupakan *assembly* dari *part-part* subsistem *lifting* dan ada beberapa bagian yang disederhanakan untuk memudahkan proses simulasi seperti *ballscrew*, *nut ballscrew* dan *bearing*. Masing-masing *part* kemudian diberi titik referensi dan dibuat *surface* pada bagian-bagian tertentu yang akan mengalami kontak selama proses simulasi.



Gambar 1. Desain *Automatic Guided Vehicle* (AGV)

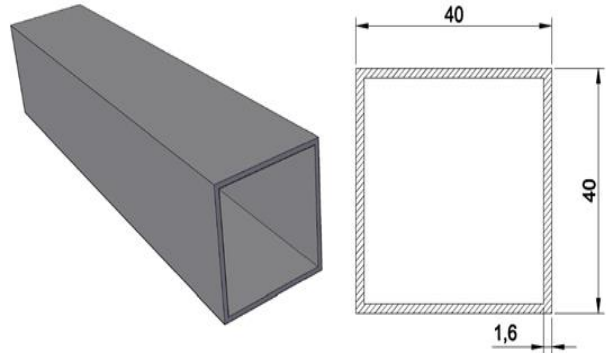


Gambar 2. Desain *lifting* (AGV)

Material

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Struktur *lifting* dibuat dari material *carbon Steel* ASTM A36 setara dengan ST 37 dengan bentuk profil kotak berongga ukuran 40 mm × 40 mm × 1,6 mm yang dilas. Material ini digunakan untuk bagian, *mast*, *carriage*, sedangkan untuk *fork*, poros *carriage*, *mounting linear block*, rumah *bearing* dan meja penyangga bentuk profil solid yang dilakukan pemesinan.



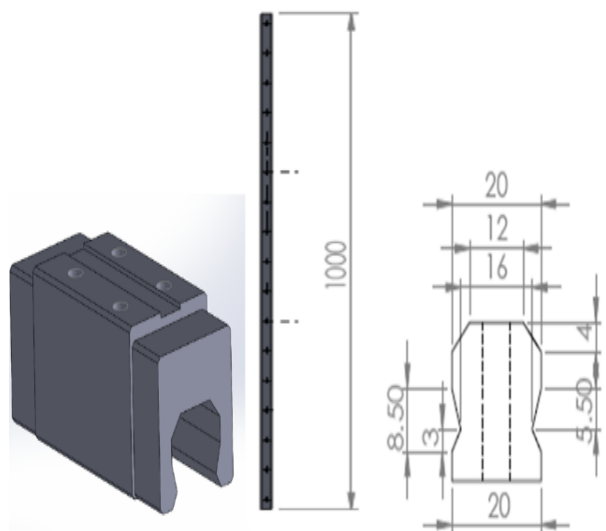
Gambar 3. Profil material *lifting*

Spesifikasi dari material ASTM A36 adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi material carbon steel ASTM A36

No	Properties	Value
1	Tegangan luluh (σ_y)	250 MPa
2	Tegangan ultimate (σ_u)	400 - 550 MPa
3	Modulus young (E)	200 GPa
4	Poisson ratio (ν)	0.260
5	Density	7,80 kg/m ³

- Bahan dari *Linear Guide* dan *Ball Screw* adalah *High Carbon Steel* SUJ2 standar JIS setara dengan ASTM E52100.



Gambar 4. Material linear guide dan ball screw

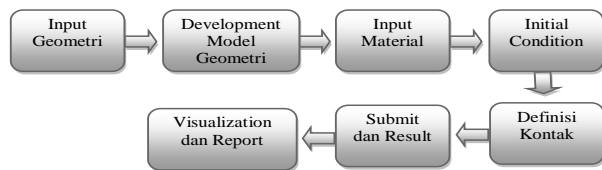
Dengan spesifikasi material sebagai berikut:

Tabel 2. Spesifikasi material carbon steel SUJ2 atau ASTM E52100

No	Properties	Value
1	Tegangan luluh (σ_y)	1034 Mpa
2	Tegangan ultimate (σ_u)	1158 Mpa
3	Modulus young (E)	207 GPa
4	Poisson ratio (ν)	0,27 - 0.30
6	Density	7.7 – 8.03 kg/m ³

Prosedur simulasi pemodelan Abaqus

Analisa metode elemen hingga menggunakan *software* Abaqus dilakukan dengan langkah-langkah seperti pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5. Metodologi simulasi Finite Element Abaqus

Pemberian beban

Desain AGV di rancang mampu mengangkat beban maksimal seberat 100kg dengan ketinggian maksimal 0,57 meter. Faktor keamanan (S_f) = 2.

$$S_f = \frac{\sigma_y}{\sigma} \quad (1)$$

dimana:

S_f = faktor keamanan

σ_y = tegangan luluh

σ = tegangan ijin

$$P = \frac{W}{A} \quad (2)$$

dimana:

P = gaya yang bekerja

W = beban total

A = luar permukaan

Beban total = $W \times 10 \text{ m/s} \times S_f$

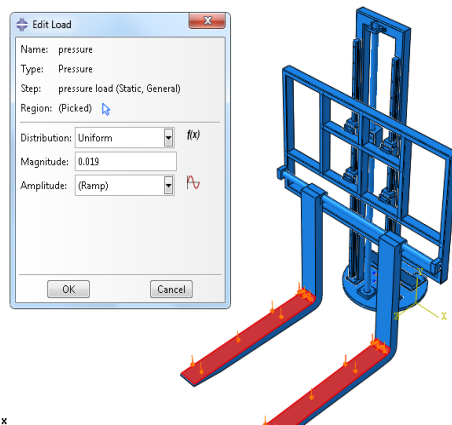
$$= 100 \times 10 \times 2 = 2000 \text{ N}$$

Area penerima beban adalah permukaan dua buah *fork* dengan luas penampang per-*fork* 655 mm × 80 mm:

$$\begin{aligned} \text{Total luas penampang} &= 655 \times 80 \times 2 \\ &= 104800 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Jadi tekanan (P) per mm² sebesar:

$$\frac{2000 \text{ N}}{104800 \text{ mm}^2} = 0,019 \text{ N/mm}^2$$



Gambar 6. Pembebanan merata pada komponen *fork*

Beban tersebut akan dianalisa pada variasi ketinggian *lifting* 30 mm, 285 mm, dan saat ketinggian maksimal *lifting* yaitu 570 mm.

Komponen subsistem *lifting*

Subsistem *lifting* terdiri dari 24 komponen penyusun (*bill of materials*) seperti tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Komponen penyusun subsistem *lifting* (*bill of materials*)

No	komponen	Pengadaan	material
1	<i>fork</i> (R)	buat	ASTM A36
2	<i>fork</i> (L)	buat	ASTM A36
3	Pemegang Fork (R)	buat	ASTM A36
4	Pemegang Fork (L)	buat	ASTM A36
5	Poros carriage	buat	ASTM A36
6	carriage	buat	ASTM A36
7	mounting linear block (R) atas	buat	ASTM A36
8	mounting linear block (L) atas	buat	ASTM A36
9	mounting linear block (R) bawah	buat	ASTM A36
10	mounting linear block (L) bawah	buat	ASTM A36
11	block linear guide (R) atas	beli	SUJ2
12	block linear guide (L) atas	beli	SUJ2
13	block linear guide (R) bawah	beli	SUJ2
14	block linear guide (L) bawah	beli	SUJ2
15	nut ballscrew	beli	SUJ2
16	ballscrew	beli	SUJ2
17	linear guide (R)	beli	SUJ2
18	linear guide (L)	beli	SUJ2
19	Mast (tiang lifting)	buat	ASTM A36
20	rumah bearing atas	buat	ASTM A36
21	rumah bearing bawah	buat	ASTM A36
22	bearing atas	beli	SUJ2
23	bearing bawah	beli	SUJ2
24	meja penyangga	buat	ASTM A36

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tegangan (*stress*)

Saat mengangkat beban maka masing-masing komponen akan menderita tegangan. *Fork* sebagai komponen yang langsung menerima beban mendapatkan beban tekan sebesar 0,019 N/mm², yang akan terdistribusi pada tiap komponen subsistem *lifting*. Berdasarkan hasil simulasi dengan *software* Abaqus yang dilakukan pada 3 ketinggian yang berbeda, didapatkan hasil tegangan, tegangan von mises dan regangan seperti Tabel 4.



Tabel 4. Tegangan dan regangan tiap komponen

No	Komponen	Teg. Maksimal			teg. Von misses			regangan		
		h = 30mm	h = 285mm	h = 570mm	h = 30mm	h = 285mm	h = 570mm	h = 30mm	h = 285mm	h = 570mm
1	Fork (R)	20.19	20.19	20.19	21.93	21.93	21.93	1.01E-04	1.01E-04	1.01E-04
2	Fork (L)	20.19	20.19	20.19	22.06	22.05	22.05	9.43E-08	9.43E-05	9.43E-05
3	Pemegang Fork (R)	177.6	177.59	177.60	202.6	202.73	202.8	8.72E-04	8.77E-06	8.73E-04
4	Pemegang Fork (L)	170.1	170.07	170.10	195.7	195.68	195.7	8.37E-04	8.37E-06	8.37E-04
5	Poros carriage	224.00	223.85	223.80	290	289.89	289.9	1.16E+00	1.16E-03	1.17E+00
6	carriage	848.20	849.65	850.50	947.2	945.44	944.5	4.31E+00	4.31E-03	4.31E+00
7	mounting linear blok (R) atas	220.20	236.75	258.80	164.3	176.09	192.5	9.96E-04	9.96E-06	1.09E-07
8	mounting linear blok (L) atas	198.60	210.89	231.40	145.3	153.83	168	8.11E-04	8.58E-06	9.40E-04
9	mounting linear blok (R) bawah	83.37	56.33	50.25	283.2	251.95	242.5	6.95E-04	6.27E-04	6.07E-04
10	mounting linear blok (L) bawah	43.31	40.54	40.04	300.9	269.73	259.7	7.27E-04	7.27E-04	7.04E-04
11	Blok linear guide (R) atas	44.6	49.58	55.84	38.03	42.6	47.51	1.82E-04	2.03E-04	2.27E-04
12	Blok linear guide (L) atas	46.47	50.92	57.01	45.64	50.11	56.18	2.47E-04	2.48E-04	2.77E-04
13	Blok linear guide (R) bawah	44.15	31.59	28.16	71.75	61.69	58.54	1.86E-04	1.42E-06	1.36E-04
14	Blok linear guide (L) bawah	30.61	22.57	31.66	64.07	58.84	57.08	1.63E-04	1.43E-06	1.37E-04
15	Nut ballscrew	18.48	17.66	19.47	22.48	23.71	23.68	8.28E-05	8.51E-05	9.28E-05
16	Ballscrew	30.24	25.37	20.65	80.32	49.05	38.45	1.76E-04	1.19E-04	1.06E-04
17	Linear guide (R)	47.00	48.60	42.30	93.62	110.27	120.00	2.64E-04	2.25E-06	2.08E-04
18	Linear guide (L)	64.30	57.01	51.43	109.4	109.88	115.00	2.79E-04	2.44E-06	2.19E-04
19	Mast (tiang lifting)	170.4	156.38	153.60	266.5	264.63	256.00	8.98E-04	9.65E-04	9.39E-04
20	Rumah bearing atas	5.46E-06	5.45E-09	8.39E-08	4.58E-08	5.47E-09	8.09E-08	2.48E-14	2.72E-14	4.11E-13
21	Rumah bearing bawah	52.81	47.39	41.59	41.37	37.04	33.25	2.26E-04	2.02E-04	1.78E-04
22	bearing atas	3.75E-06	4.35E-09	4.18E-07	4.05E-06	4.93E-09	3.85E-07	1.82E-14	2.24E-05	1.92E-09
23	bearing bawah	84.42	53.98	44.80	118.2	77.51	64.62	3.53E-04	2.22E-04	1.75E-04
24	Meja penyangga	479.6	484.67	486.10	354.3	358.05	359.1	2.01E+00	2.03E-03	2.04E+00

Hasil simulasi, komponen yang mengalami konsentrasi tegangan maksimal terbesar pada ketinggian yang berbeda-beda adalah sama yaitu komponen seperti dalam Tabel 5.

Tabel 5. Komponen yang mengalami tegangan maksimal tinggi

No	komponen	Tegangan maks (Mpa)			material
		30mm	285mm	270mm	
1	carriage	848,20	849,65	850,50	ASTM A36
2	Meja penyangga	479,60	484,67	486,10	ASTM A36
3	Poros carriage	224,00	223,85	223,80	ASTM A36
4	mounting linear blok (R) atas	220,20	236,75	258,80	ASTM A36
5	mounting linear blok (L) atas	198,60	210,89	231,40	ASTM A36
6	Pemegang Fork (R)	177,60	177,59	177,60	ASTM A36
7	Pemegang Fork (L)	170,10	170,07	170,10	ASTM A36
8	Mast (tiang lifting)	170,40	156,38	153,60	ASTM A36

Gambar 7 menunjukkan grafik tegangan maksimal dan tegangan von misses yang terjadi pada setiap komponen subsistem *lifting*

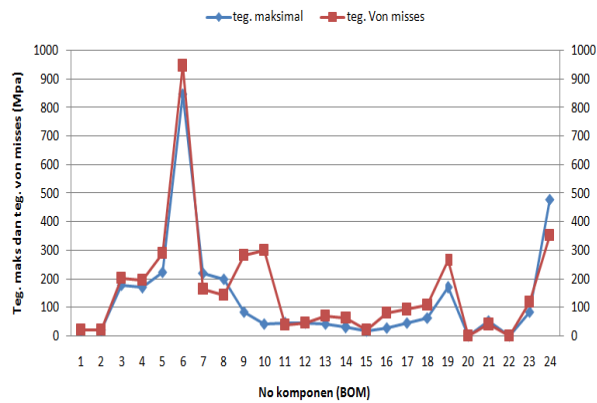
Untuk baja ASTM A36 tegangan yiel sebesar 250 Mpa, jika faktor keamanan diambil 2 maka tegangan ijin adalah sebesar:

$$2 = \frac{250}{\sigma} \rightarrow \sigma = 125 \text{ Mpa}$$

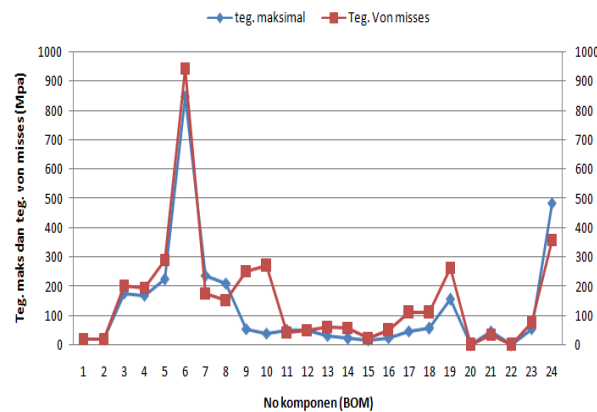
Komponen carriage dan meja penyangga terjadi tegangan maksimal yang cukup besar melebihi dari tegangan yiel material. Hasil analisa visual mesh dari Abqus seperti Gambar 8.

Warna merah menunjukkan terjadinya konsentrasi tegangan terbesar pada daerah tersebut, lalu turun ke warna kuning sampe dengan warna biru yang menandakan daerah tegangan kecil atau aman. Pada komponen *carriage* terjadi tegangan maksimal 850,50 Mpa dan meja peyangga 486,10 Mpa.

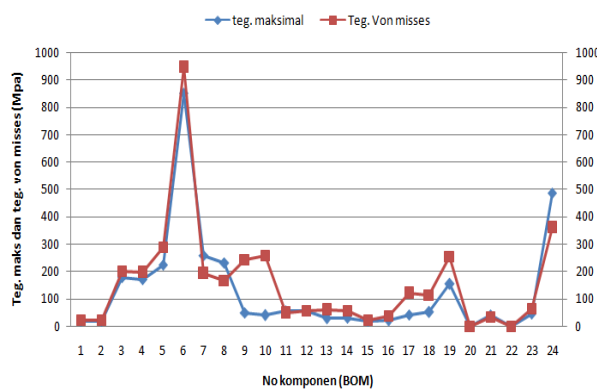
Suatu diskontinuitas dalam benda misalnya lubang atau takik, akan mengakibatkan distribusi tegangan tidak merata disekitar diskontinuitas tersebut. Pada beberapa daerah didekat diskontinuitas, tegangan akan lebih tinggi daripada tegangan rata-rata yang jauh letaknya dari diskontinuitas [4]. Sedangkan pada komponen poros *carriage*, *mounting linear block*, pemegang *fork* dan *mast* tegangan maksimal masih berada di bawah tegangan yiel material tapi sudah melebihi tegangan ijin seperti Gambar 9.



(a)

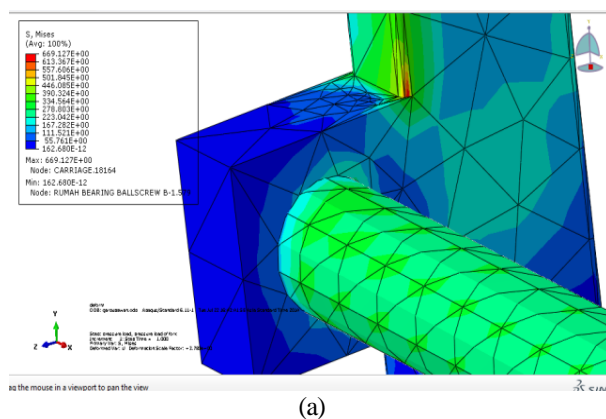


(b)

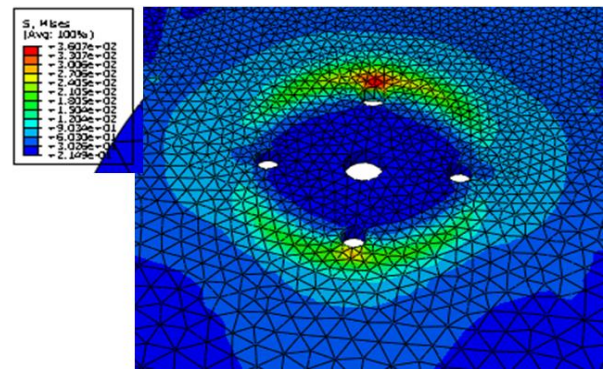


(c)

Gambar 7. Grafik perbandingan teg. masimum dan teg. Von misses komponen (a) ketinggian 30 mm (b) ketinggian 285 mm (c) ketinggian 570 mm

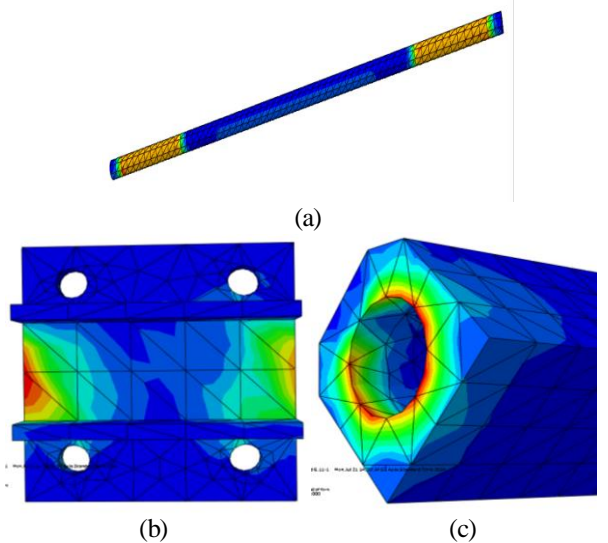


(a)



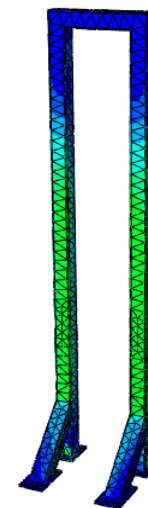
(b)

Gambar 8. Konsentrasi tegangan (a) komponen carriage (b) komponen meja penyangga



(b)

(c)

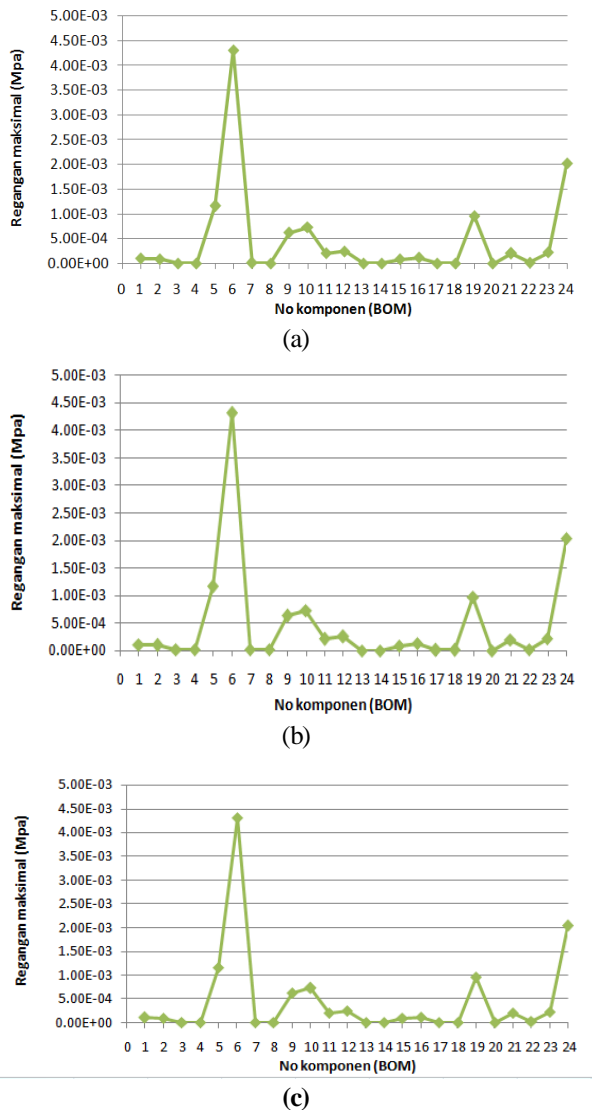


(d)

Gambar 9. Konsentrasi tegangan(a) poros carriage (b) mounting linear block (c) pemegang fork (d) mast

Regangan (*strain*)

Setiap penambahan tegangan akan diikuti dengan penambahan *regangan*. Gambar 10 menunjukkan regangan dari setiap komponen penyusun subsistem lifting. Regangan terbesar juga terjadi pada komponen *carriage* dan meja penyangga.



Gambar 10. Grafik regangan maksimal komponen (a) ketinggian 30 mm (b) ketinggian 285 mm (c) ketinggian 570 mm

5. KESIMPULAN

Dari analisa komponen kritis pada desain *automatic guided vehicles subsystem lifting* dengan pembebanan statis pada tiga ketinggian yang berbeda menggunakan software abaqus 6.11 dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Komponen *carriage*, meja peyangga mendapatkan tegangan maksimal yang cukup besar yaitu 850,50 Mpa dan meja peyangga 486,10 Mpa.
2. Besarnya tegangan maksimal pada komponen poros *carriage*, *mounting linear* blok atas kanan dan kiri, pemegang *fork* kanan dan kiri, dan *mast* berada dibawah nilai tegangan luluh dari material ASTM A36 yaitu 250 Mpa tetapi sudah melewati nilai tegangan ijin dengan faktor keamanan 2 yaitu sebesar 125 Mpa.
3. Komponen dengan nilai tegangan maksimal yang melebihi tegangan yiel dan tegangan ijin tersebut merupakan komponen kritis yang perlu dilakukan desain ulang agar nilai tegangan maksimum bisa diturunkan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yaghoubi, S., Khalili, S., Nezhad, N.M., Kazemi, M.R., dan Sakhaifar, M., 2012, *Designing and Methodology of Automated Guided Vehicle Robots/Self Guided Vehicles Systems, Future Trends*, IJRRAS Vol. 13.
- [2] Bhivakatti, S.S., 2005, *Finite element Analysis*, New Age International Publishers, New Delhi.
- [3] Long, H., Fanourakis, A., dan Oliver, P., 2008, *Case Study in Design: Generation of Design Knowledge for Vehicle Sub-frames Based on Finite Element Simulation*. Springer.
- [4] Nusyirwan, 2010, *Analisis Untuk Menentukan Faktor Konsentrasi Tegangan Dengan Eksperimental Dan Metode Elemen Hingga*, Teknik No. 33 Vol.1 Thn. XVII.

KAJIAN AWAL PENGARUH CRUSH INITIATORS TERHADAP PENYERAPAN ENERGI DAN GAYA TUMBUKAN PUNCAK PADA TABUNG BUJUR SANGKAR BERDINDING TIPIS

J. Istiyanto¹⁾, S. Hakiman¹⁾, D.A. Sumarsono¹⁾, G. Kiswanto¹⁾, A.S. Baskoro¹⁾, S. Supriadi¹⁾

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Indonesia¹⁾

Kampus Baru UI Depok 16424 Indonesia¹⁾

Phone: +62-21-7270032, Fax: +62-21-7270033¹⁾

E-mail : josist@eng.ui.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan struktur berdinding tipis sudah terbukti kemampuannya sebagai peredam energi dalam berbagai desain dan konstruksi salah satunya yang diaplikasikan pada front rail kendaraan bermotor. Pada saat terjadi kecelakaan khususnya kecelakaan frontal komponen front rail diharapkan dapat menyerap energi tumbukan melalui proses deformasi (*progressive buckling*) sehingga mengurangi kerusakan pada kompartemen penumpang dan memberikan efek perlambatan yang berada pada tingkat aman terhadap penumpang. Untuk meningkatkan penyerapan energi dan menurunkan gaya tumbukan awal digunakan crush initiators berbentuk dua buah lubang sejajar dengan diameter lubang 6,5 mm pada jarak 20 mm dari permukaan tabung di setiap sisinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh crush initiators pada tabung bujursangkar berdinding tipis produksi dalam negeri yang diaplikasikan pada front rail Mobil Listrik Universitas Indonesia untuk meningkatkan penyerapan energi dan mengurangi gaya tumbukan puncak pada saat diberikan beban aksial secara kuasi statik. Spesimen yang digunakan adalah tabung bujur sangkar berdinding tipis dengan lebar 36,55 mm dan tebal 0,85 mm serta panjang tabung 200 mm. Analisa dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen antara tabung bujursangkar berdinding tipis tanpa dilengkapi crush initiators dengan tabung bujur sangkar yang dilengkapi crush initiators. Hasil eksperimen menunjukkan adanya crush initiators pada tabung bujursangkar berdinding tipis memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap penurunan gaya tumbukan awal dan peningkatan penyerapan energi tumbukan.

Kata kunci: crush initiators, gaya tumbukan puncak, penyerapan energi.

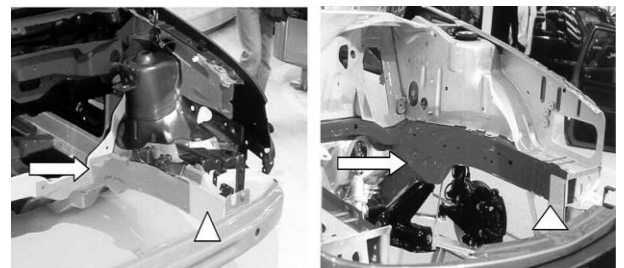
1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun belakangan Universitas Indonesia telah melakukan berbagai penelitian terkait pengembangan mobil listrik nasional berbasis teknologi karya anak bangsa dan mengedepankan penggunaan komponen dalam negeri untuk menjawab isu menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan emisi kendaraan bermotor. Pengembangan konsep mobil listrik ini tidak semata-mata untuk membuat mobil ramah lingkungan dan hemat energi, namun tetap mengedepankan kualitas produk dan standar keamanan bagi pengguna.

Front rail adalah komponen utama pada sistem keamanan pasif pada kendaraan yang mampu menyerap sekitar 40% dari energi kinetik saat terjadi kecelakaan terutama kecelakaan dari arah frontal [1]. Front rail columns tidak boleh memiliki konstruksi terlalu kuat karena akan menghasilkan gaya tumbukan (*peak crush load*) yang tinggi pada saat awal terjadi tumbukan hal ini sangat berbahaya bagi keamanan penumpang, penumpang bisa terlempar ke depan pada saat terjadi tabrakan. Selain itu konstruksi dari front rail ini tidak boleh terlalu lemah karena semakin lemah konstruksi dari front rail maka energi yang dapat diserap juga semakin berkurang. Oleh karena itu untuk mencapai desain front rail yang mempunyai daya serap energi yang tinggi dengan gaya tumbukan puncak yang rendah, maka hal ini dapat di hasilkan dengan membuat crush initiators pada front rail columns.

Front rail columns biasanya terbuat dari struktur berdinding tipis. Struktur berdinding tipis sudah terbukti kemampuannya sebagai peredam energi dalam berbagai desain dan

konstruksi salah satunya yang diaplikasikan pada front rail kendaraan bermotor. Sudah banyak penelitian yang mengkaji karakteristik lipatan, penyerapan energi, energi serapan rata-rata dari struktur berdinding tipis ini diantaranya karya perintis dari Alexander (Alexander 1960) pada tabung silinder dan penelitian dari Wierzbicki, Abramowicz dan Jones (Wierzbicki 1983, Abramowicz 1989, Jones 1983) pada tabung multi-sudut [2].



Gambar 1. Struktur penyerapan energi pada front end kendaraan. (simbol segitiga menunjukkan crash box dengan crush initiators) [3]

Krauss dan Laanen [4] menganalisa pengaruh tiga bentuk crush initiators pada tabung berdinding tipis (sebuah transverse bead pada kedua sisi dari tabung, diamond notch pada ke empat sudut dari tabung dan circular hole pada ke empat sudut dari tabung) terhadap gaya tumbukan puncak dan gaya tumbukan rata-rata saat diberikan beban aksial. Cho *et al* [5] melakukan optimasi desain frame depan kendaraan

dengan menggunakan hole type dan dent-type crush initiators saat diberikan beban secara aksial.

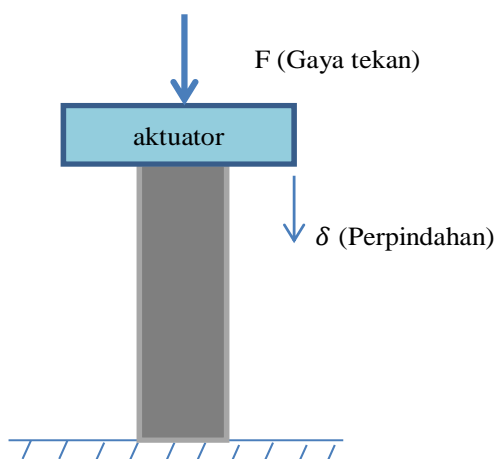
Eren *et al* [6] melakukan analisa komputasi eksplisit non linear desain baru crush initiators tipe rib pada tabung bujur sangkar ber dinding tipis dengan bantuan program ANSYS/LS-DYNA. Cheng *et al* [7] melakukan eksperimen terhadap tabung aluminium AA6061-T6 dengan through-hole *discontinuities* untuk mendapatkan karakteristik tumbukan dan kapasitas penyerapan energi saat tabung diberikan beban aksial secara kuasi-statik.

Mengingat pentingnya peran dari front rail dalam meningkatkan faktor keamanan dalam kendaraan terutama saat terjadi kecelakaan frontal maka penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh crush initiators pada tabung bujur sangkar ber dinding tipis produksi dalam negeri yang diaplikasikan pada front rail Mobil Listrik Universitas Indonesia untuk meningkatkan penyerapan energi dan mengurangi gaya tumbukan puncak pada saat terjadi kecelakaan. Analisa dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen antara tabung bujur sangkar ber dinding tipis dengan crush initiators dengan tabung bujur sangkar tanpa crush initiator.

2. METODOLOGI

Respon dari struktur ber dinding tipis akan sangat bergantung pada kondisi pembebanan. Dalam kondisi pembebanan kuasi-statik, kondisi efek inersia (aksial, lateral dan radial) tidak memainkan peranan penting dalam respon perilaku dari struktur karena beban yang diterapkan cukup lambat. Akan tetapi jika struktur ber dinding tipis dalam kondisi pembebanan dinamis, efek inersia dan efek strain rate sangat mempengaruhi dari struktur. Efek inersia struktural menjadi lebih signifikan dengan peningkatan kecepatan tumbukan, massa tumbukan dan efek strain rate dari material [8].

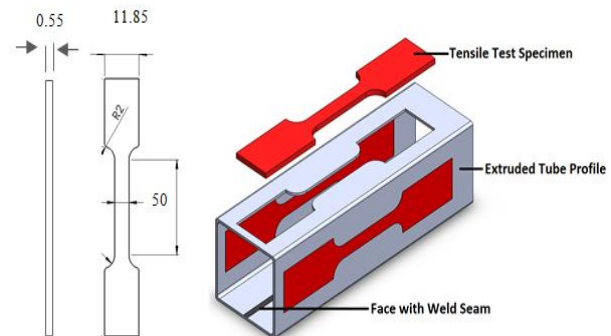
Untuk langkah awal pengujian dilakukan secara kuasi-statik dengan memberikan gaya tekan (F) pada permukaan atas dari spesimen dengan mengontrol perpindahan dari aktuator sampai mencapai 100 mm dengan kecepatan aktuator ($v=30$ mm/min) sedangkan dibagian bawah spesimen dibuat dudukan tetap seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema pengujian kuasi-statik

Uji Komposisi Kimia dan Uji Tarik

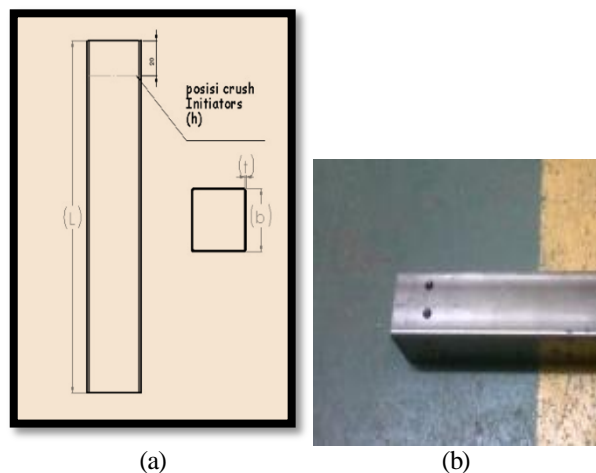
Uji komposisi kimia dan uji tarik dilakukan untuk mengetahui secara tepat sifat dari material yang digunakan dalam uji tumbukan. Uji material ini dilakukan di laboratorium uji Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Untuk uji tarik menggunakan mesin servopulser shimadzu kapasitas 20 ton dengan standar pengujian mengikuti standar pengujian dari ASTM E8/E8M [9]. Untuk uji komposisi kimia menggunakan alat *Optical Emission Spectrometer* dengan pengujian sesuai standar ASTM A751 dan ASTM E415 [10].



Gambar 3. Spesimen uji tarik dan bagian yang di uji [11]

Spesimen

Dalam pengujian ini menggunakan baja struktur ber dinding tipis berbentuk tabung bujur sangkar produksi dalam negeri dengan sifat material yang dilihat pada bagian (**Hasil Uji Komposisi Kimia dan Uji Tarik**). Spesimen yang digunakan terdiri dari dua variasi yaitu tabung bujur sangkar ber dinding tipis tanpa crush initiators dan tabung bujur sangkar yang dilengkapi dengan crush initiators berupa dua buah lubang dengan diameter 6,5 mm pada jarak 20 mm dari permukaan atas tabung di masing-masing sisi. Geometri yang digunakan merupakan penyederhanaan dari bentuk aslinya dengan ukuran diperkecil, dengan lebar (b) 36,55 mm, tebal (t) 0,85 mm dan panjang (L) 200 mm. Untuk lebih rinci dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. (a) Posisi crush initiators (b) bentuk crush initiators

Metoda Pengujian Kuasi-Statik dengan Pembebanan Aksial

Pengujian ini dilakukan di laboratorium uji Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia dengan menggunakan mesin compressive GOTECH AI-7000 LA 10 dengan gaya maksimum 100 kN dan sampling rate 200 sample/s. Spesimen di letakkan pada titik sentral dari aktuator mesin. Aktuator akan bergerak secara vertikal menekan spesimen memberikan gaya aksial terhadap spesimen dengan kecepatan aktuator 30 mm/min. Bagian bawah spesimen diberikan dudukan tetap agar spesimen tidak bergerak pada saat diberikan beban. Langkah aktuator diatur untuk memberikan gaya sejauh 100 mm dari permukaan atas spesimen (gambar 6).

Peralatan pengujian ini juga dilengkapi dengan personal computer yang sudah dilengkapi dengan software akuisisi data untuk merekam pengukuran dari gaya dan juga *transducer* untuk mengukur langkah dari aktuator sehingga dapat menghasilkan kurva gaya (F) terhadap deformasi (δ) yang halus. Semua eksperimen ini dilakukan pada temperatur ruangan.



Gambar 6. Pengujian kuasi-statik

Parameter Analisa

Parameter yang digunakan dalam mengevaluasi sifat tumbukan dari setiap spesimen dalam pengujian sesuai dengan parameter yang dipaparkan oleh cheng *et al* [7], antara lain.

Total Penyerapan Energi

Total energi yang diserap melalui tekanan aksial dihitung berdasarkan kerja yang dilakukan gaya tumbukan seperti yang dijelaskan dalam pers. (1)

$$E_{absorbed} = \int P d\delta \quad (1)$$

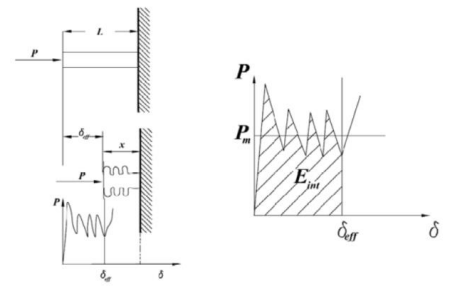
Dimana P adalah gaya tumbukan dan δ adalah perubahan jarak dari aktuator pada arah aksial. Selama pengujian, data dari *load cell* dan *transducer* digunakan untuk menghasilkan kurva gaya tumbukan vs perubahan aktuator. Untuk jumlah data yang terbatas integrasi pada pers (1) dapat digantikan dengan perhitungan pada pers (2):

$$E_{absorbed} = \sum_{i=2}^{N-1} P_i \left(\frac{\delta_{i+1} - \delta_{i-1}}{2} \right) \quad (2)$$

Terdapat banyak pilihan yang berbeda terkait dengan skema integrasi numerik yang digunakan dalam penjabaran pers (1). Skema yang digunakan dalam pers (2) merupakan pendekatan pada aturan persegi panjang. Skema lain yang dapat diterapkan adalah aturan trapezoidal atau aturan simpson.

Gaya Tumbukan Puncak

Gaya tumbukan puncak (P_{max}) merupakan gaya maksimum yang terjadi pada struktur saat diberikan tekanan aksial. Nilai dari gaya ini didapatkan dari pengujian eksperimen.



Gambar 9. Respon tabung bujur sangkar terhadap tekanan aksial [12]

Gaya Tumbukan Rata-Rata

Berdasarkan penyerapan energi total yang dijelaskan pada pers (2). Gaya tumbukan rata-rata dapat dihitung dari rasio energi internal terhadap jarak efektif tumbukan.

$$P_m = \frac{1}{\delta_t} \sum_{i=2}^{N-1} P_i \left(\frac{\delta_{i+1} - \delta_{i-1}}{2} \right) \quad (3)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Komposisi Kimia dan Uji Tarik

Karakteristik material didapatkan dari hasil uji komposisi kimia dan hasil uji tarik yang dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa material yang digunakan mendekati sifat material *carbon steel* dengan standar JIS ss 330 [13]. Standar JIS SS330 ini setara dengan DIN: St37-2, EN10025(93):SS330 JIS 3101, ASTM: A283C and UNI: FE360B [14]. Material ini merupakan baja rendah karbon, biasanya digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan hard bending dan las seperti panel untuk peralatan atau mobil.

Tabel 2. Hasil Uji komposisi kimia

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%	%	%	%	%	%	%
0.044	<0.005**	0.179	<0.003**	<0.003**	0.018	<0.005**
Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	Fe
%	%	%	%	%	%	%
<0.005**	0.041	0.013	<0.002**	<0.002**	<0.002**	bal

Catatan:

* Ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k=2$

** ($<$) menunjukkan nilai berada dibawah quantification limit dari alat uji

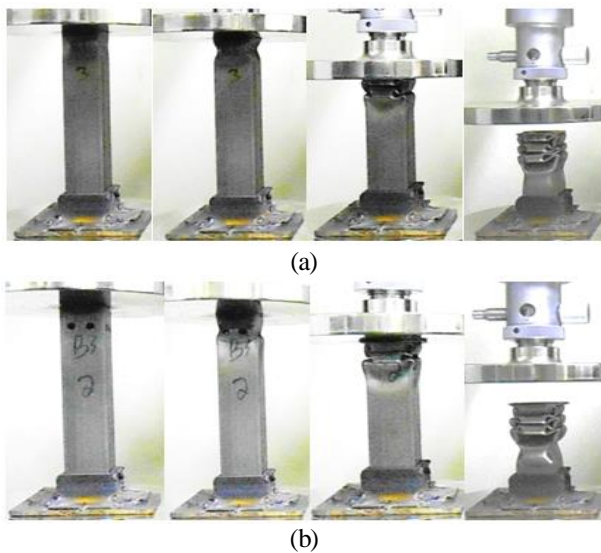
Tabel 3. Hasil Uji Tarik

(Tensile Strength)	(Yield Strength)	(Elongation)
MPa	MPa	%
353	265	34.84

Hasil Pengujian Kuasi Statik dengan Pembebanan Aksial

Mode Buckling

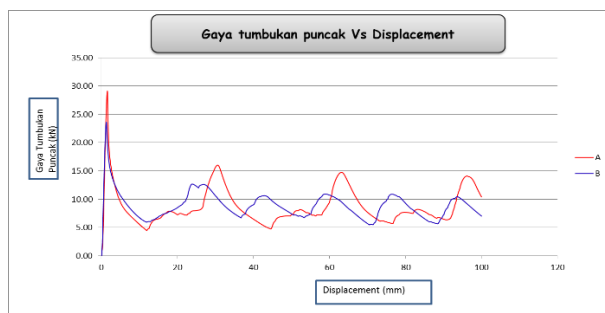
Untuk mode buckling secara umum semua spesimen yang diberikan beban aksial secara kuasi statik menunjukkan fenomena *progressive* buckling. Hal ini sesuai dengan eksperimen yang dilakukan [14] pada tabung bujur sangkar dengan material DP 800, dimana hasilnya menunjukkan semua spesimen jika diberikan beban aksial secara kuasi-statik akan menunjukkan fenomena *progressive folding*. Pengaruh crush initiator pada mode buckling terdapat pada lokasi awal terjadinya lipatan. Untuk lebih rinci dapat dilihat pada Gambar 10.



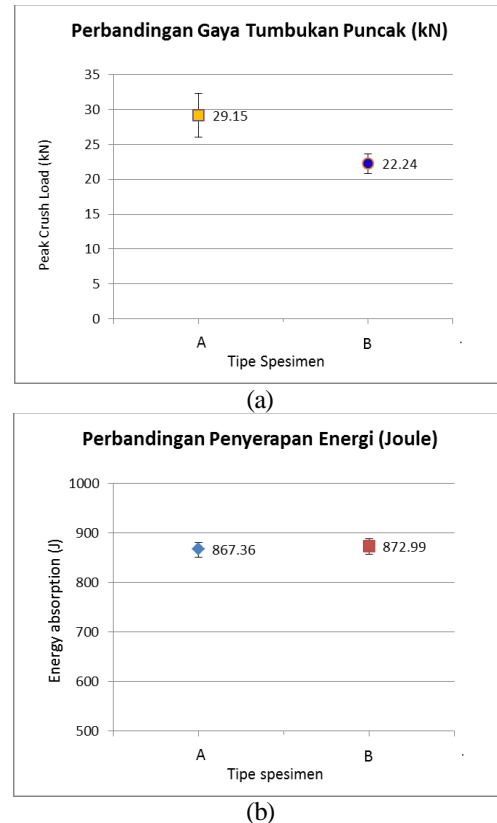
Gambar 10. Mode deformasi hasil eksperimen tabung bujur sangkar (a) Tipe A, (b) Tipe B

Gaya Tumbukan Puncak, Penyerapan Energi dan Gaya Tumbukan Rata-Rata

Untuk pengaruh crush initiators terhadap gaya tumbukan puncak dapat dilihat pada Gambar 11, dan Gambar 12 yang menunjukkan pengaruh yang signifikan dari *crush initiators* dimana nilai gaya tumbukan puncak tabung tanpa *crush initiators* (A) 29.148 Newton berkurang menjadi 22.241 Newton untuk tabung yang dilengkapi dengan *crush initiators* jarak 20 mm (B).



Gambar 11. Grafik respon gaya masing-masing spesimen terhadap perpindahan



Gambar 12. (a) Grafik respon gaya puncak tumbukan terhadap variasi spesimen (b) grafik perbandingan penyerapan energi

Pada Gambar 12 dapat terlihat bahwa pengaplikasian *crush initiators* selain menurunkan gaya tumbukan puncak sekitar 23,69% juga memberi pengaruh terhadap penyerapan energi, dimana penyerapan energi dari tabung tanpa *crush initiators* tipe A adalah 867.36 Joule naik menjadi 872.99 Joule untuk tipe B. Hal ini berarti saat kendaraan mengalami tabrakan maka gaya tumbukan awal tinggi yang akan menyebabkan penumpang terlempar ke arah depan dapat diminimalisir, serta energi tumbukan dapat di serap lebih maksimal oleh struktur tabung berdinding tipis yang dilengkapi dengan *crush initiators* melalui deformasi (*progressive buckling*) yang terjadi, sehingga dapat mengurangi dampak kerusakan yang terjadi pada kompartemen penumpang, hasil ini sesuai dengan kajian [7].

Meskipun terdapat penurunan gaya tumbukan awal yang cukup signifikan dan terdapat kenaikan penyerapan energi, akan tetapi kenaikan penyerapan energi tersebut belum terlihat signifikan seperti yang terlihat pada Gambar 12.b. oleh karena itu dibutuhkan kajian lebih lanjut untuk mengoptimalkan pengaruh *crush initiator* terhadap gaya tumbukan puncak dan penyerapan energi diantaranya pengaruh dari posisi *crush initiators*.

4. KESIMPULAN

Kajian eksperimen dilakukan terhadap tabung bujur sangkar berdinding tipis dengan memberikan beban aksial secara kuasi statik. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa *crush initiators* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan gaya tumbukan puncak sekitar 23,69%. Meskipun terdapat penurunan gaya tumbukan awal yang cukup signifikan dan terdapat kenaikan nilai penyerapan energi, akan tetapi kenaikan penyerapan energi tersebut

belum terlihat signifikan. Oleh karena itu dibutuhkan kajian lebih lanjut untuk mengoptimalkan pengaruh crush initiator terhadap gaya tumbukan puncak dan penyerapan energi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dukungan tim molinas Universitas Indonesia.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zaouk, A. K., Bedewi, N. E., Kan, C. D. and D. Marzougui. "Validation of a Non-Linear Finite Element Vehicle Model Using Multiple Impact Data". The George Washington University. FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center Pub. 1999.
- [2] Opperman, C. J. "Study of a Simplified Bumper System Subjected To Offset Impact Loading". University of Cape Town. 2012.
- [3] W. Abramowicz. "Thin-Walled Structures As Impact Energy Absorbers," *Thin-Walled Structures*, 2003. vol. 41, pp. 91-107.
- [4] Krauss, C. A. and Laananen, D. H. A "Parametric Study of Crush Initiators for A Thin-Walled Tube". *Int. J. Vehicle Design* 15, 1994.3/4/5, 385-401.
- [5] Cho, Y. B., Bae, C. H., Suh, M. W. and Sin, H. C. "a Vehicle Front Frame Crash Design Optimization Using Hole-Type and Dent-Type Crush Initiators". *Thin Walled Structures*, 2006.44, 415-428.
- [6] Eren, I Y. GÜR and Z. AKSOY. "Finite Element Analysis of Collapse of Front Side Rails With New Types of Crush Initiators". *International Journal of Automotive Technology*, 2009. Vol. 10, No. 4, pp. 451-457.
- [7] Cheng, Q. Altenhof, W and Li Li. "Experimental Investigations on The Crush Behaviour of Aa6061-T6 Aluminum Square Tubes With Different Types of Through-Hole Discontinuities". *Thin-Walled Structures*, 2006.vol. 44, pp. 441-454.
- [8] Wirayudhia, Ikrar. "Kaji Parametrik Kasus Tumbukan Kecepatan Rendah pada Tabung Berpenampang Bujur-sangkar dengan Metode Elemen Hingga". ITB. 2012
- [9] ASTM E8/E8M.
- [10] ASTM A751 dan ASTM E415.
- [11] Nagel, Gregory. "Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes". Queensland University of Technology. 2005.
- [12] Najafi, Ali. 2009. "Axial Collapse of Thin-Walled, Multi-Corner Single- And Multi-Cell Tubes". Mississippi State University.
- [13] <http://www.bebonchina.com>, akses 14 Juli 2014.
- [14] Tarigopula V, Langseth M, Hopperstad OS, Clausen AH. "Axial crushing of thinwalled high-strength steel sections". *International Journal of Impact Engineering*, 2005. 32:847-82; 2005.

APLIKASI PENGGUNAAN METODE *MOIRE PATTERN* UNTUK MENGETAHUI KARAKTERISTIK SEBARAN NILAI *STRESS-DISPLACEMENT* PADA MATERIAL BAJA AISI 304 BERBASIS *IMAGE PROCESSING*

Mohammad Khoirul Effendi¹⁾, Agus Sigit Pramono²⁾, Ari Surya Yulianto³⁾, Hanif Pribadi⁴⁾

Jurusan Teknik Mesin ITS^{1,2,3,4)}

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia^{1,2)}

Phone: 0062-31-5922941, Fax: 0062-31-5922941^{1,2)}

E-mail : khoiruleffendi@yahoo.com¹⁾, pramono@its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Medan tegangan adalah parameter penting untuk menentukan kekuatan suatu plat akibat pembebanan. Pengukuran medan tegangan tidak bisa dilakukan secara langsung. Dari penjabaran matematika diketahui bahwa medan tegangan mempunyai hubungan dengan medan perpindahan/displacement. Didalam teori plat, displacement kearah outplane tidak lain adalah defleksi. Salah satu metode untuk mendapatkan nilai defleksi pada plat adalah metode *moiré*.

Metode *moiré* ini menggunakan prinsip superposisi antara garis yang terletak pada plat dengan garis referensi. Ketika sebuah plat uji dikenai sebuah beban, maka defleksi yang terjadi pada material uji akan membentuk pola superposisi yang berupa pola gelap terang (*frinji*) yang menggambarkan distribusi nilai *stress-strain* pada sebuah material uji. Material uji yang digunakan adalah plat baja AISI 304 yang sebelumnya sudah diberi pola kisi dengan variasi jarak sebesar 1 mm. Keempat sisi plat uji tersebut dijepit sempurna, kemudian diberi tekanan dengan variasi displacement (0.5, 1, 1.5, dan 2 mm) tepat di tengah-tengah plat tersebut. Pola *moiré* yang terjadi ditangkap oleh kamera yang merubahnya menjadi sebuah citra digital. Citra digital tersebut kemudian diproses melalui serangkaian proses pengolahan gambar yang terdiri atas proses filter (*Gaussian Filter* dan *Butterworth Low Pass Filter*), serta pendeteksi tepi (*Sobel*, *Prewitt*, *Canny*, dan *Roberts*).

Hasil pengukuran *stress-strain* dengan metode *moiré* ini kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis dan perhitungan numerik. Rata-rata perbedaan nilai displacement metode *moiré* dengan metode analitis sebesar 6,75%, sedangkan perbedaan dengan metode numerik sebesar 7,55%. Kemudian nilai rata-rata perbedaan nilai *stress* antara penghitungan metode *moiré* dengan analitis sebesar 9,08%, sedangkan perbedaan dengan metode numerik sebesar 9,5%.

Kata kunci: *Moiré pattern*, *frinji*, deteksi tepi, sebaran nilai *stress-displacement*

1. PENDAHULUAN

Dalam ilmu material, deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran dari suatu obyek karena adanya gaya yang diberikan pada obyek tersebut. Gaya yang bekerja pada material tersebut bisa berupa energi yang ditransfer melalui kerja atau perubahan suhu yang ditransfer melalui panas. Untuk jenis yang pertama gaya yang bekerja pada material bisa berupa gaya tarik, gaya tekan, geser (*shear*), bending or torsi. Sedangkan untuk jenis yang kedua, faktor yang paling signifikan adalah cacat mobilitas struktural seperti batas butir, kekosongan titik, dislokasi garis, kesalahan susunan dalam kristal dan non-kristal. Pergerakan atau perpindahan cacat mobile diaktifkan oleh perubahan temperatur, dan dibatasi oleh laju difusi atom.

Medan tegangan adalah parameter penting untuk menentukan kekuatan suatu plat akibat pembebanan. Pengukuran medan tegangan tidak bisa dilakukan secara langsung. Dari penjabaran matematika diketahui bahwa medan tegangan mempunyai hubungan dengan medan perpindahan/displacement. Didalam teori plat, displacement kearah outplane tidak lain adalah defleksi. Defleksi yang terjadi pada plat sering digambarkan sebagai *strain* [1][2]. Salah satu metode untuk mendapatkan nilai defleksi pada plat adalah metode *moiré*. Pengukuran optik menggunakan metode ini secara umum dibagi menjadi dua kelompok yaitu (a) *In-Plane measurement* dan (b) *Out-of-plane measurement*.

In-plane measurement didapatkan berdasarkan superposisi dari kisi referensi dan kisi objek. *Out-of-plane measurement* biasanya digunakan untuk pengukuran perpindahan tegak lurus bidang misalnya ketinggian permukaan [3].

Salah satu keuntungan menggunakan metode *moiré* ini adalah sifat kesensistifannya terhadap pergeseran (*displacement*), oleh karena aplikasi metode ini untuk pengukuran sangatlah tepat karena akan menghasilkan nilai pengukuran dengan nilai akurasi yang tinggi. Pengukuran secara *out of plane displacement* dibagi menjadi dua macam pengukuran, yaitu *shadow* dan *projection*. Metode proyeksi banyak dipilih karena biaya pengukurannya yang murah, tidak bersifat merusak dan dapat diterapkan secara menyeluruh pada benda kerja yang akan diukur [4].

Pada metode proyeksi, kisi maya (*virtual grating*) dipakai sebagai kisi proyeksi dimana kisi tersebut dihasilkan dari susunan interferometer *Michelson*. Kisi maya diproyeksikan pada permukaan obyek pada sudut tertentu sehingga pola kisi terpetakan pada permukaan obyek. Kamera CCD yang ditempatkan tegak lurus permukaan obyek, akan merekam pola kisi tersebut dan menyimpannya dalam memori komputer dalam bentuk digital berupa skala *grey* yang bernilai 0 sampai 255. Pola *frinji* terbentuk bila dua kisi dengan kerapatan yang hampir sama saling bersuposisi. Untuk mendapatkan dua kisi dengan kerapatan yang hampir sama ini, dilakukan dua kali perekaman, yaitu yang pertama sebelum obyek dikenai simpangan dan yang kedua setelah obyek mendapat

simpangan. Selanjutnya kedua citra hasil rekaman di atas dikurangkan secara piksel per piksel [5,6].

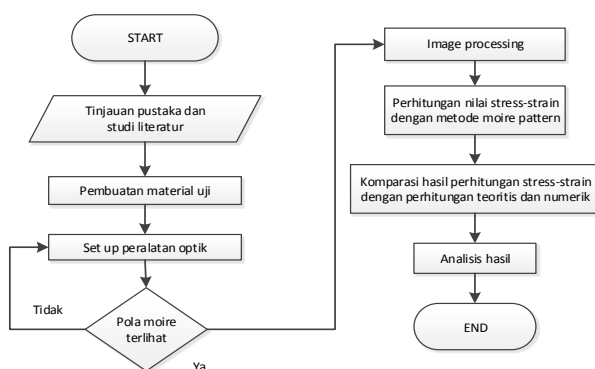
Pengolahan citra (*image processing*) telah banyak digunakan untuk menganalisa kekuatan geser material skala laboratorium. Kelebihan metoda ini terletak pada sifat *non-contact* terhadap sampel yang diukur dan dapat mendeteksi deformasi yang terjadi dengan lebih presisi dan lebih aman [7,8]. Selain itu pengolahan citra juga dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas citra sehingga didapatkan sebuah citra yang sudah terbebas dari pengaruh derau (*noise*). Hasil citra yang didapatkan dari hasil pengolahan citra ini diharapkan mendekati citra sesungguhnya [9].

Terdapat lima proses dalam pengolahan citra digital, yaitu *image restoration*, *image enhancement*, *image data compaction*, *image analysis*, dan *image reconstruction* [10]. *Image restoration* atau perbaikan citra berhubungan dengan minimalisasi atau penghilangan degradasi tertentu yang terdapat dalam citra sehingga didapatkan kembali citra aslinya. Degradasi ini dapat diakibatkan oleh lingkungan penginderaan citra, misalnya derau yang diakibatkan sensor citra, buram (*blur*) akibat kamera yang tidak fokus, keadaan atmosfer atau pencahayaan ketika citra ditangkap, dan sebagainya [11].

Ada beberapa tahapan pengolahan citra yang harus dilakukan agar citra *frinji* dapat menghasilkan citra *stress-strain*. Tahapan-tahapan itu meliputi *image filter* yaitu gambar berupa pola diubah ke bentuk grayscale dan difilter dengan *Fourier Transform*. Hasil dari filter kemudian dijadikan citra biner atau threshold untuk lebih memperjelas pola dan selanjutnya citra *thinning* untuk membuat pola *frinji* terang yang diperoleh menjadi garis sehingga besaran *strain* bisa dihitung dari perbandingan antara jarak kisi dan spasi [12].

2. METODOLOGI

Secara garis besar *flowchart* penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 1.



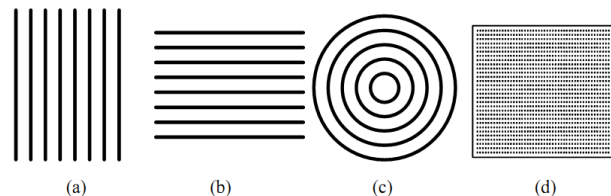
Gambar 1. Flow chart penelitian

Moire pattern

Pola *moiré* adalah pola yang terjadi akibat superposisi dari dua atau lebih pola kisi dengan kandungan intensitas gelap terang dengan intensitas gelap terang yang periodik. Lebar garis gelap dan lebar antar garis atau garis terang biasanya sama, namun dalam beberapa kasus bisa berbeda. Pola kisi ini dapat berbentuk garis, lingkaran dan sebagainya. Namun yang lebih umum di aplikasikan adalah kisi garis karena

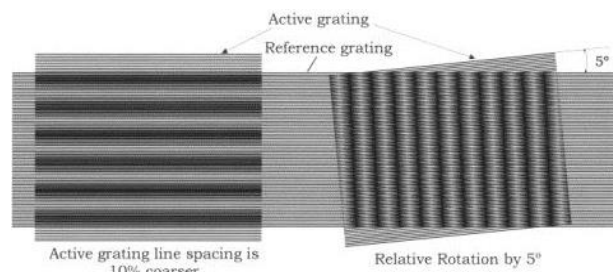
paling sederhana untuk dianalisa.

Cara-cara yang umum dilakukan untuk menciptakan *frinji* (pola gelap terang), yaitu interferometer, pola kisi refleksi, dan lain-lainya, akan tetapi dalam penelitian ini hanya menggunakan pola kisi sebagai penggenarasi *frinji*. Beberapa jenis pola kisi yang sering dipakai dalam penelitian bisa dilihat pada Gambar 2.



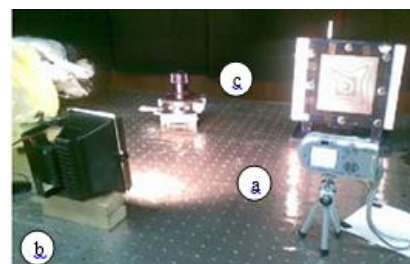
Gambar 2. Beberapa jenis pola kisi yang umum digunakan, (a) kisi garis vertikal (b) kisi garis horizontal (c) kisi berbentuk lingkaran (d) kisi berbentuk dot

Metode *moiré* yang dipakai dalam penelitian ini adalah metode *in-plane measurement*, dimana pola *moiré* didapatkan berdasarkan superposisi dari pola kisi referensi dan objek seperti terlihat pada Gambar 3. Pola kisi referensi mempunyai periode serta jarak grating yang konstan, sedangkan untuk pola kisi objek, awal mulanya mempunyai periode dan jarak pola kisi yang sama, akan tetapi ketika ada sebuah gaya yang bekerja pada objek tersebut maka jarak pola kisi tersebut akan berubah. Pola kisi objek dicetak atau ditempelkan pada permukaan objek. Bila dilihat dari jauh, pola kisi referensi dan pola kisi objek tidak lagi dapat dibedakan, dan hanya terlihat pita gelap dan terang.



Gambar 3. Superposisi antar 2 buah pola kisi (aktif dan referensi)

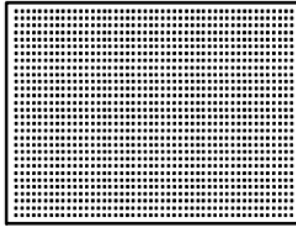
Set-up komponen untuk pengukuran nilai *stress & displacement* dengan metode *moiré* dapat dilihat pada gambar 4, dimana komponen pengukuran terdiri dari (a) kamera digital, (b) lampu halogen, (c) plat uji, penjepit dan *indenter*.



Gambar 4. Set-up komponen pengukuran *stress-displacement* di atas meja rata, (a) kamera digital, (b) lampu halogen, (c) plat uji, penjepit dan *indenter*.

(a) Plat uji

Plat uji yang digunakan dalam percobaan ini adalah plat baja AISI 304 berbentuk persegi berukuran 15 x 15 cm dengan tebal 1 mm. Diatas plat uji kemudian dicetak kisi-kisi dengan jarak 1 mm, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Material uji yang sudah dicetak kisi-kisi.

Plat uji di dalam percobaan ini berfungsi sebagai grating aktif, sedangkan sebuah mika transparan dengan jarak kisi-kisi yang sama digunakan sebagai grating referensi.

(b) Kamera Digital

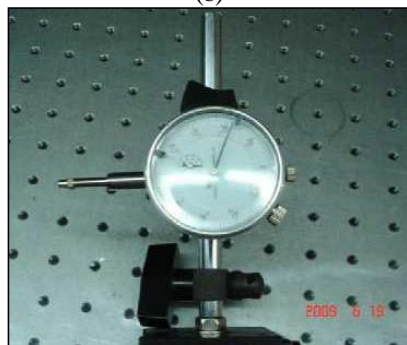
Pada penelitian ini kamera digital yang digunakan adalah merk Sony dengan resolusi sebesar 5 megapixel seperti terlihat pada Gambar 6 (a). Kamera digital disini berfungsi menangkap pola moiré yang terjadi pada plat uji ketika plat uji tersebut dikenai gaya indentasi yang bervariasi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 6 (a) kamera digital, (b) lampu halogen, (c) dial indikator

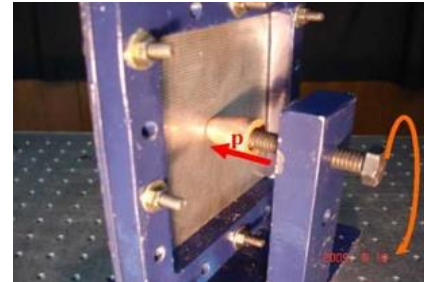
(c) Lampu Halogen 200 Watt

Lampu ini berfungsi sebagai sumber cahaya sehingga pola moiré bisa terlihat jelas pada permukaan plat uji. Gambar

lampu halogen tersebut bisa dilihat pada Gambar 6 (b).

(d) Dial indikator

Alat ini berfungsi untuk mengetahui besaran pembebanan yang diwakili dengan perubahan jarak indentasi yang diberikan indenter kepada material uji seperti terlihat pada Gambar 7 (a). Pemberian beban terpusat pada plat uji diwakili oleh sebuah indenter yang digerakkan oleh sebuah mekanisme ulir. Perubahan jarak indentasi pada percobaan ini divariasikan antara 0.5, 1, 1.5, serta 2 mm. Skema peletakan dial indikator pada indenter bisa dilihat pada Gambar 7 (b).



(a)



(b)

Gambar 7. (a) Indenter, (b) Peletakan dial indikator pada indenter.

Image Processing

Perekaman data permukaan obyek ukur yang dikenai beban terpusat dilakukan oleh kamera digital. Citra yang dihasilkan kamera tersebut kemudian dirubah ke dalam bentuk data numerik yang kemudian diolah melalui beberapa tahapan dengan software komputasi untuk memperoleh informasi sebaran *displacement*, serta *stress* pada permukaan obyek ukur.

Gambar berwarna menjadi gambar gray

Tahap ini mengubah gambar berwarna (RGB) menjadi gambar *grayscale* dengan menghilangkan informasi warna dan saturasi, akan tetapi tetap mempertahankan informasi pencahayaan dari gambar tersebut. Perubahan ini mangacu pada rumus (1), dimana R G B adalah warna merah, hijau, dan biru dari suatu gambar berwarna. Contoh hasil proses ini bisa dilihat pada Gambar 8 (b).

$$\text{gray image} = (0.2989 \times R) + (0.5870 \times G) + (0.1140 \times B) \quad (1)$$

Dimana R, B, G adalah nilai *Red*, *Blue*, dan *Green* dari gambar berwarna yang digunakan sebagai input.

Filter Gaussian dan Butterworth Low Pass Filter (BLPF)

Gambar *gray* yang dihasilkan dari proses sebelumnya masih menyisakan *noise*, yaitu berupa pola kisi-kisi yang akan berefek buruk dalam proses pendeteksian tepi. Oleh karena itu perlu adanya filter yang berfungsi untuk

menghilangkan *noise* tersebut. Filter ini bersifat *low-pass filter* yang secara umum membuat sebuah gambar input menjadi *blurr*. Pada penelitian ini digunakan 2 filter yang berbeda yaitu *Gaussian Filter* dan *Butterworth Low Pass Filter* (BLPF).

Gaussian filter didefinisikan dengan persamaan (2) sebagai berikut:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Dimana x dan y adalah jarak dengan arah horisontal dan vertikal dari sumbu x dan y gambar asli, sedangkan σ adalah standar deviasi dari distribusi *Gaussian*.

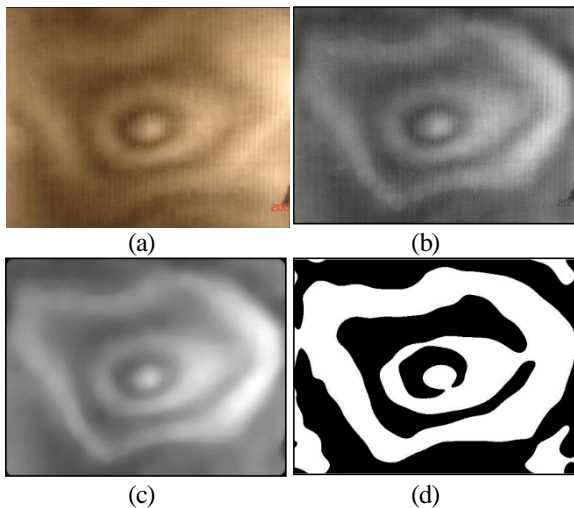
Sedangkan *Butterworth Low Pass Filter* (BLPF) diformulasikan dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$G(\omega) = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (3)$$

Dimana ω adalah frkuensi angular dan n adalah jumlah *pole* di dalam filter. Hasil penggunaan filter pada sebuah gambar *gray* input bisa dilihat pada Gambar 8 (c).

Adaptive Threshold

Threshold adalah suatu batas yang digunakan dalam proses perubahan citra *grayscale* yang mempunyai rentang nilai 0-255 menjadi citra biner dengan nilai 0 dan 1. Apabila hanya digunakan satu nilai *threshold* saja, maka citra yang dihasilkan tidak dapat menampilkan garis-garis *frinji* secara sempurna. Hal ini disebabkan karena penggunaan satu nilai *threshold* memiliki keterbatasan dalam mendeteksi citra dengan homogenitas nilai derajat keabuan yang serupa nilainya. Oleh sebab itu, diperlukan nilai *threshold* yang bermacam-macam nilainya untuk satu gambar *gray* tertentu yang disebut sebagai *adaptive threshold*. Secara matematis proses penggunaan *threshold* ini mengau pada persamaan (4), sedangkan salah satu hasil proses pemfilteran bisa dilihat pada Gambar 8 (d).



Gambar 8. (a) color image, (b) *gray image*, (c) hasil penggunaan filter, (d) hasil penggunaan Adaptive threshold

$$g(x, y) = 1 \text{ if } f(x, y) > T, \text{ else } g(x, y) = 0 \quad (4)$$

Dimana $f(x,y)$ adalah citra *grayscale* yang dijadikan input, $g(x,y)$ adalah citra keluaran biner, sedangkan T adalah nilai *threshold*.

Edge Detection

Tepi didefinisikan sebagai batas antara dua daerah yang memiliki nilai piksel yang berbeda secara signifikan. Pola yang terbentuk dari deteksi tepi ini adalah pola melingkar berupa garis-garis. Beberapa kriteria hasil pendeteksian tepi dianggap bagus adalah tepi bisa terdeteksi dengan baik, kontribusi *noise* dari *background* gambar bisa direduksi seminimal mungkin, dan intensitas dari tepi yang terbentuk sedekat mungkin dengan persepsi mata manusia pada umumnya. Oleh karena itu dalam penelitian ini dipilihlah metode *Sobel*, *Prewitt*, *Canny* dan *Roberts* sebagai metode pendeteksi tepi. Hasil pendeteksian tepi ini nantinya dipakai sebagai acuan dalam pengukuran *displacement* berdasarkan pada jarak antar garis-garis dari pola melingkar yang terbentuk. Semakin banyak pola garis melingkar yang terbentuk maka semakin mudah dan akurat dalam penghitungan *displacement*.

Untuk metode *edge* dengan metode *Sobel* apabila diketahui suatu citra $f(x,y)$ adalah fungsi dua dimensi, maka vektor gradien dari x dan y masing-masing merupakan turunan pertama terhadap x dan y . Persamaan ini dapat dituliskan seperti pada persamaan (5).

$$G = \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Untuk metode pendeteksi tepi menggunakan metode *Prewitt*, sebuah operator yang berupa matrik konvolusi 3x3 digunakan untuk mendeteksi tepi sebuah gambar input. Operator tersebut bias dituliskan seperti pada persamaan (6), dimana G_x adalah operator untuk arah horizontal sedangkan G_y adalah operator untuk arah vertical seperti terlihat pada persamaan (6).

$$G_x = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} G_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Pendeteksi tepi metode *Canny* ini menggunakan *pre-processing* yaitu *Gaussian filter* untuk menentukan tepi suatu gambar input. Selanjutnya intensitas gradient untuk menentukan sebuah tepi gambar, diformulasikan dengan persamaan (7):

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (7)$$

Dimana G_x adalah turunan pertama untuk arah horizontal sedangkan G_y adalah turunan pertama untuk arah vertical. Sedangkan sudut orientasi tepi relatif terhadap grid pixel (Θ) diformulasikan dengan persamaan (8).

$$\Theta = \arctan \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (8)$$

Untuk algoritma *Roberts* formulasi yang dipakai bisa dilihat pada persamaan (9).

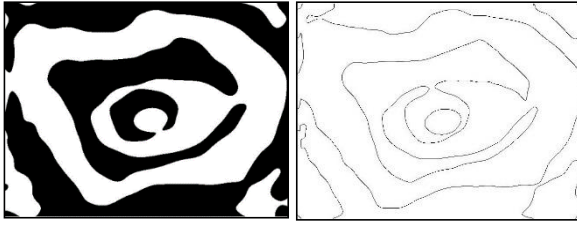
$$y_{i,j} = \sqrt{x_{i,j}} \quad (9)$$

$$z_{i,j} = \sqrt{(y_{i,j} - y_{i+1,j+1})^2 + (y_{i+1,j} - y_{i,j+1})^2}$$

Dimana x adalah nilai awal dari sebuah gambar, z adalah turunan perhitungan, dan i,j menunjukkan lokasi dalam sebuah gambar. Tepi dari sebuah gambar terbentuk dari proses konvolusi gambar asli dengan matrix operator seperti terlihat pada perumusan (10).

$$R_+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_- = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Salah satu contoh hasil pendeteksian tepi bisa dilihat pada Gambar 9 di bawah ini.



Gambar 9. Contoh hasil penggunaan deteksi tepi

Pengukuran Displacement

Pola yang terbentuk dari deteksi tepi ini adalah pola melingkar berupa garis-garis yang nantinya dipakai sebagai acuan dalam pengukuran *displacement*. Semakin banyak pola garis melingkar yang terbentuk maka semakin mudah dan akurat dalam penghitungan *displacement*. Perhitungan *displacement* dengan metode deteksi tepi dihitung berdasarkan titik-titik yang dijadikan acuan sebagaimana terlihat pada Gambar 10.

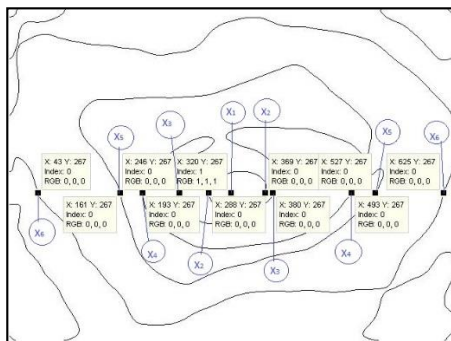
Sedangkan perhitungan *displacement* menurut metode Ritz (teoritis) mengacu pada persamaan (11).

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{b} \right) \quad (11)$$

Dimana w adalah besar *displacement* pada plat, a dan b adalah dimensi plat, x dan y koordinat point pada material uji, sedangkan a_{mn} adalah amplitudo defleksi.

Pengukuran Stress

Berdasarkan metode *edge detection* penentuan nilai strain dilakukan berdasarkan formulasi seperti yang terlihat pada persamaan (12).



Gambar 10. Proses penentuan titik untuk menentukan *displacement* pada material uji

$$\sigma_x = \frac{E \cdot z}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

Dimana σ_x adalah tegangan arah x , z sumbu defleksi arah *in-plane*, E adalah modulus elastisitas, ν adalah *poisson number*.

Sedangkan secara teoritis perhitungan *stress* pada material uji mengikuti persamaan (13)

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (13)$$

Dimana nilai σ_x dan σ_y didapatkan dari persamaan (14).

$$\sigma_x = \frac{12M_x z}{t^3}, \sigma_y = \frac{12M_y z}{t^3} \quad (14)$$

Dimana t adalah tebal plat uji, sedangkan nilai M_x dan M_y

didapatkan dari persamaan 15

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (15)$$

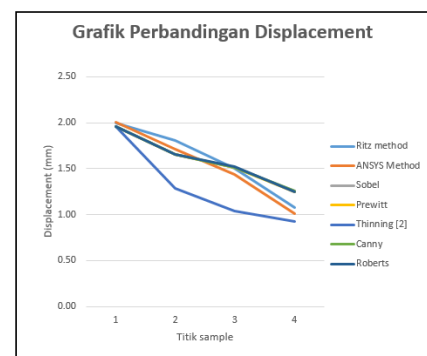
Dimana D adalah nilai *Flexural Rigidity* dari sebuah plat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

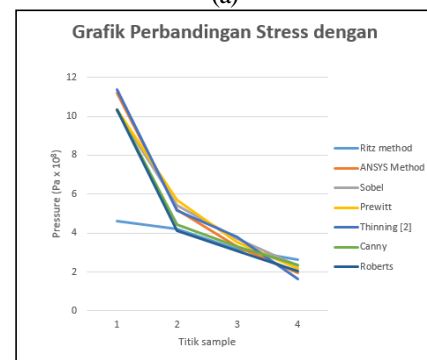
Grafik perbedaan besar *displacement* antara teoritis, numerik, metode *moiré* menggunakan pendeteksi tepi metode *Canny*, *Roberts*, *Sobel*, *Prewitt*, serta penelitian sebelumnya dengan metode *thinning* [2] bisa dilihat pada Gambar 11 (a). Kelima grafik mempunyai kecenderungan tren yang menurun ketika titik sampel semakin menjauh dari pusat. Hal ini menunjukkan semakin dekat posisi titik yang ditinjau dengan tepi, maka *displacement* titik tersebut bernilai nol karena plat tersebut dijepit pada kedua ujungnya sehingga titik dengan *displacement* terbesar adalah pada pusat dan terkecil adalah pada titik paling akhir.

Pada titik sampel 1 dan 4 tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara metode *moiré*, numerik dan teori, sedangkan pada titik 2 dan 3 terdapat perbedaan yang cukup besar antara metode *moiré*, numerik dan teori. Hal ini terjadi dimungkinkan karena saat percobaan metode *moiré*, spesimen uji mengalami pembebanan yang tidak merata akibat dari penjepitan keempat sisi spesimen yang tidak sempurna.

Perbandingan nilai *stress* dari perhitungan metode teoritis (Ritz), metode *moiré*, metode *thinning* serta secara numerik pada empat buah titik sample yang berbeda bisa dilihat pada Gambar 11 (b). Besar *stress* yang terjadi pada titik sampel cenderung menurun jika titik tersebut semakin jauh dari pusat pembebanan. Hal ini disebabkan karena semakin ketepi suatu titik maka efek pembebanan akan semakin berkurang dan akan bernilai 0 (nol) pada jepitan.



(a)



(b)

Gambar 11. (a) Perbandingan *displacement*, (b) perbandingan *stress* antara metode teoritis (Ritz), *moiré* (dengan pendeteksi tepi *Sobel*, *Prewitt*, *Canny*, & *Roberts*), *thinning*, serta numerik.



4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan tiga metode yaitu metode numerik, metode moiré dan metode analitis teori diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan displacement metode teoritis (*Ritz*) dengan metode *moiré Canny*, *Roberts*, *Sobell*, *Prewits* masing masing sebesar 6,51%, 6,31%, 7,34%, dan 6,45 %.
2. Perbedaan displacement metode numerik dengan metode *Canny*, *Roberts*, *Sobell*, *Prewits* masing masing sebesar 7,65%, 7,51%, 7,7% dan 7,6 %
3. Perbedaan nilai stress metode metode teoritis (*Ritz*) dengan metode *Canny*, *Roberts*, *Sobell*, *Prewits* masing masing sebesar 9,20%, 9,5%, 9,65%, dan 8,0%.
4. Perbedaan nilai stress metode numerik dengan metode *Canny*, *Roberts*, *Sobell*, *Prewits* masing masing sebesar 9,70%, 9,65%, 9,72%, dan 8,1%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andreas, Heri, Karakteristik Deformasi Strain dan Stress, Institut Teknologi Bandung. Bandung, 2007.
- [2] Marlang, Hidayat, Analisa Medan Stress dan Strain Dengan Menggunakan Metode *Moiré*, Surabaya, 2009.
- [3] Adibrata, Donny, Analisa Deformasi Plat Logam Dengan Metode Proyeksi, 2010.
- [4] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2002.
- [5] Ansel C. Ugural, *Stresses in Plates and Shells*, New Jersey Institute Of Technology, Second Edition, Mc Graw Hill, 1999.
- [6] Wahyu Ana, "Penghapusan Noise Pada Citra Dengan *Filter Adaptive-Hierarchical*", 2010.
- [7] Catur Widodo Edi dan Adi Kusworo, Penggunaan Filter Frekuensi Rendah untuk Penghalusan Citra (*Image Smoothing*), 2003.
- [8] Rachmad Aeri, Pengolahan Citra Digital Menggunakan Teknik *Filtering Adaptive Noise Removal* Pada Gambar Bernoise, 2011.
- [9] Arif K M, Sistem Deteksi Embrio Pada Telur Menggunakan Sensor Webcam, 2011.
- [10] Fitri Anisa, Perbandingan Metode *Low-Pass Filter* dan *Median Filter* Dalam Penghalusan Citra (*Image Smoothing*) Untuk Peningkatan Kualitas Citra (*Image Enhancement*), 2010.
- [11] Ken, Ramadi, Pengembangan Algoritma Sistem Identifikasi Mata Manusia Berbasis Pengolahan Citra dengan Metode Wavelet pada Peralatan *AOI (Automatic Optical Inspection)*, 2011.



FLUIDSIM PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER MODULE UNTUK RANCANGAN MESIN PRESS HIDROLIK BOTOL PLASTIK

Ninuk Jonoadji, Ian Hardianto Siahaan

Prodi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra

Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia

Phone: 0062-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658

E-mail : ninukj@petra.ac.id, ian@petra.ac.id

ABSTRAK

Sampah plastik memiliki dampak buruk terhadap ekosistem lingkungan hidup. Dampak yang ditimbulkan akibat pengelolaan sampah plastik yang tidak benar antara lain terjadinya penyumbatan saluran air dan tanggul yang menyebabkan terjadinya banjir dan rusaknya turbin waduk. Pengendalian sampah plastik perlu disiapkan karena berdasarkan penelitian bahwa sampah plastik membutuhkan waktu hingga 1000 tahun agar dapat terurai sendirinya dengan tanah, bilamana sampah plastik tersebut dibakar justru akan menghasilkan asap beracun yang berbahaya bagi kesehatan apalagi bila terhirup manusia dapat memicu penyakit kanker, hepatitis, gangguan sistem saraf dan bahkan depresi. Berdasarkan permasalahan tersebut, perancangan ini mencoba menjembatani dengan menyelesaikan permasalahan tersebut dengan cara merancang mekanisme prototype mesin press hidrolik untuk botol plastik yang bentuk dan berukuran sama 0.2 m x ϕ 0.06 m. Bak penampung botol plastik dalam ruang mesin press dirancang berukuran 0.8 m x 0.8 m x 3 m. Perancangan ini mampu memadatkan sekitar 4000 botol dengan buckling load experiment berkisar 2.5 ton hingga ketebalannya pressingnya menjadi 1/6 dari ukuran sebelumnya. PLC (Programmable Logic Controller) Fluidsim yang dibangun dalam hal ini memanfaatkan gerbang logika controller dengan mengkombinasikannya di dalam logic modulnya sehingga PLC tersebut dapat mengendalikan prosesnya dengan baik sesuai mekanisme rancangan yang diinginkan. Pompa hidrolik yang dipilih pada perancangan ini menggunakan type axial piston fixed pump Rexroth Bosch tipe 355 dengan kapasitas aliran 469liter/menit.

Kata kunci: sampah plastik, mesin press hidrolik, PLC Fluidsim, controller, logic module.

1. PENDAHULUAN

Bahan plastik memang merupakan komponen yang penting dalam yang dapat dijumpai dalam aktivitas kehidupan sehari-hari. Perannya sebagai pengganti logam dan kayu mendominasi pembuatan produk karena sifatnya yang sangat unggul antara lain: ringan, kuat, tahan korosi, transparan, dan sifat insulasi yang baik. Aplikasi pemakaian bahan plastik ini dapat ditemukan pada produk-produk kemasan makanan, alat-alat rumah tangga hingga komponen produk otomotif. Konsumsi pemakaian bahan plastik tersebut dapat dipastikan mengalami peningkatan tiap tahun akibat bertambahnya tuntutan kebutuhan hidup. Seiring peningkatan pemakaian bahan plastik tersebut, menyebabkan timbulnya sampah plastik yang menuntut pengelolaannya yang dilakukan secara benar untuk dapat mengatasinya peningkatannya. Manajemen sampah plastik skala besar biasanya dikelola oleh pemerintah kota atau daerah setempat. Pemahaman tentang pengelolaan sampah plastik tersebut perlu sekali disosialisasikan kepada masyarakat luas dengan baik sehingga dampak negatifnya terhadap lingkungan hidup dapat diminimalisir. Pemahaman tentang jenis-jenis plastik, dan kandungan materialnya merupakan materi yang perlu disampaikan kepada masyarakat dengan benar. Beberapa jenis plastik yang dapat ditemukan dalam kehidupan sehari-hari, yaitu: PET (*polyethylene terephthalate*), HDPE (*High Density polyethylene*), PVC (*Polyvinyl Chloride*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), PP (*Polypropylene*), PS (*Polystyrene*), *others/polycarbonate*.

Berdasarkan sumber informasi dari <http://www.antaraneews.com/> dijelaskan bahwa produksi sampah plastik di Indonesia mencapai 5,4 juta ton per tahun yang setara dengan 14 persen dari total produk sampah di Indonesia. Dari seluruh

sampah yang ada ditemukan 57 persen berada di pantai bahkan sampai mengapung di setiap mil persegi samudera. Jumlah yang begitu besar diprediksi disebabkan banyaknya orang yang memanfaatkan liburannya di Pantai dan membuang sampahnya di pesisirnya. Menurut program lingkungan PBB, bahkan 13.000 partikel plastik bisa ditemukan setiap kilometer persegi areal laut jumlah tersebut bahkan bisa bertambah terus. Menurut informasi yang diperoleh dikatakan bahwa kampanye sosialisasi 3R (*Reduce, Reuse, recycle*) tidak sebanding dengan pertumbuhan sampah plastik yang meningkat terus dari hari ke sehari. Beberapa upaya bijak yang dilakukan saat ini tidaklah serta merta memusnahkan produk bahan plastik tersebut melainkan menggunakan plastik yang ramah lingkungan. Plastik ramah lingkungan tersebut diantaranya: *degradable plastic*, *biodegradable plastic* atau yang lebih dikenal dengan istilah bioplastik.

Kebutuhan akan bahan plastik diberbagai negara memang berbeda, umpamanya kantong plastik di negara Denmark dan Finlandia hanya membutuhkan empat kantong plastik per orangnya setiap tahunnya, berbeda halnya dengan di Jerman mencapai 70 kantong plastik. Di Jerman sendiri upaya yang dilakukan untuk mengurangi sampah tersebut dengan menerapkan jaminan bagi botol kemasan minuman. Pembeli harus membayar sejumlah uang untuk kemasannya dan jaminan tersebut akan dikembalikan lagi jika pembeli telah mengembalikan botol bekasnya. Upaya pengendalian sampah yang dilakukan Irlandia cukup signifikan juga yaitu setiap sampah plastik dikenai pajak bahkan setiap tahun dibuat meningkat terus. Dampaknya bagi negara Irlandia sendiri pemakaian bahan plastik berkurang hingga hampir 90%. Inggris sendiri memproduksi sedikitnya 3 juta ton sampah plastik setiap tahunnya dimana 56% dari jumlah tersebut berasal dari kemasan dan sisanya sampah rumah tangga. Saat ini, pertumbuhan bisnis mendaur ulang di Amerika semakin

meningkat tajam juga dimana tercatat hampir 1.600 unit usaha terlibat di dalamnya. Hal ini menunjukkan perkembangan positif yang baik untuk mengatasi sampah plastik di berbagai negara sesuai kebijakan pemerintahnya memberikan added value khususnya bagi pengusaha daur ulang. Di Indonesia sendiri sampah plastik diubah kembali menjadi produk yang bisa dimanfaatkan kembali yang dikenal sebagai produk kerajinan *trashion* (produk *fashion* dari *trash*) yang punya nilai jual produk yang cukup tinggi. Botol plastik yang di daur ulang bisa dimanfaatkan sebagai vas bunga, hiasan dinding, kinciran, bunga palsu, tas plastik dan lain-lain.

Menurut penelitian yang dilakukan terhadap bahan plastik, ternyata sampah plastik tersebut bisa dijadikan sumber energi yang cukup prospektif di masa mendatang disebabkan kandungan energinya yang tinggi (*M.Syamsiro*). Teknologi yang dimanfaatkan dalam hal ini dengan cara mengkonversinya menjadi bahan bakar. Proses yang dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan pencacahan terhadap sampah plastik tersebut kemudian membriketnya menjadi bahan bakar briket. Bahan bakar tersebut dapat digunakan untuk bahan bakar pada tungku-tungku di industri. Selain bahan bakar padat, bisa juga dikonversi menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis dengan memanaskannya pada temperatur berkisar 500°C sehingga fasenya akan berubah menjadi gas dan kemudian proses *cracking* dan setelah itu didinginkan kembali untuk mendapatkan bahan cair setara bensin dan solar. Sedangkan untuk merubahnya menjadi bahan bakar gas, dilakukan dengan teknologi gasifikasi dimana sampah plastik tersebut dipanaskan pada temperatur yang sangat tinggi mencapai 900°C dengan prinsip oksidasi parsial. Proses tersebut akan menghasilkan gas hidrokarbon yang bisa dimanfaatkan oleh industri untuk keperluan produksinya.

2. METODE PENELITIAN

Programmable Logic Control

Programmable Logic Control (PLC) merupakan piranti yang dapat diprogram untuk menggantikan sederetan *relay* pada sistem konvensional dengan memanfaatkan sensor untuk melakukan tindakan sesuai yang dibutuhkan untuk menghidupkan dan mematikan keluarannya. PLC tersebut secara kontinyu melakukan monitoring terhadap status sistem dan mengambil tindakan yang diperlukan sehubungan dengan proses yang dikontrol, serta menampilkan pesan tersebut pada operator sistem. Pada dasarnya PLC tidak dapat melakukan tanpa adanya program di dalam memori proses. Program PLC dimasukkan ke dalam memori melalui dengan menggunakan peralatan pemrograman PLC yang sesuai, peralatan pemrograman PLC tersebut diantaranya: *hand-held unit, terminal video*, komputer pribadi/PC.

PLC yang paling banyak ditemukan di Industri adalah PLC produksi Omron dan PLC produksi *Rexroth Bosch*. PLC Omron pada umumnya dibagi atas tiga kelompok besar, yaitu: PLC *mikro* dimana jumlah *input/output* kurang dari 32 terminal, PLC *mini* dimana memiliki jumlah *input/output* antara 32 sampai 128 terminal, PCL *Large* dikenal dengan PLC tipe *rack* dimana jumlah *input/output*nya lebih dari 128 *terminal*. PLC Omron merupakan produksi Omron yang banyak dipakai dalam bidang industri penggunaan mesin otomatis dan pemrosesan secara otomatis.

Terdapat banyak pilihan bahasa untuk membuat program dalam PLC, dimana masing-masing mempunyai keuntungan dan kerugian masing-masing tergantung sudut pandang dari *user/programmer*. Pada umumnya terdapat dua bahasa

pemrograman sederhana dari PLC, yaitu pemrograman diagram *ladder* dan bahasa *instruction list* (*mnemonic code*). Diagram *ladder* merupakan bahasa yang dimiliki setiap PLC. *Ladder* diagram di sini digunakan untuk menggambarkan program dalam bentuk grafik yang dikembangkan dari kontak-kontak *relay* yang terstruktur yang menggambarkan aliran arus listrik. Dalam diagram tersebut terdapat dua buah garis vertikal, dimana garis vertikal sebelah kiri dihubungkan dengan sumber tegangan positif catu daya dan garis yang disebelah kanannya dihubungkan dengan sumber tegangan negatif catu dayanya. Program *ladder* tersebut ditulis menggunakan bentuk *pictorial* atau simbol secara umum mirip dengan rangkaian kontrol *relay*. Program ditampilkan pada layar dengan elemen-elemen seperti *normally open contact*, *normally closed contact*, *timer*, *counter*, *sequencer*, dan lain-lain. Diagram *ladder* adalah bahasa yang dimiliki setiap PLC. Dalam hal ini listrik mengalir dari sebelah kiri ke rel sebelah kanan, yang dikenal dengan istilah *ladder line* (garis tangga).



Gambar 1. Tipe PLC Omron di Industri

Konsep PLC sesuai namanya merupakan pemrograman yang memiliki kemampuan guna memproses input secara aritmetik (ALU) untuk melakukan operasi membandingkan, menjumlahkan, mengalikan, membagi, mengurangi dan negasi dengan cara menontrol proses sehingga mendapatkan keluaran yang diinginkan. Secara umum fungsi dari PLC tersebut bisa dijelaskan sebagai berikut: kontrol sekuensial (memproses sinyal *biner* menjadi *output* untuk keperluan proses secara berurutan dan tepat), *monitoring plant* (secara terus-menerus melakukan *monitoring* untuk mengambil tindakan sehubungan dengan proses yang dikontrol dan menyampaikannya ke *operator* sebagai pesan).

Programmable Logic Controller (PLC) pada perancangan ini memanfaatkan Festo Fluidsim ver 4.2p/1.67 *Hydraulics* yang merupakan *software* aplikasi yang digunakan untuk membuat jaringan sistem pneumatik, listrik, dan sistem hidrolik dengan bantuan simulasi mekanisme. Selain itu, arsitektur pemrogramannya lebih mudah mudah digunakan dengan memahami operasi logika atau gerbang logika sebagaimana dijelaskan pada konsep PLC tersebut.

Mesin Press Hidrolik

Pada dasarnya mesin *press* berfungsi untuk melakukan penekanan seperti: *drawing, punching, blanking, fitting, shearing, bending, forging* dan lainnya. Mesin *press* tersebut memanfaatkan tenaga hidrolik untuk menaikkan atau menurunkan *slide* dengan memakai sistem fluida yang dialirkan ke *hydraulic cylinder* begitupun *die cushion custom*, semua kontrolnya menggunakan *valve* hidrolik. Sistem fluida digerakkan oleh pompa yang berfungsi untuk memompa oli dari tangki untuk kemudian diteruskan ke silinder. Untuk mengendalikan besar kecilnya tekanan, kecepatan silinder digunakan jenis *valve* yang sesuai.

Silinder hidrolik *linier* digunakan untuk mengubah tenaga hidrolik menjadi gaya mekanik linier. Silinder *double acting* memungkinkan untuk pemakaian gaya hidrolik dalam dua arah. Akan tetapi langkah *retractnya* memberikan gaya yang lebih kecil dari langkah *extendnya*, hal ini yang menyebabkan

gaya yang terjadi tidak akan sama.

Kecepatan silinder *double acting* dapat dijelaskan dengan menggunakan perumusan aliran sebagai berikut:

$$V = Q_E/A = Q_E/(A-a) \quad (1)$$

Dimana:

$$A = \text{Area pada full bore} = \pi/4 \times D^2$$

$$A-a = \text{Area annulus} = (\pi/4) \times (D^2 - d^2)$$

$$Q_E = \text{Aliran kedalam ujung silinder full bore ketika extend } (P_1)$$

$$Q_R = \text{Aliran keluar ujung silinder full bore ketika extend } (P_1)$$

$$q_E = \text{Aliran dari ujung annulus silinder ketika extend } (P_2)$$

$$q_R = \text{Aliran dari ujung annulus silinder ketika retract } (P_2)$$

Berdasarkan persamaan tersebut debit aliran dari ujung *annulus* silinder dapat ditentukan dengan perumusan ,

$$q_E = Q_E (A-a)/A \quad (2)$$

Dengan cara yang sama, maka debit aliran pada saat *retract* dapat ditentukan sebagai berikut,

$$q_R = Q_R (A-a)/A \quad (3)$$

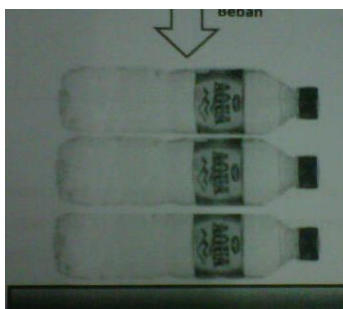
Pipa hidrolis yang dipergunakan dibentuk dari lapisan karet atau thermoplastic yang diperkuat oleh kawat besi dengan lapisan perlindungan akhirnya karet atau plastik. SAE100R2 dan yang merupakan salah satu pipa hidrolis yang paling direkomendasikan dibanding SAE100R1 dan digunakan untuk pekerjaan tekanan rendah, sedangkan untuk yang *multispiral* digunakan untuk kondisi tekanan yang tinggi. Untuk ukuran reservoir yang digunakan berdasarkan ketetapan standar, yaitu 3-5 kali *flow rate* maksimumnya.

Data Perencanaan dan Pengujian Awal

Pada perencanaan mesin *press* tersebut, berdasarkan hasil pengukuran panjang dan berat didapatkan data dimensi botol yang digunakan sebagai berikut: tinggi botol = 20 cm, diameter botol = 6 cm, berat botol = 15 gram, tebal awal sebelum di *press* = 3 mm, setelah di *press* = 1.5 mm, cylinder stroke = 2.8 m (posisi awal silinder berjarak 30 cm dari permukaan benda), dimensi tumpukan botol = 0.8 m x 0.8 m x 3 m (ruang di dalam mesin *press*). Botol diletakkan pada posisi tengkurap secara horizontal.

Jumlah botol pada dasar ruang silinder menjadi 52 botol, sedangkan pada tumpukan atasnya menjadi 50 botol, sehingga total botol pada ruang dalam mesin *press* 52 x 50 = 4000 botol. Berat total botol dalam ruang mesin *press* dapat ditentukan, yaitu: 4000 botol x 15 gram/botol = 60 kg.

Agar besar gaya total yang digunakan untuk menekan botol dilakukan eksperimen awal dalam jumlah beberapa botol yang ditumpuk secara vertikal dan diberikan beban bervariasi sampai memiliki ketebalan 1/6 dari ukuran sebelumnya. Metode experiment yang dilakukan digunakan untuk mendapat gaya total yang dibutuhkan dengan melakukan simulasi beban yang merupakan fungsi dari $F = f$ (jumlah botol, beban yang diberikan) sesuai yang diharapkan.



Gambar 2. Beban Tekan Experiment Awal

Berdasarkan hasil pengujian tersebut diperoleh beban yang dibutuhkan untuk memadatkan 50 tumpukan botol adalah 2509 kg (24588.2N), karena beban yang dikenakan hanya untuk luasan untuk satu botol, maka tekanan (P) terhadap permukaannya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P = F/A \quad (4)$$

$$A = \text{Keliling botol}/2 = 0.5 \pi \cdot D \cdot t \quad (5)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut maka diperoleh besarnya tekanan yang dibutuhkan sebesar 13.1 bar (1.305.106,15 Pa), tekanan yang sama juga dikenakan pada proses pemadatan dengan luasan 1 m x 1 m, maka gaya yang dibutuhkan untuk mesin *press* tersebut untuk luasan total mesin *press* tersebut dapat dihitung dengan persamaan (4), $F = P \times A = 1305106 \text{ (N/m}^2\text{)} \times 1 \text{ m}^2 = 1.305.106,15 \text{ N}$

Sedangkan beba mesin *press* yang harus ditekan silinder hidrolis dapat ditentukan sebagai berikut:

$$F_{\text{aktual}} = 1.1 F_{\text{teoritis}} \quad (6)$$

Dari persamaan (6) tersebut diperoleh gaya aktualnya sebesar 1.435.500 N, pada perancangan ini digunakan lempeng penekan berdimensi 0.9 m x 0.9 m x 0.9 m dengan menggunakan bahan S45C ($\rho = 7.8 \text{ gr/cm}^3$), sehingga massa totalnya sebesar 1.887 kg (18511,47 N), sehingga diperoleh gaya total yang dibutuhkan mesin *press* pada permukaan per meter persegi $F = F_{\text{aktual}} + F_{\text{Lempeng penekan}} = 1.435.500 \text{ N} + 18.511.47 \text{ N} = 1.4540.11,47 \text{ N}$

Gaya *buckling load* diperlukan untuk menentukan diameter *rod piston* yang digunakan pada saat piston ditekan, ditentukan dengan persamaan di bawah ini,

$$F_{\text{buckling}} = (\pi^2 \cdot E \cdot J) / L^2 \times (1/SF) \quad (7)$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Steel ASTM-36)}$$

$$J = \pi d^4 / 64 \quad (8)$$

$$L = 2 \times \text{cylinder stroke} = 2 \times 2.8 = 5.6 \text{ m} \quad (9)$$

$$SF = \text{Faktor keamanan, } 3 < SF < 5 = 3.5$$

Dengan menyelesaikan persamaan (7) di atas maka didapatkan diameter *rod piston*nya 199,3 mm, berdasarkan hasil perhitungan sengan menggunakan standar BS5785:1980 diambil *rod diameter* yang mendekati 200 mm, dan diameter piston rekomendasi (tipe *large*) sebesar 320 mm untuk meminimalkan tekanan pada permukaan piston. Berdasarkan perhitungan tersebut maka diperoleh tekanan *extend* (P_1) sebesar 178.4 bar, sedangkan tekanan *retract* (P_2) untuk mengangkat lempeng hanya sebesar 3.6 bar.

Untuk menentukan Q_E dan Q_R dapat digunakan persamaan sebelumnya dimana penetapan fase waktu untuk mendorong atau $t_{\text{extend}} = 30$ detik, sedangkan fase untuk diam (silinder tetap di dasar stroke untuk menekan tumpukan botol selama 5 detik.

Kecepatan silinder *full bore* = panjang *stroke*/waktu = 2.8 m / 30 s = 0.0933 m/s, sehingga $Q_E = 450$ liter/menit (0.00749 m^3/s), sehingga dapat ditentukan aliran cairan hidrolis dari ujung *annulus* silinder saat *extend* $q_E = 272$ liter/menit, selanjutnya untuk langkah *retract* kecepatan dapat dihitung sesuai persamaan,

$$V_{\text{retract}} = Q_E / (A-a) = 0.00749 / 0.048984 = 0.153 \text{ m/s} = 9.18 \text{ m/min} \quad (10)$$

$$Q_R = A \cdot V_{\text{retract}} = 737.9 \text{ liter/min} \quad (11)$$

Pompa yang dipergunakan dengan memperhatikan aliran fluida yang masuk $Q_E = 450$ liter/menit, dengan menggunakan katalog pompa jenis *axial piston fixed pump* dengan merk *Rexroth Bosch*, dengan tipe 355 dengan debit aliran maksimal 469 liter/menit dengan tekanan kerja maksimal 350 bar menghasilkan daya maksimal 368 HP, massa pompa 110 kg.

Housing atau selang yang dipergunakan untuk fluida hidrolis menggunakan *synthetic rubber tube* (SRT) dengan 4 *spiral wires* dan memiliki diameter 5/8 inch, hal tersebut berdasarkan pertimbangan tekanan pompa 350 bar (*max*) dengan fluida yang dipergunakan pada sistem hidrolis *mineralized oil* ($\rho_{\text{oil}} = 0.85 \text{ g/ml}$).



Perhitungan kapasitas reservoir berdasarkan perumusan 3-5 kali *flow rate* maksimum, maka pada perancangan ini digunakan diperoleh $V_{reservoir} = 5 \times 450 \text{ L} = 2250 \text{ L} (2.25 \text{ m}^3)$, sehingga berat *reservoir* bisa ditentukan sebesar,

$$W_{reservoir} = \rho_{oil} \times V_{reservoir} \times 9.82 = 18761 \text{ N} \quad (12)$$

Perhitungan tebal kolom *support* yang digunakan untuk menahan beban komponen hidrolik yang berada di bagian atasnya seperti: pompa hidrolik, silinder tekan (*steel AISI 1018*, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$), *reservoir* cairan hidrolik, dan lempeng penekan didetailkan perhitungannya sebagai berikut,

$$\text{Berat pompa hidrolik (katalog)} = 110 \text{ kg} \times 9.82 \text{ m/s}^2 = 1.079,1 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat silinder penekan} &= (\text{massa piston} + \text{massa dinding silinder}) \times 9.82 \text{ m/s}^2 \\ &= (696,6 \text{ kg} + 998,4 \text{ kg}) \times 9.82 \text{ m/s}^2 \\ &= 1.66.627,95 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\text{Berat reservoir} = 18.761 \text{ N}$$

$$\text{Berat lempeng penekan} = 18.511.47 \text{ N}$$

Total beban yang ditanggung oleh kolom *support* = 54126.05 N, jika ada 4 kolom maka tiap kolomnya menahan beban masing masing sebesar 13.531 N.

Defleksi yang diizinkan pada kolom *support* = 0.1 mm, dengan panjang kolom 3.3 m (ditetapkan), *strain* atau regangan menjadi,

$$\varepsilon = \delta/L \quad (13)$$

$$= 0.0001/0.1 = 3.03 \text{ E-5}$$

Kolom dirancang menggunakan bahan ASTM A-36, dengan *Modulus Young*, $E = 200 \text{ Gpa}$, sesuai persamaan hukum *Hooke*,

$$\Sigma \sigma = \varepsilon \cdot E \quad (14)$$

Dengan mengacu ke persamaan (14) maka diperoleh besarnya $\sigma = 6.060.000 \text{ N/m}^2$

Untuk diameter kolomnya dapat ditentukan menggunakan persamaan (14) di atas, dengan terlebih dahulu menentukan luas permukaan beban *compressive* yang dikenainya, $A = 2.03 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Diameter kolom *support* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut,

$$A = (\pi/4) \times d^2 \quad (15)$$

Sehingga diameter kolomnya minimal yang dipergunakan pada perancangan *supportnya* sebesar 0.05 m

Rancangan Mekanisme Hidrolik Mesin Press dengan Festo Fluidsim

Pada perancangan ini mengacu kepada kombinasi dari beberapa mesin *press* yang banyak dipergunakan di lapangan sebagaimana ditampilkan pada beberapa rancangan berikut.

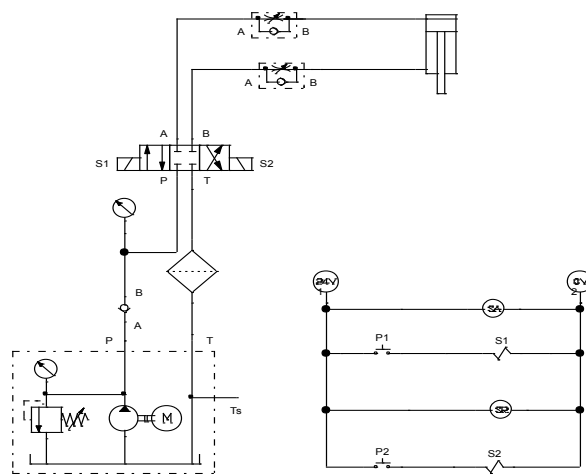


Gambar 3. Tipe Mesin Press Acuan Berbagai Produk

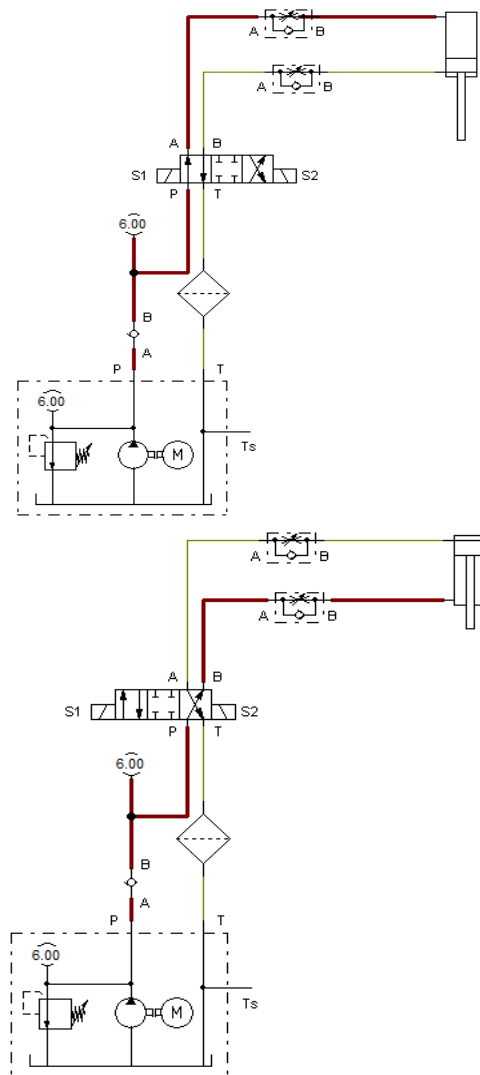
Dengan menggunakan *software Festo Fluidsim* tersebut maka diperoleh rancangan mekanisme sistem hidrolik mesin press tersebut sesuai mekanisme di bawah ini,

Bilamana Tombol Push Button (P_1) sebagaimana yang terdapat pada *ladder diagram* tersebut ditekan, maka solenoid S1 pada katup 4/3 menyebabkan aliran mengalir menuju *full bore* silinder dan melakukan langkah *extend* untuk memberi

tekanan pada ruang mesin press tersebut, selanjutnya bila tombol *push button* (P_2) ditekan maka silinder aktuaternya melakukan langkah *retract* dimana aliran mengalir menuju tangki *reservoir*. Seterusnya langkah tersebut dapat dilakukan berulang-ulang sesuai *dengan* kapasitas yang diharapkan.

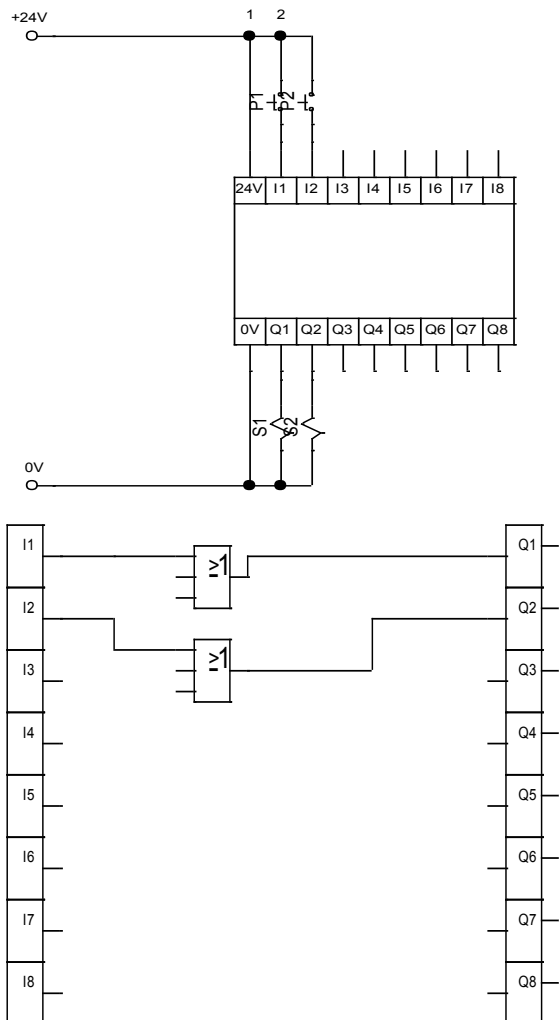


Gambar 4. Rancangan Mekanisme Sistem Mesin Press dengan *Diagram Ladder*



Gambar 5. Langkah *Extend* dan Langkah *Retract* Mesin Press

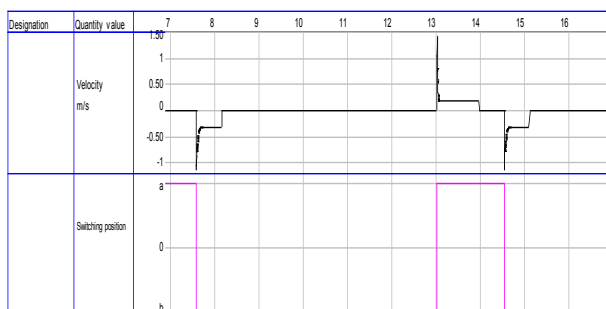
Selanjut untuk PLC FluidSim dapat dibangun dengan menggunakan truth table untuk *logic modul*nya menggunakan gerbang logika atau persamaan *digital control* sebagaimana penjelasan di bawah ini.



Gambar 6. Rancangan PLC menggunakan Kontrol Module "OR"

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dengan melakukan simulasi normalisasi pada sistem mesin press tersebut maka diperoleh velocity dari mesin press tersebut ketika tombol push button P_1 dan P_2 ditekan, PLC Fluidsim Kontrol dapat bekerja dengan baik untuk melakukan langkah extend dan retract untuk pressing sampah plastik



Gambar 7. Hasil Normalisasi Diagram Velocity dengan Switching Position

Proses *switching solenoid valve* menentukan kecepatan atau *velocity* yang dapat dibangkitkan ketika mesin *press* tersebut melakukan langkah *extend* dan *retract*. Pada sistem konvensional di sini respon push button selang t detik menentukan kondisi posisi silinder rod secara *real time*.

4. KESIMPULAN

Dengan menggunakan simulasi tersebut akan dapat dengan mudah dibangun kebutuhan untuk rancangan mekanisme mesin *press* yang diinginkan setelah terlebih dahulu menentukan kebutuhan gaya yang dibutuhkan, tipe pompa yang dipergunakan dan kapasitasnya, tipe *valve* yang dipakai, sistem *housing* (selang), *pressure relief valve*, *filter*, *one way* dan selanjutnya kekuatan strukturnya seperti kolom *support* dapat diperhitungkan akibat pembebanan yang diberikan

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] P Crosser, "Pneumatic Tingkat Dasar" Festo Indonesia, 1994
- [2] D Waller, H Werner, "Electropneumatic Workbook Basic Level, Festo Didactic GmbH, 2002
- [3] Michael J Pinches, John G Ashby, "Power Hydraulic", Prentice Hall International, 1988
- [4] D Merkle, "Electrohydraulics Basic level", Festo Didactic GmbH, 1994

PENGEMBANGAN DESAIN SEPEDA UNTUK PASIEN PASCA STROKE

Tri Andi Setiawan, I Made Londen Batan

Labolatorium Perancangan dan Pengembangan Produk

Kampus ITS Sukolilo Surabaya 60111

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS

Phone: +6285648504313

E-mail: triandis@ymail.com, londbatan@me.its.ac.id

ABSTRAK

Beragam jenis dan model alat bantu terapi stroke telah diciptakan untuk penderita pasca stroke, salah satunya adalah alat bantu terapi fisik statis, dimana penderita akan melakukan terapi pada tempat tetap. Alat bantu terapi statis cenderung hanya digunakan untuk melatih organ kaki tidak untuk organ badan bagian atas. Selain itu alat bantu terapi statis sehingga menimbulkan kejenuhan bagi pemakai karena sifatnya statis dan minimnya variasi gerakan akan membuat pasien mudah bosan. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan desain sepeda roda tiga yang difungsikan selain dapat digunakan sebagai alat bantu terapi dapat juga difungsikan sebagai sarana mobilitas dan media hiburan. Metode pengembangan yang digunakan adalah pengembangan produk terintegrasi, yaitu evaluasi terhadap produk existing melalui observasi dan wawancara kepada 10 responden, serta berdasarkan penelitian yang terkait masalah kebutuhan penderita pasca stroke terhadap alat bantu terapi fisik. Pada pengembangan ini dibuat 2 buah konsep sepeda yang selanjutnya dilakukan analisa fungsi dan kekuatan, kemudian dipilih berdasarkan kriteria dimensi umum, dimensi lipat, berat, radius belok, keamanan dan kenyamanan. Konsep terpilih selanjutnya dirancang lebih detail dan dibuat dokumen dalam bentuk gambar teknik. Dari penelitian ini dihasilkan sebuah desain sepeda roda tiga sebagai alat bantu terapi fisik dan alat transportasi bagi penderita pasca stroke yang ringan, bisa dilipat, sehingga mudah untuk dibawa dan disimpan di dalam bagasi mobil, serta memiliki radius belok yang lebih kecil. Dari rancangan alat terapi ini diharapkan dapat dijadikan sebagai referensi dalam pembuatan alat bantu terapi fisik berupa sepeda roda tiga untuk penderita pasca stroke.

Kata kunci: alat bantu terapi fisik, pasca stroke, sepeda roda tiga, transportasi

1. PENDAHULUAN

Stroke atau yang dalam bahasa Inggris dikenal dengan *cerebrovascular accident* (CVA) adalah suatu keadaan dimana suplai darah ke otak mengalami gangguan. Dalam jaringan otak, kurangnya aliran darah menyebabkan serangkaian reaksi biokimia, yang dapat merusakkan atau mematikan sel saraf otak. Dengan kemajuan teknologi, stroke lebih sering meninggalkan kecacatan dibanding kematian. Beban biaya yang harus ditanggung akibat stroke sangatlah besar bagi pasien dan keluarganya, tidak hanya berhenti sampai di situ saja efek dari penyakit stroke akan semakin berat setelahnya, apa lagi penderita pasca serangan stroke meninggalkan cacat yang berat, penderita dan keluarga akan semakin terbebani, rehabilitasi yang dilakukan pada pasien stroke semakin lama akan semakin aktif disesuaikan dengan keadaan kesehatan pasien. Peranan keluarga sangat penting dalam program rehabilitasi stroke di rumah. Ketika penderita stroke sudah kembali ke rumah penderita stroke akan lebih banyak berinteraksi dengan keluarganya dibandingkan dengan terapis yang hanya datang beberapa jam ke rumah (Brass, 1992). Keberhasilan program rehabilitasi sangat tergantung pada peran terapis dan pelaksananya. Jenis teknologi yang banyak diteliti dalam upaya menciptakan rehabilitasi berbasis teknologi untuk melatih anggota gerak adalah suatu alat terapi kayuh yang sangat sederhana, penderita hanya tinggal duduk di kursi dan alat terapi diletakkan di hadapan penderita, terapi sepeda statis ini dapat digunakan pada pasien yang sakit stroke saja melainkan diperuntukkan juga untuk penderita pengapuran, nyeri lutut, atau pasca kecelakaan untuk melatih kaki, lutut atau persendiannya. Seperti yang terlihat pada Gambar 1 alat ini dilengkapi dengan pengaturan berat kayuhan & pengatur panjang. dengan berat 4 kg dan ukuran 65 x 65 x 35 cm alat ini cukup ringan dan kecil.



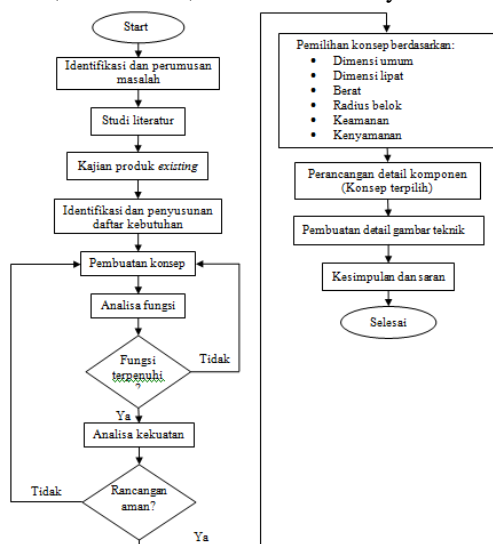
Gambar 1. Alat Terapi Sepeda Statis

Untuk pemakaian jangka panjang, alat terapi statis akan banyak menimbulkan berbagai permasalahan terkait kondisi kejiwaan pasien yang cenderung tidak terkontrol dan mudah emosi, variasi gaya terapi sangat diperlukan untuk menghindari timbulnya kejenuhan dalam pemakaian terapi statis yang cenderung monoton, oleh karena itu dalam penelitian ini akan dikembangkan suatu desain konsep alat bantu terapi fisik dengan model sepeda roda tiga, tujuan aplikasi dari sepeda tersebut selain dapat digunakan sebagai alat bantu terapi fisik dapat juga digunakan untuk sarana mobilitas atau berpindah tempat. Dari rancangan alat terapi ini diharapkan dapat dijadikan referensi dalam pembuatan alat bantu terapi fisik berupa sepeda roda tiga untuk penderita pasca stroke dalam terapi fisik, peregangan otot dan sarana mobilitas.

2. METODOLOGI

Permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya adalah upaya dalam pengembangan peralatan bantu terapi berupa sepeda roda tiga untuk penderita stroke. Masalah yang

dirumuskan dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang suatu alat terapi fisik sepeda roda tiga untuk penderita pasca stroke yang ringan, dapat dilipat, memiliki radius belok kecil, sehingga dapat dipindahkan dengan mudah dan dapat digunakan untuk terapi fisik pasien pasca stroke. Studi literatur mencakup mengenai pendalaman pemahaman tentang penyakit stroke serta upaya dalam rehabilitasinya dan berbagai konsep yang berhubungan dengan perancangan dan pengembangan produk untuk terapi fisik pasca stroke. Kajian produk *existing* dilakukan pada alat bantu terapi statis pasca stroke guna mendapatkan data awal mengenai spesifikasi ukuran, dan bentuk model. Daftar kebutuhan rancangan didapatkan dari observasi dan wawancara pada 10 responden, observasi dilakukan dengan meminta responden untuk mencoba alat terapi statis, kemudian responden diminta untuk memberikan tanggapan mengenai kenyamanan, kemudahan pengoperasian, fungsional serta responden diberi kesempatan untuk menyampaikan keinginan dari desain mengenai pengembangan sepeda terapi roda tiga yang akan datang. Selain itu daftar kebutuhan juga disusun berdasarkan referensi dari sumber-sumber lain yang relevan. Berdasarkan daftar kebutuhan maka kemudian dirancang 2 konsep alternatif sepeda roda tiga yang diharapkan mampu memberikan terapi secara maksimal kepada pasien, dan dapat pula digunakan sebagai sarana hiburan dan alat bantu mobilitas bagi penderita. Dari konsep tersebut kemudian dilakukan Analisa fungsi yang bertujuan untuk mengetahui apakah dari konsep yang dibuat dapat berfungsi atau tidak, yaitu secara fungsional (mekanisme gerak sepeda) maupun secara operasional (fungsi gerak sepeda terhadap pengendara). Sedangkan analisa kekuatan rangka bertujuan untuk mengetahui, apakah rangka pada konsep sepeda yang telah dirancang aman untuk digunakan, pembebanan rangka akibat beban pengendara yang di asumsikan sebesar 100 kg, analisa kekuatan rangka dilakukan dengan bantuan *software* CATIA. Dalam pemilihan konsep, kriteria konsep yang digunakan adalah dipilih yaitu berdasarkan: Dimensi umum, dimensi lipat, berat, radius belok, keamanan dan kenyamanan.



Gambar 2. Diagram alir pengembangan sepeda untuk pasien pasca stroke

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menyusun daftar kebutuhan rancangan sepeda telah dilakukan observasi dan wawancara pada 10 responden, observasi dilakukan dengan meminta responden untuk

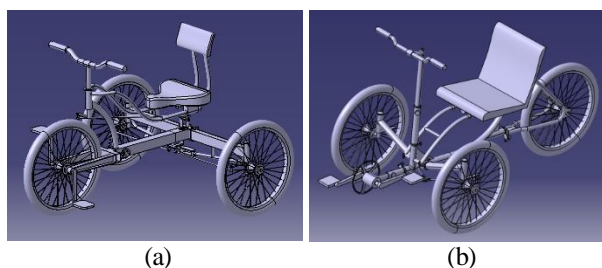
mencoba alat bantu terapi statis, kemudian responden diminta untuk memberikan tanggapan mengenai kenyamanan, kemudahan pengoperasian, fungsional serta responden diberi kesempatan untuk menyampaikan keinginan dari desain mengenai pengembangan sepeda terapi roda tiga yang akan datang. Pada observasi dan wawancara ini responden dipilih dari orang yang kondisi fisiknya normal, bukan penderita stroke, hal ini bertujuan untuk mendapatkan suatu alat terapi yang mengacu pada kondisi fisik secara normal, sehingga diharapkan pemakai (penderita stroke) perlahan akan terlatih memposisikan badan seperti orang normal. Hasil observasi dan wawancara dari ke sepuluh responden kemudian disusun dalam daftar kebutuhan dan dijadikan dasar penyusunan dari pengembangan alat terapi fisik.

Tabel 1. Daftar kebutuhan produk sepeda tertapi fisik

DAFTAR KEBUTUHAN PRODUK SEPEDA TERAPI FISIK PASIEN PASCA STROKE		
S/H	Uraian Kebutuhan	Penanggung jawab
S	1. Model roda tiga (fungsi):	Semua Tim
S	a. Sepeda dapat dikendarai dengan duduk, layaknya seperti duduk di kursi biasa.	
S	b. Sepeda memenuhi fungsi terapi, yaitu gerak kaki dan gerakan pada tangan.	
H	c. Sepeda tetap dalam kondisi seimbang jika pengendara melakukan gerakan.	
S	d. Sepeda dapat digunakan sebagai sarana transportasi untuk pindah tempat dan mempunyai radius belok dibawah 3 meter.	
H	e. Bisa dilipat	
	f. Ukuran kecil sehingga masuk di bagasi mobil	
S	2. Kekuatan dan Keamanan	Tim Desain
S	a. Mampu menahan berat total 100kg.	
S	b. Aman digunakan	
H	c. Tidak mudah rusak	
H	3. Ergonomis	Tim Desain
H	a. Mudah dan Nyaman dikendarai	
H	b. Resiko cidera kecil bagi pengguna	
H	c. Mudah di parkir di segala tempat	
S	4. Manufaktur dan Perakitan	Tim Manufaktur
S	a. Bisa dibuat	
S	b. Bisa dirakit	
H	5. Maintenance	Semua Tim
H	a. Mudah dirawat dan di bersihkan	
H	b. Mudah untuk direparasi	
H	c. sparepart mudah didapat	

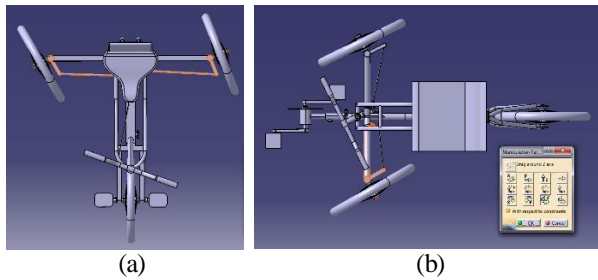
Keterangan: S: Sarat, H: Harapan

Berdasarkan daftar kebutuhan tersebut seperti terlihat pada Gambar 3 disusunlah 2 konsep sepeda roda tiga dengan bentuk konsep sebagai berikut:



Gambar 3. (a) Konsep 1, (b) Konsep 2

Sebagai langkah awal memilih konsep 2 konsep tersebut kemudian dilakukan analisa pada mekanisme gerak sepeda, dengan memanfaatkan analisa fungsi *toolbar clash* pada *software* CATIA, fungsi tersebut digunakan untuk membatasi gerak simulasi kinematik dari mekanisme suatu sistem, jika dalam mekanisme gerak belok pada sistem kemudi terjadi persinggungan terhadap komponen lain akan segera terdeteksi.



Gambar 4. Analisa fungsi gerak kemudi posisi belok maksimal konsep 1 dan 2

Rangka dirancang menggunakan material *steel*, *structural* ASTM A-36, dengan modulus elastisitas $200 (10^9 \text{ N/m}^2, \text{Gpa})$ *ultimate tensile strength* sebesar $400 (10^6 \text{ N/m}^2, \text{Mpa})$ dan *yield strength* $250 (10^6 \text{ N/m}^2, \text{Mpa})$. Analisa kekuatan rangka bertujuan untuk mengetahui, apakah rangka pada konsep sepeda yang telah dirancang aman untuk digunakan, pembebanan rangka akibat beban pengendara yang di asumsikan sebesar 100 kg, analisa kekuatan rangka dilakukan dengan bantuan *software* CATIA. Dari hasil simulasi akan didapatkan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada rangka, dengan perhitungan tegangan von mises selanjutnya dilakukan evaluasi kegagalan material akibat pembebanan. Untuk mengevaluasi hasil rancangan digunakan persamaan 1 yaitu:

$$\sigma_t \text{ maksimum} \leq \frac{S_{ut}}{N} \quad (1)$$

σ_t = Tegangan tarik maksimum desain

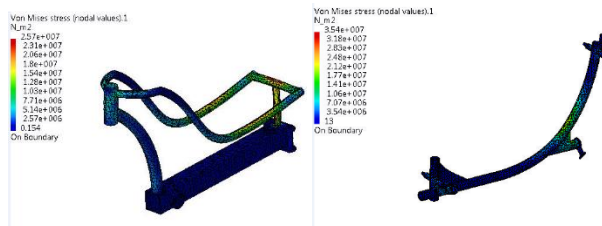
S_{ut} = Tegangan tarik maksimum material

N = Faktor Keamanan

Tegangan maksimum yang terjadi dihitung dan disbandingkan dengan tegangan ijin dimana factor keamanan yang dirancang sebesar 3

$$\sigma_t \text{ maksimum} \leq \frac{3,7 \times 10^8 \text{ N/m}^2}{3} = 1,23 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

Sebagai verifikasi dari perhitungan tegangan, dilakukan simulasi tegangan yang terjadi pada rangka sepeda



Gambar 5. Simulasi tegangan rangka konsep 1 dan konsep 2

Dari hasil perhitungan didapat tegangan maksimum pada rangka didapatkan nilai tegangan pada Konsep 1= $2.11 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, Konsep 2 = $3.34 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, Konsep 3 = $2.57 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, Konsep 4= $3.54 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, dan konsep 5= $1,02 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, nilai tersebut lebih kecil dari tegangan maksimum dari material sebesar $1,23 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. Jadi dapat disimpulkan bahwa kelima konsep memiliki rangka yang aman untuk digunakan.

Pemilihan Konsep

- Berdasarkan Dimensi Umum

Yaitu terkait dengan ukuran panjang dan lebar total dari masing-masing rancangan, panjang dan lebar akan menentukan luasan yang dibutuhkan dalam operasional atau

pemanfaatan sepeda, dimensi yang kecil akan lebih mudah digunakan diberbagai tempat dengan akses sempit, , konsep 1 memiliki ukuran panjang 1330 mm, lebar 1090 mm dan tinggi 890 mm, konsep 2 memiliki ukuran panjang 1490 mm, lebar total 860 mm dan tinggi total 917.

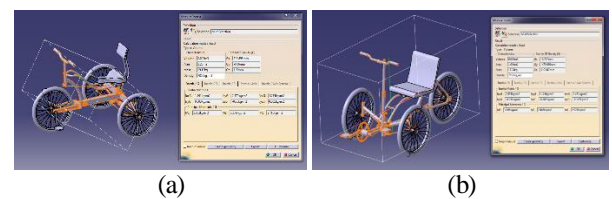
- Dimensi Lipat

Tabel 2. Dimensi umum dan dimensi lipat

Konsep	Dimensi awal (mm)			Dimensi lipat (mm)		
	Panjang	Lebar	Tinggi	Panjang	Lebar	Tinggi
1	1330	1090	890	1200	715	890
2	1490	860	917	878	865	870

- Berat Rangka

Dengan memanfaatkan *software* CATIA berat masing-masing konsep dihitung dan dapat dilihat pada Gambar 5.

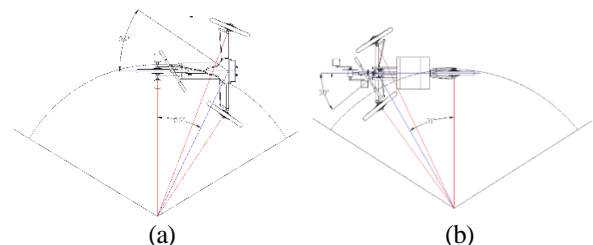


Gambar 5. Simulasi berat rangka konsep 1 dan 2

Dari hasil simulasi 3D model didapat berat rangka dari konsep 1 =19kg, dan konsep 2 =17,74kg

- Radius Belok

Pada analisa radius belok digunakan sebagai parameter pemilihan konsep, dimana persamaan yang dapat digunakan terlihat pada persamaan 2



Gambar 6. Derajat belok konsep 1 dan 2

$$R_{ack} = \frac{a+b}{\delta f} 57,29 \quad (2)$$

R_{ack} : radius belok ideal

a : jarak sumbu roda depan dengan posisi titik berat rangka

b : jarak sumbu roda belakang dengan posisi titik berat rangka

δf : derajat belok

Hasil analisa radius belok diketahui konsep 1 memiliki radius belok sebesar 1,36m dan konsep 4 sebesar 1,4m

- Kriteria Keamanan (Analisa guling)

Kriteria keamanan ditentukan dengan mencari besarnya nilai kecepatan maksimal yang diijinkan agar tidak terguling saat berbelok dengan persamaan 3 yaitu sebagai berikut:

$$V_{g \text{ max}} = \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot t}{2h}} \quad (3)$$



Vg max : kecepatan maksimal
R : radius belok
g : gaya gravitasi
t : jarak antar kedua roda depan
h : tinggi titik berat

Berdasarkan persamaan tersebut diketahui konsep 1= 12 km/jam, konsep 2= 13km/jam. Selain itu kriteria aman ditentukan juga dari tinggi titik berat dan cidera akibat benturan.

• Kriteria Kenyamanan

Untuk menentukan nilai kenyamanan dilakukan perhitungan nilai resiko cidera tubuh pengendara menggunakan metode RULA dengan bantuan *software* CATIA V5, kenyamanan yang dimaksud adalah mengenai posisi postur badan saat berkendara, sudut persendian saat posisi diam ataupun bergerak, analisa menggunakan ukuran manusia asia dengan tinggi badan 180 cm, berat badan 80 kg. Hasil analisa disusun dalam Tabel 3, analisa dilakukan pada posisi pengendara diam, mengayuh pedal dan berbelok dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 3. Analisa RULA posisi diam, mengayuh, dan berbelok.

Details	Diam		Mengayuh				Berbelok			
	K1	K2	K1		K2		K1		K2	
			L	R	L	R	L	R	L	R
Upper Arm	1	1	2	1	1	1	3	3	1	2
Forearm	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2
Wrist	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wrist Twist	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Neck	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Trunk	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2
Leg	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Final Score	2	2	3	2	2	2	3	3	2	3

Setelah dilakukan evaluasi dan analisa pada masing-masing konsep berdasarkan berbagai aspek disusun rangkuman hasil analisa dan evaluasi yang dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 4. Pemilihan konsep

Kriteria Seleksi	Konsep	
	Konsep 1	Konsep 2
Dimensi Umum	1330x1090x890	1490x860x917
Dimensi Lipat	1200x715x890	878x865x870
Berat	19kg	17.74
Radius Belok	1.36m	1.4m
Analisa Guling	12 km/jam	13 km/jam
Kenyamanan	2(nilai RULA)	2(nilai Rula)

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisa pada masing-masing konsep didapat bahwa konsep 2 adalah konsep terpilih. Selanjutnya konsep terpilih tersebut dirancang lebih detail dan didokumentasikan dalam bentuk gambar teknik.

4. KESIMPULAN

Dari pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari 2 konsep yang telah dirancang, setelah dilakukan analisa menurut fungsi dan kekuatan rangka pada masing-masing konsep kemudian berdasarkan matrik penilaian

yaitu berdasarkan dimensi umum, dimensi lipat, berat, radius belok, keamanan dan kenyamanan maka alternatif konsep yang dipilih adalah konsep ke 2.

2. Nilai tingkat resiko cedera dengan metode RULA antara 2-3, artinya sepeda masuk dalam kategori nyaman untuk digunakan.
3. Sepeda konsep terpilih (konsep 2) memiliki berat rangka 17.74kg, dengan radius belok 1.4 m, dimensi umum = 1490mm x 860mm x 917mm, dimensi lipat = 878mm x 865mm x 870mm.
4. Rangka dirancang dengan menggunakan material *steel*, *structural* ASTM A-36, dengan modulus elastisitas 200 (10^9 N/m², Gpa), *yield strength* 250 (10^6 N/m², Mpa), *ultimate tensile strength* sebesar 400 (10^6 N/m², Mpa) dan *Density* sebesar 7860kg/ m³.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Batan, I.M.L. (2012), *Desain Produk*, Edisi Pertama, Guna Widya, Surabaya.
- [2] Edmans, J. A. Gladman, J. R. F. Cobb, S. Sunderland, A., Pridmore, T., Hilton, D.Walker, M. F., (2006) *Validity of a Virtual Environment for Stroke Rehabilitation. Stroke*, vol.37 No.11, hal. 2770–2775.
- [3] Hariandja, J.R.O. (2013), *Identifikasi Kebutuhan Akan Sistem Rehabilitasi Berbasis Teknologi Terjangkau Untuk Penderita Stroke Di Indonesia*, Parahyangan: Universitas Katolik Parahyangan. 9174, hal. 191-196.
- [4] McAtamney, Lynn and Corlett, E Nigel, (1993), “RULA: A Survey Method for Investigation of Work-related Upper Limb Disorders”, *Applied Ergonomics*, vol. 24 No. 2, hal.91-99.
- [5] Sutantra, I Nyoman, (2000), *Teknologi Otomotif, Teori dan Aplikasinya*, Guna Widya, Surabaya.

OPTIMASI JUMLAH *COMPARTMENT* TANGKI TRUK BAHAN BAKAR MINYAK DENGAN MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT APPLICATION*

Willyanto Anggono¹⁾, Adi Sanjaya²⁾, Fandi Dwiputra Suprianto³⁾, Tubagus Putra Wijaya⁴⁾

Jurusan Teknik Mesin Universitas Kristen Petra^{1,2,3,4)}
Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia^{1,2,3,4)}
Phone: 0062-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658^{1,2,3,4)}
E-mail : willy@petra.ac.id¹⁾

ABSTRAK

Tangki truk bahan bakar minyak adalah tangki yang terdapat pada truk yang didesain untuk mengangkut muatan bahan bakar minyak di jalan raya. Untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan bahan bakar minyak untuk beberapa jenis bahan bakar dalam satu kali perjalanan, tangki truk menjadi beberapa ruangan (*compartment*) dengan menggunakan sekat (partisi) sehingga dalam satu kali perjalanan pengiriman bahan bakar minyak dapat mengangkut beberapa macam bahan bakar minyak. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan jumlah *compartment* optimum pada tangki truk bahan bakar minyak serta menentukan pengaruh jumlah *compartment* terhadap tegangan yang terjadi pada tangki truk bahan bakar minyak dengan menggunakan ANSYS software (*Finite Element Application*). Berdasarkan hasil penelitian menggunakan tangki truk bahan bakar minyak berkapasitas 24000 liter dengan penampang elips dan trapesium dengan jumlah *compartment* untuk tangki truk dengan bentuk penampang elips dan trapesium masing-masing adalah 3 *compartments*, 4 *compartments* dan 5 *compartments*, dapat disimpulkan bahwa jumlah *compartment* optimum pada tangki truk bahan bakar minyak dengan bentuk penampang elips maupun trapesium adalah sebanyak 5 *compartments*. Peningkatan jumlah *compartment* akan menurunkan tegangan maksimum yang terjadi serta meningkatkan angka keamanan pada tangki truk bahan bakar minyak. Proses desain dengan menggunakan ANSYS software (*Finite Element Application*) sesuai dengan pendekatan *sustainable product development* atau pengembangan produk yang berkesinambungan, desain dapat dilakukan dengan akurat (prosentase keseksamaan rata-rata adalah sebesar 96,75%) dan dapat mengurangi biaya, waktu serta penggunaan material.

Kata kunci: Tangki, *Compartment*, *Finite Element Application*, *Sustainable Product Development*.

1. PENDAHULUAN

Tangki truk bahan bakar minyak adalah tangki yang terdapat pada truk yang didesain untuk mengangkut muatan bahan bakar minyak di jalan raya. Untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan bahan bakar minyak untuk beberapa jenis bahan bakar dalam satu kali perjalanan, tangki truk bahan bakar minyak tersebut dibagi menjadi beberapa ruangan (*compartment*) dengan menggunakan sekat (partisi) sehingga dalam satu kali perjalanan pengiriman bahan bakar minyak dapat mengangkut beberapa macam bahan bakar minyak.

Saat ini banyak industri manufaktur tangki truk bahan bakar minyak yang melakukan modifikasi bentuk tangki konvensional menjadi tangki dengan beberapa *compartment*. Hal tersebut tentunya akan berdampak kepada tegangan yang terjadi pada tangki saat dilakukan pembebanan. Untuk mencegah efek yang ditimbulkan oleh modifikasi tersebut perlu dilakukan penelitian terhadap efek dari penambahan *compartment* pada tangki truk terhadap tegangan yang terjadi pada tangki saat diberi pembebanan.



Gambar 1. Tangki Truk Bahan Bakar Minyak

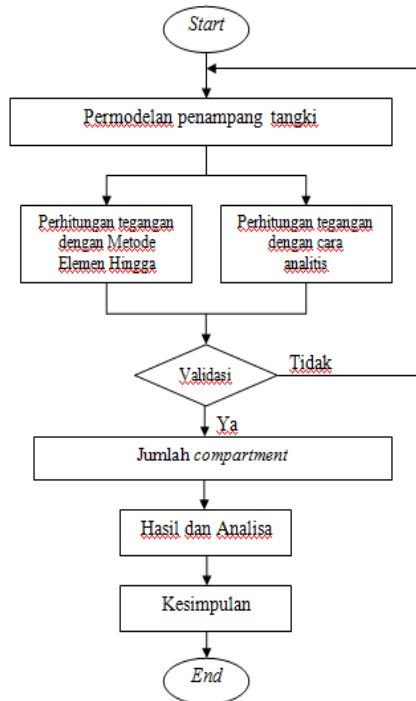
2. KAJIAN PUSTAKA

Metode elemen hingga adalah suatu metode yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai persoalan mekanika dengan geometri yang kompleks. Keunggulan dari metode ini adalah karena secara komputasi sangat efisien dan memberikan solusi yang cukup akurat terhadap permasalahan yang kompleks. Metode Elemen Hingga biasanya digunakan untuk menentukan tegangan dan regangan dari benda (struktur mekanik). Metode Elemen Hingga dapat menyelesaikan persoalan dengan sistem kompleks yang dimana tidak dapat diselesaikan dengan perhitungan secara analitis. Dengan metode elemen hingga, suatu benda (struktur mekanik) dibagi-bagi (*discretized*) menjadi beberapa substruktur (disebut elemen). Kemudian dengan menggunakan matriks, defleksi dari tiap titik (*node*) akan dihubungkan dengan pembebanan, properti material, properti geometrik.

Dalam penelitian ini, analisa metode elemen hingga dilakukan dengan menggunakan software ANSYS (*Finite Element Application*). Dalam software ANSYS langkah analisa dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu: *Preprocessor* (pemodelan benda yang akan dianalisa, penentuan jenis material, pemilihan tipe elemen, *meshing*, dan juga aplikasi beban), *solution* (perhitungan permasalahan yang telah didefinisikan) dan *general postprocessor* (menampilkan secara visual hasil perhitungan dalam bentuk kontur tegangan dan regangan).

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan metodologi penelitian seperti terlihat pada Gambar 2.



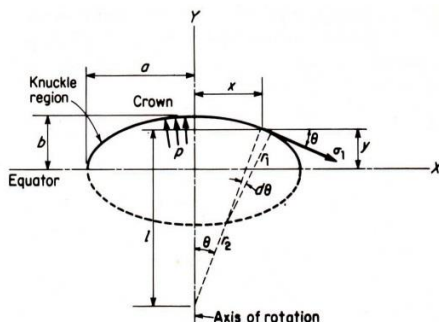
Gambar 2. Metodologi Penelitian

3. HASIL DAN ANALISA

Proses pembuatan simulasi tegangan pada tangki truk BBM ini dibuat dengan *ANSYS software* dengan cara pemodelan menggunakan *symmetric shell modeling* dengan pertimbangan kemudahan pemodelan, waktu analisa yang cukup singkat dan juga dihasilkan kesalahan atau *error* yang cukup kecil (Heckman, 1998).

Perhitungan Analitis

Perhitungan ini dilakukan dengan cara menghitung tegangan yang diterima dinding *shell* pada tangki BBM berbentuk elips. Perhitungan analitis ini menggunakan perhitungan tegangan bejana tekan *ellipsoidal* berdinding tipis dengan alasan bahwa perbandingan antara jari-jari tangki dibanding relatif sangat besar dibandingkan dengan tebal dinding tangki yang merupakan syarat perhitungan bejana tekan berdinding tipis. Pada bejana tekan *ellipsoidal*, perhitungan analitis dilakukan pada bagian *crown* dan bagian *equator*.



Gambar 3. Tegangan pada Tangki

Perhitungan analitis pada bagian *Crown*

Bagian ini terletak pada dasar maupun bagian atas tangki. Pada bagian dasar untuk tangki bahan bakar minyak, tekanan yang diterima merupakan yang paling besar sedangkan untuk bagian atas merupakan yang paling kecil.

- Tegangan Membujur (*Longitudinal Stress*)

$$\sigma_{long} = \frac{pa^2}{2bh}$$

$$\sigma_{long} = 2.597.104,253 \text{ Pa}$$

- Tegangan Keliling (*Hoop Stress*)

$$\sigma_h = \frac{pa^2}{2bh}$$

$$\sigma_h = 2.597.104,253 \text{ Pa}$$

- Tegangan *Von Mises*

$$\sigma_{von Mises} = 2.611.888,413 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{von Mises} = 2,61 \text{ Mpa}$$

Perhitungan analitis pada bagian *Equator*

Equator merupakan bagian yang berada tepat di tengah-tengah garis khayal yang membagi tangki elips menjadi dua bagian.

- Tegangan Membujur (*Longitudinal Stress*)

$$\sigma_{long} = \frac{pa}{2h}$$

$$\sigma_{long} = 922.532 \text{ Pa}$$

- Tegangan Keliling (*Hoop Stress*)

$$\sigma_h = \frac{pa}{h} \left(1 - \frac{a^2}{2b^2} \right)$$

$$\sigma_h = -70.112,432 \text{ Pa}$$

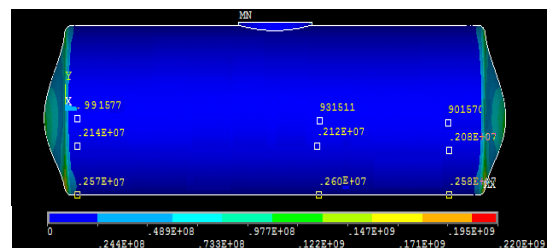
- Tegangan *Von Mises*

$$\sigma_{von Mises} = 963.355,5562 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{von Mises} = 0,96 \text{ Mpa}$$

Pemodelan dengan *Finite Element Application* dengan menggunakan *ANSYS Software*

Proses Pemodelan dan perhitungan pada tangki BBM berbentuk elips seperti yang telah dilakukan perhitungan analitis sebelumnya dilakukan simulasi dengan menggunakan *software ANSYS* dan didapatkan hasil *von mises stress* pada *crown* dan *equator* masing-masing adalah 2,6 *Mpa* dan 0,99 *Mpa* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Tegangan *Von Mises* yang terjadi pada tangki elips untuk Proses validasi

Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan tegangan secara analitis dengan hasil simulasi. Untuk perhitungan persentase kesalahan dan prosentase keseksamaan, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut. Hasil persentase kesalahan dan prosentase keseksamaan antara perhitungan dengan simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

$$\text{Persentase Kesalahan} = \left| \frac{\sigma_{\text{hasil simulasi}} - \sigma_{\text{analitis}}}{\sigma_{\text{analitis}}} \right| \times 100 \%$$

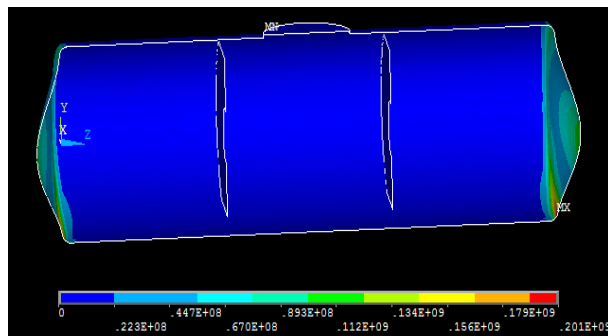
$$\text{Prosentase Keseksamaan} = 100\% - \text{Persentase Kesalahan}$$

Tabel 1. Persentase Kesalahan Pada Tangki Elips

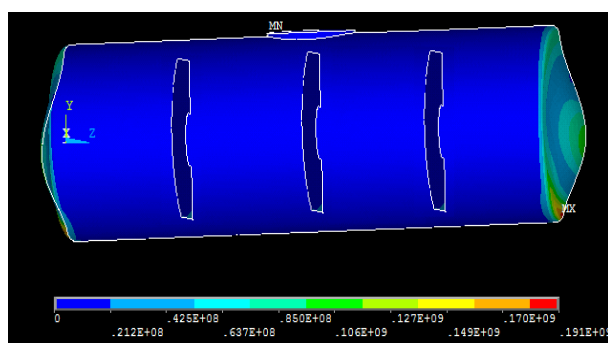
Metode	Bagian	
	Crown	Equator
Perhitungan Analitis (MPa)	2,61	0,96
Simulasi ANSYS (MPa)	2,60	0,99
Persentase Kesalahan (%)	0,38	3,13
Prosentase Keseksamaan (%)	96,62	96,87

Setelah mendapati bahwa hasil perhitungan dengan simulasi adalah memiliki keakuratan yang cukup tinggi dengan prosentase keseksamaan adalah masing-masing sebesar 96,62% pada bagian crown dan 96,87% pada bagian equator (prosentase keseksamaan rata-rata adalah sebesar 96,75%) pada pemodelan tangki bahan bakar minyak dengan ANSYS software, kemudian dilakukan analisa pengaruh jumlah compartment terhadap tegangan yang terjadi pada tangki truk bahan bakar minyak berpenampang elips dan trapesium dengan menggunakan ANSYS software (Finite Element Application).

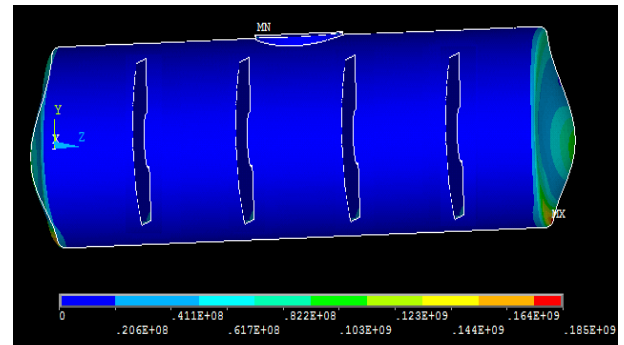
Pemodelan Tangki Truk BBM dengan Penampang Elips



Gambar 5. Distribusi Tegangan yang Terjadi pada Tangki Elips 3 compartments



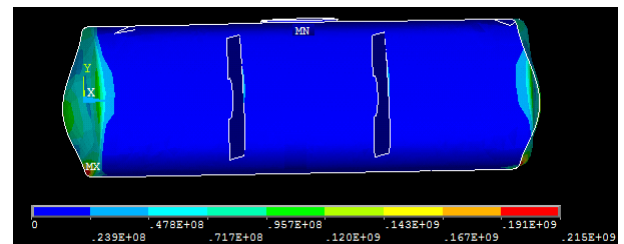
Gambar 6. Distribusi Tegangan yang Terjadi pada Tangki Elips 4 compartments



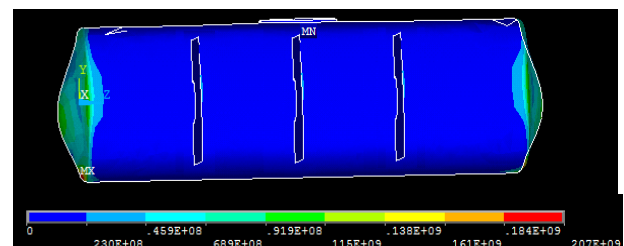
Gambar 7. Distribusi tegangan yang terjadi pada tangki elips 5 compartment

Pada simulasi tangki truk BBM dengan model penampang elips 3 compartment, tegangan maksimum atau tegangan kritis yang terjadi adalah 201 Mpa. Pada simulasi tangki truk BBM dengan model penampang elips 4 compartment, tegangan maksimum atau tegangan kritis yang terjadi adalah 191 Mpa dan Pada simulasi tangki truk BBM dengan model penampang elips 5 compartment, tegangan maksimum atau tegangan kritis yang terjadi adalah 185 Mpa.

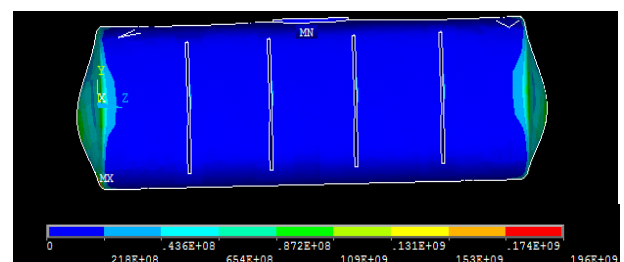
Pemodelan Tangki Truk BBM dengan Penampang Trapesium



Gambar 8. Distribusi tegangan yang terjadi pada tangki trapesium 3 compartments



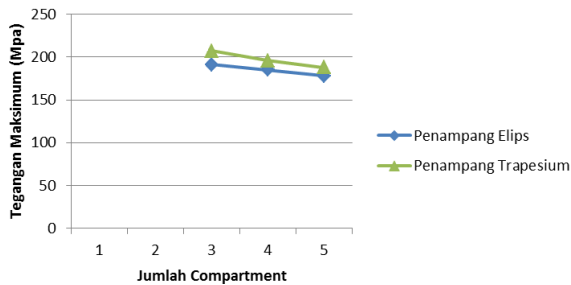
Gambar 9. Distribusi Tegangan yang Terjadi pada Tangki Trapesium 4 compartments



Gambar 10. Distribusi Tegangan yang Terjadi pada Tangki Trapesium 5 compartments

Pada simulasi tangki truk BBM dengan model penampang trapesium 3 compartments, tegangan maksimum atau

tegangan kritis yang terjadi adalah 215 Mpa, Pada simulasi tangki truk BBM dengan model penampang trapesium 4 *compartments*, tegangan maksimum atau tegangan kritis yang terjadi adalah 207 Mpa dan Pada simulasi tangki truk BBM dengan model penampang trapesium 5 *compartments*, tegangan maksimum atau tegangan kritis yang terjadi adalah 196 Mpa.



Gambar 11. Grafik Tegangan Maksimum sebagai Fungsi Jumlah *Compartement*

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan tangki truk bahan bakar minyak berkapasitas 24000 liter dengan penampang elips dan trapesium, jumlah *compartement* optimum untuk tangki truk dengan bentuk penampang elips dan penampang trapesium masing-masing adalah 5 *compartments* untuk penelitian dengan menggunakan 3 *compartments*, 4 *compartments* dan 5 *compartments*. Peningkatan jumlah *compartement* akan menurunkan tegangan maksimum yang terjadi serta meningkatkan angka keamanan yang terjadi pada tangki truk bahan bakar minyak (perhitungan angka keamanan diperoleh dengan rumus angka keamanan sama dengan tegangan ijin material dibagi dengan tegangan yang terjadi pada saat pembebanan). Dari gambar 11 dapat dilihat bahwa tangki dengan penampang elips memiliki tegangan maksimum yang lebih kecil dibandingkan tangki dengan penampang trapesium.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan tangki truk bahan bakar minyak berkapasitas 24000 liter dengan penampang elips dan trapesium, jumlah *compartement* optimum untuk tangki truk dengan bentuk penampang elips dan penampang trapesium masing-masing pada 3 *compartments*, 4 *compartments* dan 5 *compartments* dapat disimpulkan bahwa peningkatan jumlah *compartement* akan menurunkan tegangan maksimum yang terjadi serta meningkatkan angka keamanan yang terjadi pada tangki truk bahan bakar minyak. Proses desain dengan menggunakan ANSYS software (*Finite Element Application*) sesuai dengan pendekatan *sustainable product development* atau pengembangan produk yang berkesinambungan, desain dapat dilakukan dengan akurat (prosentase keseksamaan rata-rata adalah sebesar 96,75%) dan dapat mengurangi biaya, waktu serta penggunaan material. Berdasar penelitian yang telah dilakukan dengan 3 *compartments*, 4 *compartments* dan 5 *compartments* dapat disimpulkan bahwa jumlah *compartement* optimum pada tangki truk bahan bakar minyak adalah sebanyak 5 *compartments*.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Anggono, W., Pisa, B. F., dan Susilo, S. H., *Sustainable Product Design for Motor Cycle Cast Wheel using*

Finite Element Application and Pugh's Concept Selection Method, Seminar Nasional Teknik Mesin 6, 2011.

- [2] Anggono, W., "Peningkatan Unjuk Kerja Desain *Flexible Shield* untuk Pompa Sabun dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga", *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 6, 2004, hal. 57-64.
- [3] Anggono, W. Analisa Pengaruh Radius Heads Terhadap Besar Tegangan Maksimum pada *Air Receiver Tank* Horizontal dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Proc. National Seminar on Application and Research in Industrial Technology*, 2006, hal 78-86.
- [4] Carucci, Vincent A.. *Overview Of Pressure Vessel Design*, ASME, 1999.
- [5] Heckman, David. *Finite Element Analysis of Pressure Vessel*, MBARI, 1998.
- [6] Logan, D.L., *A First Course in The Finite Element Method*, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
- [7] Moaveni Saeed, *Finite Element Analysis ; Theory and Application with ANSYS*, 2nd ed., Pearson Education, United States of America, 2003.
- [8] Sanjaya Adi, Analisa pengaruh jumlah *compartement* tangki truk BBM 24 KL terhadap deformasi dan tegangan maksimum, Universitas Kristen Petra, 2012.
- [9] Ullman, David G, *The mechanical design process*, New York: McGraw-Hill Book Company, 2003.
- [10] Weenen, J C van., *Concept, context, and co-operation for sustainable technology. Proc. International Seminar on Design and Manufacture for sustainable development*, 2002, hal 3-12.

APLIKASI SUSTAINABLE PRODUCT DEVELOPMENT DALAM OPTIMASI JUMLAH BOUT PADA SAMBUNGAN RESERVOIR TEKAN PIPA *HYDRANT* DENGAN MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT APPLICATION

Willyanto Anggono¹⁾, Ninuk Jonoadji²⁾, Ricky Subiyanto³⁾, Michael Surya Chandra Tanoto⁴⁾

Jurusan Teknik Mesin Universitas Kristen Petra^{1,2,3,4)}
Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia^{1,2,3,4)}
Phone: 0062-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658^{1,2)}
E-mail : willy@petra.ac.id¹⁾

ABSTRAK

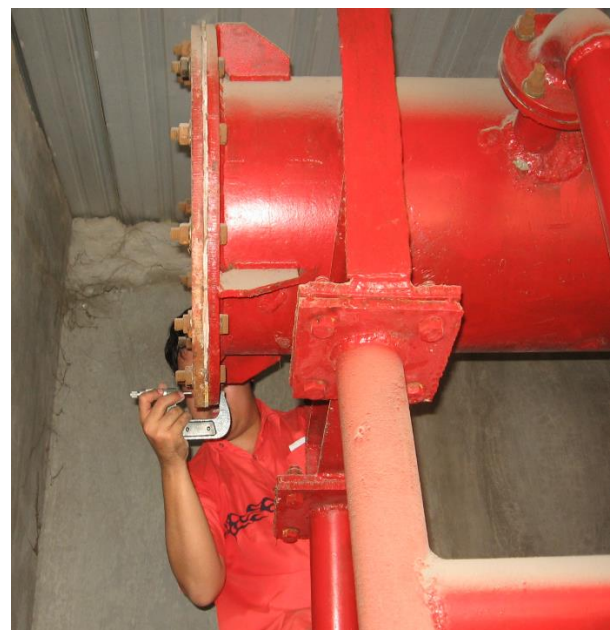
Hydrant merupakan komponen utama yang sangat penting dalam suatu bangunan yang berfungsi untuk memadamkan api jika terjadi kebakaran. Pada sistem perpipaan hydrant, terdapat sambungan-sambungan yang bertujuan untuk mempermudah pemasangan dan penataan dan akan dapat menimbulkan permasalahan jika tidak direncanakan dengan baik. Terdapat dua cara penyambungan yang biasanya digunakan dalam pemasangan sambungan perpipaan hydrant yaitu pengelasan dan penyambungan menggunakan baut. Pada sistem perpipaan dengan menggunakan sambungan baut, sistem hydrant terhubung dengan suatu sistem perpipaan yang terdapat penghubung-penghubung (flens) dan suatu sistem pengikat baut dan mur antara satu pipa dengan pipa lainnya. Penyambungan dengan menggunakan baut lebih fleksibel tetapi memiliki kekurangan yang sangat fatal jika tidak didesain dengan baik yaitu masalah kebocoran sambungan pada flens yang dibaut. Pada awalnya tingkat kebocoran yang terjadi adalah sangat kecil tetapi jika dibiarkan terus-menerus akan membesar dan dapat membahayakan orang-orang yang berada disekitar sambungan itu maupun semua orang dalam bangunan tersebut. Permasalahan diatas disebabkan karena sambungan yang tidak rapat dan juga cara penyambungan yang dilakukan dengan tidak sempurna sehingga masih terdapat celah (lubang) meskipun kecil. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan optimasi perbandingan diameter flens terhadap jumlah baut pada sambungan reservoir tekan pipa hydrant dengan menggunakan ANSYS (Finite Element Application) software yang berbasis metode elemen hingga. Dari hasil penelitian yang dilakukan pada optimasi jumlah baut pada sambungan flens 12" pada jumlah baut 12 buah dengan Finite Element Application didapatkan bahwa ukuran baut optimum yang dipergunakan adalah masing-masing 3/4" dan 1" dengan hasil celah maksimum yang terjadi masing-masing sebesar 0.0109 mm dan 0.0107 mm. Proses desain dengan menggunakan ANSYS software (Finite Element Application) sesuai dengan pendekatan sustainable product development atau pengembangan produk yang berkesinambungan dan dapat mengurangi biaya, waktu serta penggunaan material.

Kata kunci: Hydrant, Flens, Finite Element Application. Sustainable Product development.

1. PENDAHULUAN

Hydrant merupakan komponen utama yang sangat penting dalam suatu bangunan yang berfungsi untuk memadamkan api jika terjadi kebakaran. Pada sistem perpipaan hydrant, terdapat sambungan-sambungan yang bertujuan untuk mempermudah pemasangan dan penataan dan akan dapat menimbulkan permasalahan jika tidak direncanakan dengan baik. Terdapat dua cara penyambungan yang biasanya digunakan dalam pemasangan sambungan perpipaan hydrant yaitu pengelasan dan penyambungan menggunakan baut. Pada sistem perpipaan dengan menggunakan sambungan baut, sistem hydrant terhubung dengan suatu sistem perpipaan yang terdapat penghubung-penghubung (flens) dan suatu sistem pengikat baut dan mur antara satu pipa dengan pipa lainnya. Penyambungan dengan menggunakan baut lebih fleksibel tetapi memiliki kekurangan yang sangat fatal jika tidak didesain dengan baik yaitu masalah kebocoran sambungan pada flens yang dibaut. Pada awalnya tingkat kebocoran yang terjadi adalah sangat kecil tetapi jika dibiarkan terus-menerus akan membesar dan dapat membahayakan orang-orang yang berada disekitar sambungan itu maupun semua orang dalam bangunan tersebut. Permasalahan diatas disebabkan karena sambungan yang tidak rapat dan juga cara penyambungan yang dilakukan dengan tidak sempurna sehingga masih terdapat celah (lubang) meskipun

kecil. Berdasar permasalahan tersebut maka perlu dilakukan penelitian optimasi perbandingan diameter flens terhadap jumlah baut pada sambungan reservoir tekan pipa hydrant.



Gambar 1. Reservoir Tekan Pipa Hydrant



Gambar 2. *Pressure gauge* pada Reservoir Tekan Pipa Hydrant

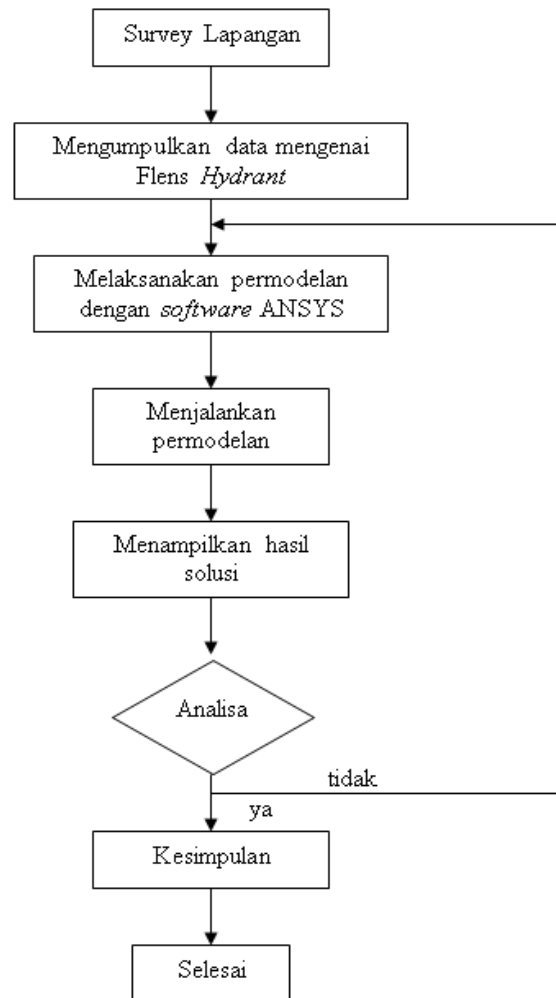
2. KAJIAN PUSTAKA

Terdapat dua cara penyambungan yang biasanya digunakan dalam pemasangan sambungan perpipaan *Hydrant* yaitu pengelasan dan penyambungan menggunakan baut. Pada sistem perpipaan dengan menggunakan sambungan baut, sistem *Hydrant* terhubung dengan suatu sistem perpipaan yang terdapat penghubung-penghubung (*flens*) dan suatu sistem pengikat baut dan mur antara satu pipa dengan pipa lainnya. Pada diameter luar dari baut, panjangnya, dan tingkat ulir juga penting untuk faktor yang perlu dipertimbangkan. Bahan dari baut harus membuat cukup kuat untuk bisa menahan secara tepat beban baut yang terjadi. Mur mempunyai keterikatan penuh dengan ulir pada baut.

Dalam perhitungan tegangan dan regangan, *ANSYS software* menggunakan metode elemen hingga. Dengan metode ini suatu struktur elastik kontinu dibagi-bagi (*discretized*) menjadi beberapa substruktur (disebut elemen). Kemudian dengan menggunakan matriks, defleksi dari tiap titik (*node*) akan dihubungkan dengan pembebanan, properti material, properti geometrik. Analisa elemen hingga dilakukan dengan menggunakan *ANSYS software*. Dalam *ANSYS software* langkah analisa dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu: *Preprocessor* (pemodelan benda yang akan dianalisa, penentuan jenis material, pemilihan tipe elemen, *meshing*, dan juga aplikasi beban), *Solution* (dilakukan perhitungan terhadap permasalahan yang telah didefinisikan), *General Postprocessor* (menampilkan perhitungan secara visual dalam bentuk kontur tegangan dan regangan). Beberapa tipe elemen yang digunakan dalam *software ANSYS* antara lain adalah *shell elements*, *plane elements* dan *solid elements*. *Meshing* adalah suatu proses pembagian atau diskretisasi suatu struktur menjadi beberapa substruktur.

3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan metodologi penelitian seperti terlihat pada Gambar 3.

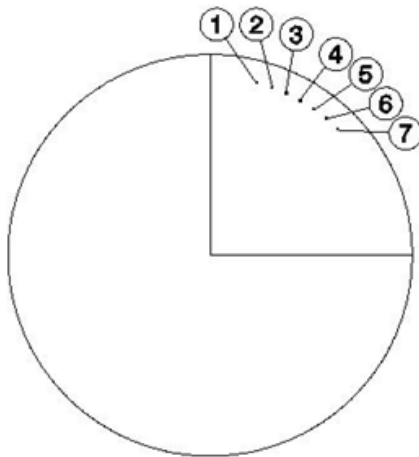


Gambar 3. Metode Penelitian

4. HASIL DAN ANALISA

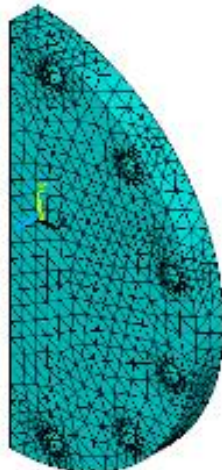
Sebelum melakukan penelitian simulasi dengan bantuan *ANSYS software*, dilakukan penentuan beberapa titik-titik (*node*) pada bagian lintasan lingkaran pada lubang baut pengunci. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *displacement* yang terjadi pada beberapa bagian titik (*node*) dari lintasan lingkaran tersebut. Pengambilan titik-titik (*node*) observasi yang dilakukan untuk model pertama dapat dilihat pada Gambar 4 dan besar *total displacement* yang terjadi pada masing-masing titik (*node*) dihitung dengan menjumlahkan besar *displacement* yang terjadi pada *blindflens* dan besar *displacement* yang terjadi pada *flens* pada pipa.

Pada permodelan, model yang telah dibuat dilakukan *meshing* seperti terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Setelah proses *meshing*, langkah berikutnya adalah memberikan tekanan kerja pada benda yang disimulasi dan selanjutnya setelah proses perhitungan komputer selesai, komputer akan menampilkan besar *displacement* yang terjadi ke arah sumbu z melalui kontur warna seperti terlihat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.

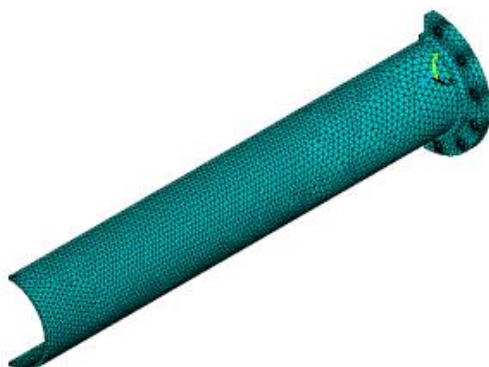


Titik Nomor	Posisi berdasarkan koordinat (mm)		
	X	Y	Z
1	46.8	174.8	0.0
2	61.9	170.1	0.0
3	76.5	164.0	0.0
4	90.5	156.7	0.0
5	103.8	148.3	0.0
6	116.3	138.6	0.0
7	128.0	128.0	0.0

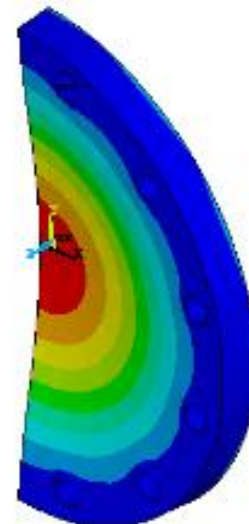
Gambar 4. Posisi Titik Observasi Blindflens dan Flens pada Pipa



Gambar 5. Meshing untuk Blindflens



Gambar 6. Meshing untuk Flens pada Pipa



Gambar 7. Displacement pada Blindflens



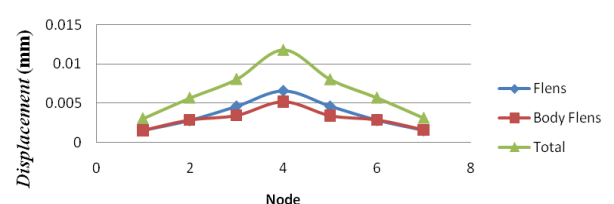
Gambar 8. Displacement untuk Flens pada Pipa

Analisa Permodelan Flens 12 hole dan 0,75" bolt

Berdasarkan tahapan-tahapan yang telah ada sebelumnya didapat hasil analisa yang terjadi pada 7 titik yang sudah ada pada permodelan sebelumnya. Besar total *displacement* yang terjadi pada masing-masing titik (*node*) dihitung dengan menjumlah besar *displacement* yang terjadi pada *blindflens* dan *flens* pada pipa. Besar *displacement* total yang terjadi pada masing-masing titik (*node*) dapat dilihat pada tabel 1. Hasil tersebut dapat juga dilihat dalam bentuk grafik seperti pada gambar 9.

Tabel 1. Total *Displacement* yang terjadi pada 7 titik (*node*) untuk Flens 12 hole dan 0,75"

No	<i>Displacement (mm)</i>		
	Flens	Body Flens	Total (Flens + Body Flens)
1	0.0011538	0.0013005	0.0024543
2	0.0047198	0.0024313	0.0071511
3	0.0059565	0.0039393	0.0098958
4	0.0072921	0.0055896	0.0128817
5	0.0059289	0.0039456	0.0098745
6	0.0047255	0.0024861	0.0072116
7	0.0011308	0.0013827	0.0025135



Gambar 9. Total *Displacement* untuk Flens 12 hole dan 0,75"

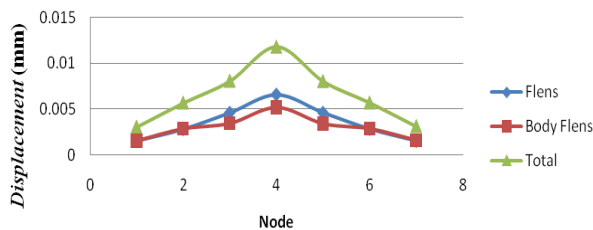


Analisa Permodelan Flens 12 hole dan 1" bolt

Berdasarkan tahapan-tahapan yang telah ada sebelumnya didapat hasil analisa yang terjadi pada 7 titik yang sudah ada pada permodelan sebelumnya. Besar total *displacement* yang terjadi pada masing-masing titik (*node*) dihitung dengan menjumlah besar *displacement* yang terjadi pada *blindflens* dan *flens* pada pipa. Besar *displacement* total yang terjadi pada masing-masing titik (*node*) dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil tersebut dapat juga dilihat dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 10.

Tabel 2. Total *Displacement* yang terjadi pada 7 titik (*node*) untuk Flens 12 hole dan 1"

No	<i>Displacement (mm)</i>		
	Flens	Body Flens	Total (Flens + Body Flens)
1	0.0018979	0.0015921	0.00349
2	0.0027892	0.0027613	0.0055505
3	0.0046667	0.0041395	0.0088062
4	0.0053264	0.006008	0.0113344
5	0.0046763	0.0041214	0.0087977
6	0.0027473	0.0027295	0.0054768
7	0.0018669	0.0015034	0.0033703



Gambar 10. Total *Displacement* untuk Flens 12 hole dan 1"

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada optimasi jumlah baut pada sambungan flens 12" pada jumlah baut 12 buah dengan *Finite Element Application* didapatkan bahwa ukuran baut optimum yang dipergunakan adalah masing-masing adalah 0,75" dan 1" dengan hasil celah maksimum yang terjadi masing-masing sebesar 0.0109 mm dan 0.0107 mm. Proses desain dengan menggunakan *ANSYS software (Finite Element Application)* sesuai dengan pendekatan *sustainable product development* atau pengembangan produk yang berkesinambungan dan dapat mengurangi biaya, waktu serta penggunaan material.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anggono, W., Pisa, B. F., Susilo, S. H., *Sustainable Product Design for Motor Cycle Cast Wheel using Finite Element Application and Pugh's Concept Selection Method*, Seminar Nasional Teknik Mesin 6, 2011.
- [2] Anggono, W., "Peningkatan Unjuk Kerja Desain *Flexible Shield* untuk Pompa Sabun dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga", Jurnal Teknik Mesin, Vol. 6, 2004, hal. 57-64.
- [3] Anggono, W. Analisa Pengaruh Radius Heads Terhadap Besar Tegangan Maksimum pada *Air Receiver Tank* Horizontal dengan Menggunakan

Metode Elemen Hingga. Proc. National Seminar on Application and Research in Industrial Technology, 2006, hal 78-86.

- [4] Logan, D. L., *A First Course in The Finite Element Method*, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
- [5] Pugh, S., *Creating Innovative Products Using Total Design*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 1996.
- [6] Pugh, S., *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 1991.
- [7] Subiyanto, R., Optimasi Penggunaan Jumlah Baut pada *Hydrant*, Universitas Kristen Petra, 2009.
- [8] Ullman, D. G., *The mechanical design process*, New York: McGraw-Hill Book Company, 2003.
- [9] Weenen, J. C. V., *Concept, context, and co-operation for sustainable technology. Proc. International Seminar on Design and Manufacture for sustainable development*, 2002, hal 3-12.

ANALISA TEGANGAN PADA DESAIN *FRAME* AUTOMATIC GUIDED VEHICLES (AGV) DENGAN PEMBEBANAN STATIS MENGGUNAKAN SOFTWARE ABAQUS 6.11

Zainal Abadi¹⁾, Fauzun²⁾, Muslim Mahardika³⁾

Mahasiswa S2 Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin dan Industri¹⁾

Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada^{2,3)}

Jalan Grafika No 2, Yogyakarta 555281, Indonesia

Phone: 0274-521673, Fax: 0274-521673

E-mail :zainal.abadi@mail.ugm.ac.id¹⁾

ABSTRAK

Frame atau rangka adalah merupakan bagian penting pada kendaraan yang berfungsi sebagai penopang berat kendaraan, mesin serta beban. *Frame* yang akan dianalisa adalah *frame* Automatic Gueded Vehicle (AGV) yang digunakan sebagai material handling. Posisi pembebanan pada AGV yang didesain bisa berputar dan model menyerupai forklift, sehingga keamanan *frame* menjadi hal yang sangat di perhatikan. Hal ini menjadi alasan mengapa *frame* AGV harus kuat, kaku sehingga aman di gunakan untuk kondisi pembebanan yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Beban terbesar tidak hanya terjadi pada satu titik karena posisi beban yang bisa di putar dan naik turun, sehingga titik-titik kritis akan terjadi pada beberapa bagian. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon ASTM A36 dan beban maksimum yang akan di angkat sebesar 100 kg dengan safety faktornya 2. Analisa dilakukan untuk mengetahui titik-titik kritis tersebut menggunakan software Abaqus 6.11. Tujuanannya adalah untuk mengetahui deformasi yang terjadi serta daerah kritis dari semua bagian *frame* serta tegangan vonmises, tegangan maksimum dan regangan maksimum pada titi kritis tersebut. Setelah dilakukan analisis dengan software abaqus 6.11 maka didapatkan hasil sebagai berikut: a) Untuk beban statis dengan posisi beban 1 dan 2 dengan pembebanan 80% dari beban total didapat tegangan maksimumnya 66,5Mpa, tegangan Von Mises 84,9Mpa dan regangan maksimum 300×10^{-6} mm. b) Untuk beban statis dengan posisi beban 1 dan 2 dengan pembebanan 80% tegangan maksimum 85,6Mpa, tegangan Von Mises 96.1Mpa, dan regangan maksimum 367×10^{-6} mm. c) Untuk beban statis posisi beban 1 dan 3 dengan pembebanan 80% di peroleh tagangan maksimumnya 78,7 Mpa, tegangan Von Mises 94,7Mpa, dan regangan maksimum 335×10^{-6} mm. d) Untuk beban statis posisi 3 dan 4 dengan pembebanan 80% diperoleh tegangan maksimum 51,3Mpa, Tegangan Von Misesnya 77Mpa dan Regangan maksimum 278×10^{-6} mm. Dengan demikian Tegangan dan Regangan terbesar pada pembeban statis terjadi pada posisi beban 1 dan 2 dengan pembebanan 80% dari beban total dan nilai terkecil terjadi pada posisi beban 3 dan 4 dengan pembebanan 80% dari beban total.

Kata kunci: AGV, *Frame*, Analisa beban statis, Software Abaqus 6.11

1. PENDAHULUAN

Sistem manufaktur merupakan suatu sistem yang terdiri dari kumpulan peralatan dan sumber daya manusia yang terintegrasi, yang berfungsi menjalankan satu atau lebih proses atau operasi perakitan yang dimulai dari bahan baku ataupun suatu part/bagian (Groover, 1987). Salah satu bagian penting dalam sistem manufaktur adalah AGV. Sebagai *material handling* dalam sistem manufaktur

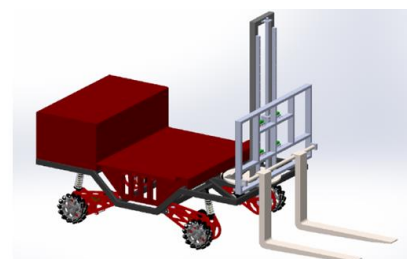
AGV memiliki perkembangan yang cukup pesat, baik dalam segi desain dan juga kontrolnya. Desain dari AGV itu sendiri di sesuaikan dengan kebutuhan industri yang akan menggunakannya, sehingga dimensi dan bentuk AGV dapat bervariasi sesuai kebutuhan. Selain itu, juga akan di perhitungkan kekuatan material serta beban maksimum yang bisa di bawa oleh AGV tersebut.

Tujuan utama dari teknologi otomatisasi saat ini adalah produktivitas dan fleksibilitas, yang hanya dapat dicapai dalam lingkungan manufaktur terintegrasi. Dalam hal ini integrasi yang diperlukan, dirancang dengan hati-hati dan dikelola secara profesional dalam sistem material handling. Kendaraan dipandu otomatis (AGV) adalah salah satu kelas yang paling cepat berkembang dari peralatan yang digunakan dalam industri untuk penanganan material (Chauhan). maka dibutuhkan konstruksi yang kuat dan aman digunakan dalam berbagai medan.

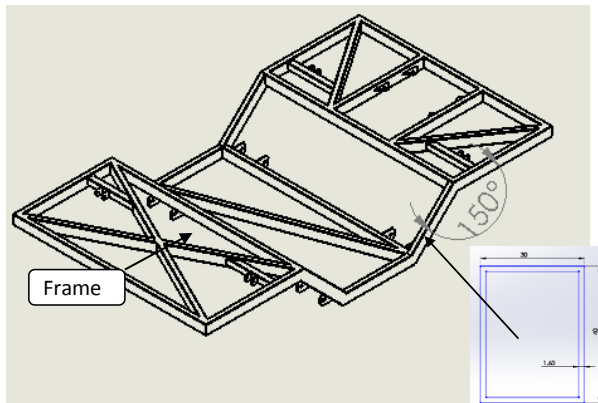
Penelitian ini akan difokuskan pada menghitung kekuatan material *Frame* AGV dengan variasi pembebanan yang sesuai dengan kondisi sebenarnya dan mencari titik kritis dari

frame AGV tersebut serta menganalisa menggunakan software Abaqus. Dengan software Abaqus akan dapat di simulasikan kekuatan, regangan, konsentrasi tegangan, tegangan geser dari komponen tersebut. Setelah disimulasikan maka akan di ketahui kelemahan dari desain, maka selanjutnya dapat diperbaiki sampai mendapati kondisi yang aman atau memiliki kekuatan yang cukup sesuai dengan kebutuhan beban yang di harapkan. Dalam analisis statis perlu dilakukan analisa *displacement* atau gerakan benda kaku. Gerakan benda kaku dapat terdiri dari translasi maupun rotasi dari komponen. Kecenderungan gerakan benda kaku tergantung pada dimensi model.

Desain pertama *frame* AGV yang di analisis dan simulasi seperti Gambar 1. Hasil dari analisis dan simulasi ini akan menentukan arah perbaikan ataupun modifikasi dari desain AGV ini agar mendapatkan desain yang bagus dan memiliki kekuatan sesuai dengan kebutuhan untuk mengangkat barang pada kondisi rilnya.



Gambar 1. Desain AGV



Gambar 2. Desain Frame AGV

2. METODOLOGI

Material

Material yang digunakan pada desain ini adalah baja karbon ASTM A36 dengan profil box 40x30x1.6 mm. dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tegangan leleh (f_y)	= 250 Mpa
Tegangan Ultimate (f_u)	= 360 Mpa
Modulus young	= 200000 Mpa
Berat jenis	= 78.5 KN/m ³
Poisson Ratio	= 0.26

Beban yang akan digunakan pada AGV terdiri dari dua macam beban yaitu:

a. Beban bagian depan

beban utama	= 100 kg
berat pallet	= 25 kg
berat lifting	= 66 kg
safety factor	= 2
beban total(m.w)	= 382 kg
	= 3820 N

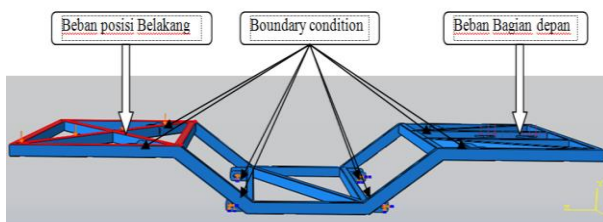
sehingga didapat beban persatuan luas = 1.06N/mm²

b. Beban bagian belakang

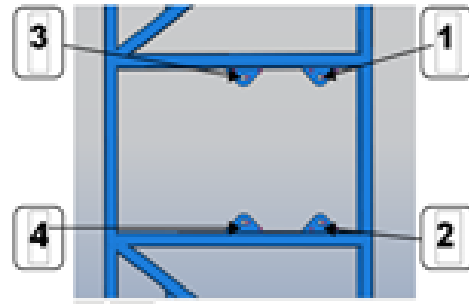
beban utama	= 64 kg
safety factor	= 2
beban totalnya	= 128 kg
	= 1280N

maka di peroleh Beban persatuan luas = 0.01N/mm²

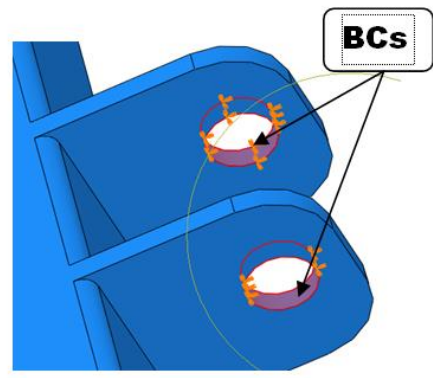
Variasi pembebanan pada simulasi frame ini di lakukan dengan variasi pembebanan, beban yang bervariasi adalah beban pada bagian depan frame, sedangkan beban belakang tetap. Posisi beban dibagi merata pada kontak dengan *lifting*, posisi beban lebih besar di bagian depan dengan pembagian 80:20%, posisi beban yang besar bagian kiri atau kanan pada kontak dengan *lifting* dan posisi beban besar pada bagian belakang seperti pada Gambar 3 dan 4 serta posisi *boundary condition* pada Gambar 5



Gambar 3. Posisi Beban dan Boundary condition

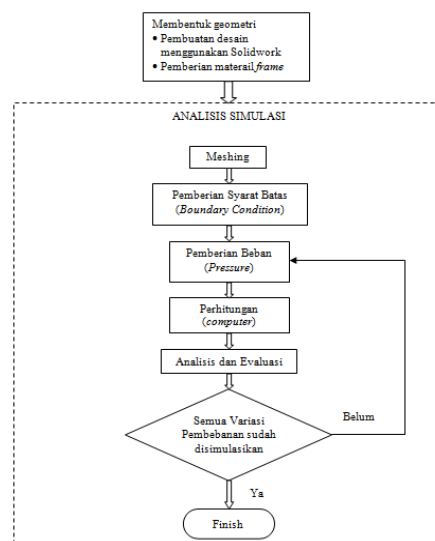


Gambar 4. Posisi beban



Gambar 5. Boundary condition

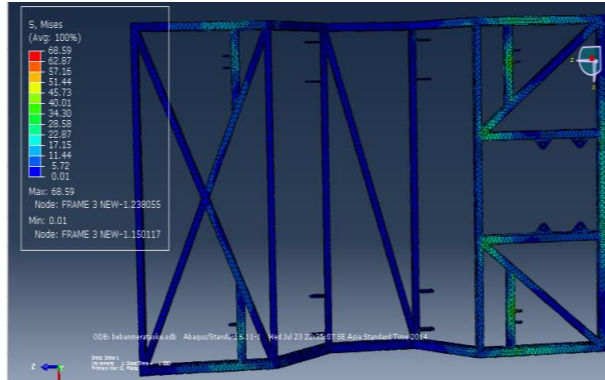
Metode penelitian yang digunakan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6. Langkah awal dimulai dengan pembuatan desain *Frame AGV* menggunakan Solidwork. kemudian melakukan analisis simulasi dalam hal ini menggunakan *software* Abaqus 6.11. pada awalnya desain di *import* ke *software* Abaqus dengan format *parasolid* agar bisa dianalisa dan simulasi. Setelah itu memasukan data jenis material yang digunakan serta *poisson rasio*. selanjutnya menentukan *boundary condition* dan beban. Proses ini di lakukan berulang-ulang seperti yang di perlihatkan pada Gambar 4. Hasil analisis simulasi yang bagus adalah apabila tegangan dan regangannya merata, artinya tidak ada atau sangat kecil sekali kemungkinan terjadi konsentrasi tegangan pada desain.



Gambar 6. Diagram alir proses analisis dan simulasi frame AGV dengan beban statis menggunakan *software* Abaqus 6.11

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

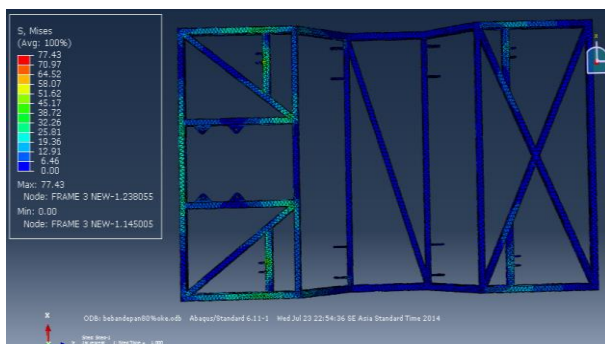
Dari *hasil* simulasi diperoleh nilai tegangan maksimum, regangan maksimum dan tegangan *von mises* yang berbeda dari empat variasi pembebanan pada *frame*. Masing-masing nilai dari hasil analisis dan simulasi Abaqus pada *frame* AGV dapat dilihat hasil simulasi dari semua variasi pembebanan. *Pertama*, posisi pembebanan dibagi merata untuk beban bagian depannya dan beban bagian belakang juga di bagi merata maka didapatkan hasil seperti Gambar 7.



Gambar 7. Hasil analisis dan simulasi pada posisi pembebanan di bagi merata 1,2,3 dan 4.

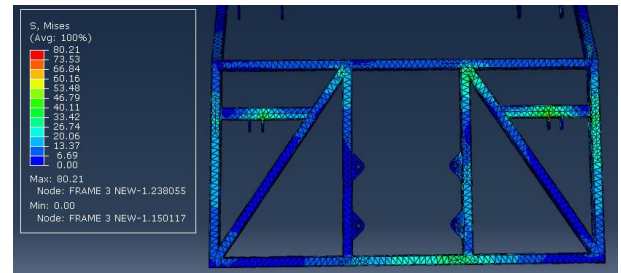
Hasil simulasi ini menunjukkan *Von Mises* maksimum yang terjadi adalah sebesar 68,59Mpa, ditandai dengan perubahan warna pada desain. warna merah menunjukkan tegangan terbesar yang terjadi disana hingga warna biru menunjukkan nilai yang paling kecil. Tegangan terbesar terjadi pada bagian tengah yaitu didekat *boundary condition*.

Kedua, posisi pembebanan dimana beban belakang sama dengan posisi semula sedangkan posisi beban bagian depan di bagi menjadi dua yaitu pada posisi 1 dan 2 dibebani 80% dan posisi 3 dan 4 dibebani 20%. Hasilnya tegangan terbesar terjadi pada ujung frame dan pada *boundary condition*, nilai tegangan terbesarnya adalah 77,43Mpa seperti yang terlihat pada Gambar 8.



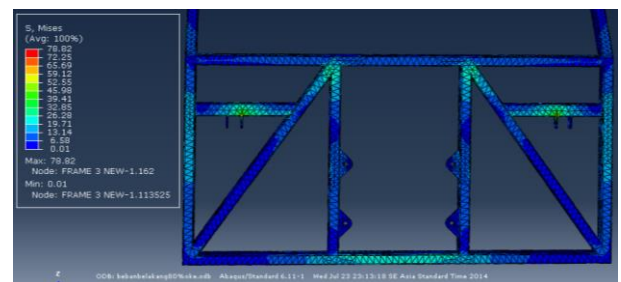
Gambar 8. Hasil analisis dan simulasi pada posisi pembebanan 1 dan 2 80%, 2 dan 4 20%.

Ketiga, posisi pembebanan pada beban belakang tetap, kemudian beban bagian di depan menjadi 2 yaitu posisi 1 dan 3 dibebani 80% dari total beban dan posisi 2 dan 4 dibebani 20%, sehingga di peroleh hasil seperti pada Gambar 9. Tegangan terbesar terjadi pada bagian beban 1 dan 3 dimana porsi pembebanan yang 80% dari beban total. dari perubahan warna antara posisi beban 1 dan 3 terlihat warnanya lebih merah yang menunjukkan tegangan di posisi 1 dan 3 jauh lebih besar daripada posisi 2 dan 4. Nilai tegangan tertingginya adalah 80,21Mpa.



Gambar 9. Hasil analisis dan simulasi pada posisi pembebanan 1 dan 3 80%, 2 dan 4 20%

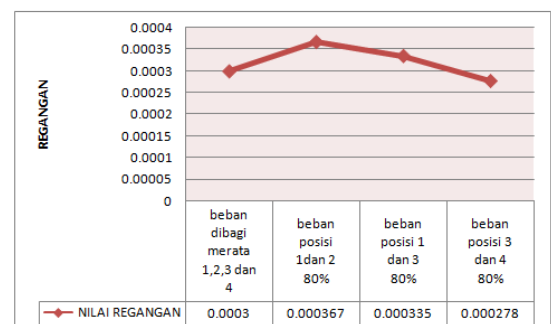
Keempat, Posisi pembebanan pada beban belakang frame tetap, tetapi pada bagian depan frame menjadi posisi 3 dan 4 dibebani 80% dari total beban depan kemudian 1 dan 2 dibebani 20%. dari hasil analisis dan simulasi pada variasi ini menghasilkan tegangan terbesar terjadi pada bagian 2 dan 4, dimana terlihat tegangan terbesar terjadi merata pada sambungan bagian tengah dan pada posisi *boundary condition*, tetapi pada ujung *frame* tegangan menjadi lebih kecil dapat dilihat dari perubahan warna pada ujung frame hanya naik menjadi biru muda, dimana tegangannya sekitar 21Mpa. Tegangan terbesarnya adalah 78,82Mpa terjadi pada tumpuan *boundary condition* dan sambungan tengah *frame* seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil analisis dan simulasi pada posisi pembebanan 3 dan 4 80%, 1 dan 2 20%

Berdasarkan simulasi dari semua variasi pembebanan mengalami tegangan maksimum, regangan maksimum, tegangan Von Mises dan juga displacement yang berbeda. hal ini menjadi acuan buat kita menentukan posisi pembebanan mana yang berpotensi mengalami tegangan terbesar, sehingga kita dapat menentukan titik-titik kritis dari desain *frame* AGV ini.

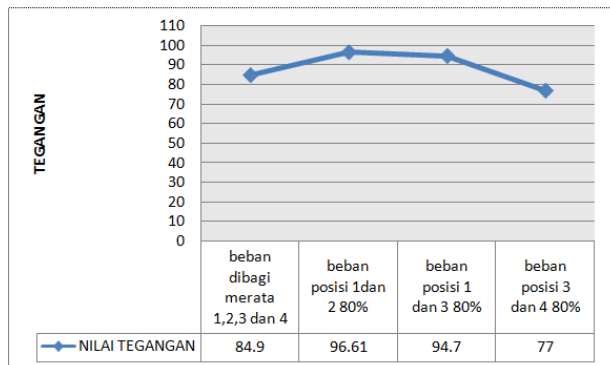
Regangan terbesar terjadi pada posisi beban lebih besar pada variasi pembebanan 2) beban posisi 1 dan 2 80% dan variasi pembebanan 3) beban posisi 1 dan 3 80% dari beban total. dua variasi pembebanan ini di anggap yang posisi yang paling kritis pada desain ini karena beban ditempatkan pada bagian ujung-ujung dari *frame* seperti Gambar 11.



Gambar 11. Nilai regangan dari 4 Variasi pembebanan

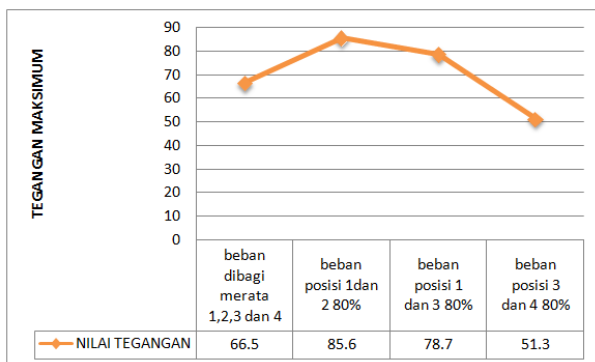


Nilai tegangan vonmises terbesar terjadi pada posisi beban 1 dan 2 80% dari beban total dengan nilai tegangan Von Mises 96.61Mpa dan tegangan paling kecil terjadi pada posisi beban 3 dan 4 80% dari beban total terlihat pada Gambar 12.



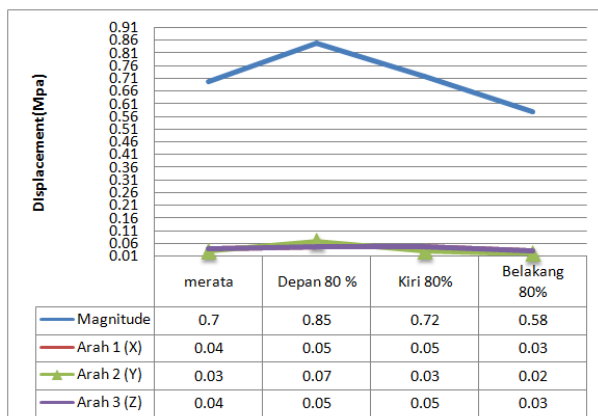
Gambar 12. nilai tegangan Vonmises dari 4 variasi pembebanan

Tidak berbeda jauh dengan regangan maksimum dan tegangan Von Mises bahwa tegangan maksimum terbesar terjadi pada posisi pembebanan yang sama yaitu beban lebih besar pada posisi beban 1 dan 80% dari beban total, dimana posisi beban paling besar diujung *frame*.



Gambar 13. Nilai tegangan maksimm dari 4 variasi pembebanan

Displacement yang terjadi dari setiap variasi pembebanan ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. *Displacement* pada setiap Variasi pembebanan

Dari 4 variasi pembebanan pada *frame* AGV yang dilakukan simulasi menggunakan *software* Abaqus 6.11 diperoleh nilai regangan maksimum, tegangan Von Mises,

tegangan maksimum dan *Displacement* yang berbanding lurus yaitu, nilai dari masing-masing tegangan, regangan, Von Mises dan displacement terjadi pada variasi pembebanan yang sama. nilai terbesar terjadi pada posisi beban 1 dan 2 dibebani 80% dari beban total, sedangkan nilai terkecil terjadi pada posisi beban 3 dan 4 dibebani 80% dari total beban bagian depan lifting.

Dengan nilai yang diperoleh dari simulasi dengan variasi pembebanan tegangan tertinggi yaitu 96,61Mpa, sedangkan *yield stress* dari material ASTM A36 adalah sekitar 250 Mpa maka *frame* ini berdasarkan analisa beban statis dinyatakan aman untuk digunakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil simulasi beban statis *frame* AGV menggunakan Abaqus 6.11 dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Dari 4 posisi pembebanan tegangan dan regangan terbesar terjadi pada posisi beban 1 dan 2 dengan pembebanan 80% dari beban total dengan posisi beban pada bagian ujung *frame*. Dengan nilai tegangan paling besar dan regangan berturut-turut sebesar 96.61Mpa dan 0,000367 mm.
- Berdasarkan nilai *yield stress* material *frame* (baja ASTM A36) sebesar 250Mpa maka *frame* AGV tersebut aman digunakan, karena tegangan terbesar yang terjadi masih dibawah nilai *yield stress* nya yaitu 96.61 Mpa.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. 2002. ASTM A36/A36M-08 "Standard Specification for Carbon Structural Steel". Washington: ASTM Publishing.
- Chauhan. A.K. *Role Of Automated Guided Vehicles In Flexible Manufacturing System. VSRD International Journal of Mechanical, Civil, Automobile and Production Engineering, Vol. 3 No. 4 April 2013.*
- Groover, M.P, 1987, *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*, Lehigh University, Amerika
- Simulia, 2009, "Getting Started with Abaqus", Dassault Systèmes, America.



ANALISA GETARAN PEMASANGAN SABUK DALAM-DALAM PADA POROS POMPA SENTRIFUGAL TEBAL 4,5 MM LEBAR 98 MM

Erwen Martianis

Staf Pengajar Teknik Mesin Politeknik Negeri Bengkalis
Jl. Bathin Alam, Sei. Alam, 28761 Bengkalis – Riau
Email: erwin@polbeng.ac.id

ABSTRAK

Getaran yang timbul pada poros pompa sentrifugal adalah satu fenomena yang terjadi akibat dari jarak antara kedua kopling, tebal dan lebar sabuk serta konfigurasi posisi pemasangan sabuk pada kopling. Getaran banyak dipakai sebagai alat untuk melakukan analisis terhadap mesin-mesin baik dengan gerak maupun translasi. Pengetahuan akan getaran dan data-data yang dihasilkan sangat penting untuk perawatan maupun troubleshooting. Kemampuan ini bisa membantu perusahaan mereduksi terjadinya downtime dan dapat meningkatkan keuntungan baik dari segi produksi maupun dari umur mesin yang lebih panjang. Getaran yang timbul akibat gaya siklik melalui elemen-elemen mesin yang ada, dimana elemen-elemen tersebut saling beraksi satu sama lain dan energi didesifikasi melalui struktur dalam bentuk getaran. Dampak dari getaran adalah terjadi suara bising, turunnya kinerja dan performa pompa serta dapat merusak komponen pada pompa terutama pada poros dan bantalan. Pada penelitian ini divariasikan, jarak kopling, tebal dan lebar sabuk serta konfigurasi posisi pemasangan sabuk pada kopling. Dengan variasi tersebut dapat diamati dan diketahui perilaku getaran yang terjadi dengan cara mengukur dengan menggunakan alat akur getaran vibrometer VQ-400-A OMETRON yang terhubung dengan labjack U3-LV diteruskan ke PC dalam bentuk tegangan listrik digital ke tegangan listrik analog. Model ini mengukur getaran pada arah horizontal atau sumbu X dimana titik fokus laser pada poros pompa yang berputar. Untuk menampilkan hasil pengukuran digunakan labjack yang terhubung ke PC laptop. Penelitian ini menunjukkan bahwa sabuk dengan ukuran 4,5 mm dan lebar 98 mm dengan jarak flens 7,5 cm dengan posisi pemasangan sabuk dalam - dalam adalah yang paling baik dimana getaran yang dihasilkan cukup rendah 1,05 mm/s. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi dalam pemilihan ukuran sabuk, jarak antara kedua kopling serta model konfigurasi pemasangan sabuk yang paling baik pada kopling flens.

Kata kunci: pompa sentrifugal, poros pompa, getaran, kopling sabuk, vibrometer.

VIBRATION ANALYSIS OF MUONTING IN AND IN BELT ON CENTRIFUGAL PUMP SHAFT 4,5 MM THICK 98 MM WIDE

Erwen Martianis

A Mechanical Engineering Lecturer Bengkalis Polytechnic
Jl. Bathin Alam, Sei. Alam, 28761 Bengkalis – Riau
Email: erwin @polbeng.ac.id

ABSTRACT

Vibration arising in a centrifugal pump shaft is a phenomenon occurred due to the distance between the two couplings, the thickness and the width of belt, and the configuration of belt mounting position on the coupling. Vibration is widely used as a means of analyzing the machine either by motion or translation. The knowledge of vibration and the data produced are very essential for maintenance and troubleshooting. This capability can assist a company in reducing the incident of downtime and can increase the benefit either in terms of production or longer life of engine. The vibration resulting from a cyclic force through the existing elements of machine in which the elements interact one another and the energy is decificated through the structure in the form of vibration. The impact of vibration is the incident of noise, the decrease of pump performance, and the vibration can damage the component of the pump especially the shaft and bearings. In this study, the distance of couplings, the thickness and the width of belt, and the configuration of belt mounting position on the coupling were varied. With this variation, the behavior of the existing vibration can be observed and known by using VQ-400-A OMETRON vibrometer connected to U3-LV labjack and then transmitted to PC in the form of digital to analog voltage. This model measured the vibration in the horizontal direction or the X-axis where the laser focus point was on the rotating pump shaft. The labjack connected to PC laptop was used to display the result of measurement. The result of this study showed that, to generate a relatively low vibration of 1.05 mm/s, the best mounting position for the belt of 4.5 mm thick, 98 mm wide, and flens distance of 7.5 cm was in and in mounting position. The result of this study is expected to be able to become the reference in selecting the belt size, the distance between the two couplings, and the best configuration model of belt mounting position on the flens coupling.

Keywords: Centrifugal Pump, Pump Shaft, Vibration, Coupling Belt, Vibrometer,

1. PENDAHULUAN

Pompa adalah salah satu mesin fluida yang digunakan untuk memindahkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain

dengan cara menaikkan tekanan fluida tersebut. Pompa digunakan sebagai alat transportasi fluida (horizontal maupun vertikal), untuk menaikkan tekanan dan kecepatan. Dari sekian banyak pompa, yang paling sering digunakan adalah



pompa sentrifugal. Hal ini terkait karena keunggulannya dibandingkan dengan pompa yang lain, yaitu: harga yang murah, konstruksi sederhana, pemasangannya mudah, kapasitas dan *head* yang tinggi, kemudahan operasional serta pemeliharaan (Girdhar, 2005), karena keunggulannya ini sehingga pompa sentrifugal banyak digunakan oleh industri. Namun dalam pengoperasian di lapangan sering dijumpai kegagalan, salah satu penyebabnya adalah getaran yang ditimbulkan dengan penyambungan kopling sebagai penerus putaran dan daya. Akibat getaran tersebut dapat merusak poros, bantalan, timbulnya *noise*, penurunan *head*, penurunan kapasitas hingga penurunan efisiensi dari pompa tersebut.

Menurut kurva tingkat kondisi, maka salah satu cara yang paling untuk mendeteksi awal gejala kerusakan pada mesin termasuk pompa adalah dengan menggunakan respon vibrasi.

Kopling adalah merupakan suatu elemen mesin yang berfungsi sebagai penerus putaran dan daya dari poros penggerak ke poros yang digerakkan secara pasti (tanpa terjadi slip), dimana sumbu kedua poros tersebut terletak pada satu garis lurus atau dapat sedikit berbeda sumbunya. Berbeda dengan kopling tak tetap yang dapat dilepaskan dan dihubungkan bila diperlukan, maka kopling tetap selalu dalam keadaan terhubung (Sularso dan Suga, 1997).

Kopling yang akan direncanakan pada penelitian ini adalah kopling sabuk yang dapat meneruskan putaran dan daya antara poros penggerak dengan poros yang digerakkan dengan getaran yang dihasilkan cukup kecil dan fleksibel, hal ini disebabkan karena tidak mengharuskan poros terletak pada garis lurus atau satu sumbu.

Indikasi kecilnya getaran yang terjadi pada poros pompa dapat dirasakan dimana tingkat kerusakan pada poros pompa dan bantalan yang kecil. Respon vibrasi dari suatu pompa merupakan salah satu indikator yang menunjukkan kondisi mekanis dari suatu pompa.

Kopling yang digunakan dalam penelitian ini adalah kopling sabuk yang dirancang dengan menggunakan sabuk yang diikat dengan menggunakan baut dan mur dihubungkan antara kopling pada poros motor dengan kopling pada poros pompa.

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

- Umum

Untuk mendeteksi fenomena getaran yang terjadi pada poros pompa sentrifugal dengan menggunakan sistem penyambungan kopling *flens* sabuk yang sebagai penerus daya dan putaran.

- Khusus

1. Menganalisa getaran yang terjadi pada poros pompa dengan *flens* jarak 5,5 cm, 6,5 cm dan 7,5 cm.
2. Menganalisa getaran yang terjadi pada poros pompa dengan sabuk tebal 4,5 mm dan lebar 98 mm.
3. Menganalisa getaran yang terjadi pada poros pompa dengan posisi pemasangan sabuk dalam-dalam pada kopling.

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Sinyal getaran dapat dijadikan sebagai acuan untuk mendeteksi dini getaran yang terjadi pada poros pompa sentrifugal.
2. Memberikan informasi mengenai metode pengujian fenomena getaran pada poros pompa sentrifugal dan sebagai acuan untuk menghindari terjadinya getaran yang lebih besar.



Gambar 1. Pompa sentrifugal dengan pemasangan kopling flens sabuk dalam-dalam

Kopling sabuk

Kopling ini dimodifikasi untuk meneruskan momen dengan perantara flens sabuk yang diikat dengan menggunakan baut dan mur. Dengan demikian pembebanan yang berlebihan pada poros penggerak pada waktu dihubungkan, dapat dihindari dengan adanya sabuk yang terbuat dari bahan yang fleksibel, maka kopling menjadi tidak kaku, sehingga ketidaksumbuan poros waktu pemasangan dimungkinkan.

Kopling harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Mudah dihubungkan atau dilepaskan
2. Mampu meneruskan daya dan putaran sepenuhnya tanpa slip
3. Kuat terpasang pada porosnya
4. Tak terdapat bagian yang mudah lepas



Gambar 2. Kopling dan sabuk

Pompa

Pompa adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan suatu fluida dari suatu tempat ke tempat lain dengan cara menaikkan tekanan cairan tersebut. Standart pompa sesuai dengan API 610, ISO 5199, DIN 24256 (www.truflo.com).

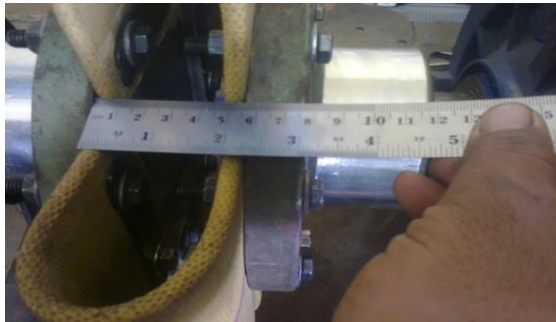


Gambar 3. Poros pompa

2. METODOLOGI

Subjek penelitian ini adalah poros pompa sentrifugal yang terhubung dengan poros motor dengan sistem penyambungan kopling sabuk dalam-dalam yang diikat dengan baut dan mur, dipasang sesuai model instalasi sederhana. Spesifikasi pompa penelitian sebagai berikut :

- Merk : Grundfos
- Head : 70 m
- Kapasitas : 30 ltr / det
- Daya : 3700 watt
- Voltage : 380 volt
- Putaran : 2950 rpm



Gambar 4. Pemasangan sabuk ke kopling



Gambar 5. Titik pengukuran

Prinsip kerjanya dimulai dengan daya dan putaran dari motor listrik diteruskan ke poros motor dengan sistem pemasangan kopling sabuk yang diikat dengan baut dan mur diteruskan ke poros pompa sentrifugal.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini antara lain :

1. Motor listrik *Marelli Motori* yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan yang sudah ada atau akan dibuat oleh peneliti. Alat pengujian ini merupakan satu kesatuan dari komponen berikut poros motor dan *flens* yang terhubung dengan poros dengan daya 3700 watt dan putaran 2950 rpm, yang digunakan untuk meneruskan putaran keporos pompa.
2. Pompa sentrifugal *Grundfos* yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan yang sudah ada atau akan dirancang oleh peneliti. Pengujian ini merupakan satu kesatuan dari komponen berikut : motor dan flens yang terhubung dengan poros dengan daya 3700 watt dan putaran 2950 rpm terhubung dengan sistem penyambungan kopling sabuk yang meneruskan keputaran poros pompa dengan kapasitas aliran 30 liter/s, yang digunakan untuk memompa dan mensirkulasikan fluida air.

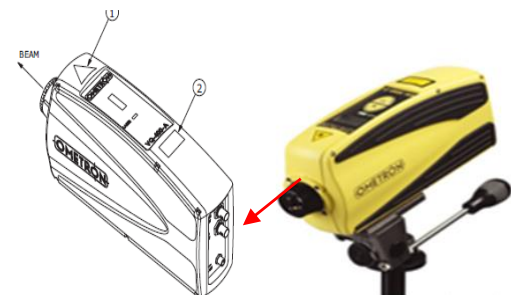
3. Poros motor yang digunakan $\phi 43$ mm dengan panjang 90 mm, digunakan meneruskan putaran ke poros pompa sentrifugal.
4. Poros pompa yang digunakan $\phi 32$ mm dengan panjang 90 mm, digunakan meneruskan putaran dari poros ke *impeller* pompa untuk memompa dan mensirkulasikan fluida air.
5. Flens motor dan pompa yang digunakan $\phi 165$ mm dengan tebal 25 mm
6. Sabuk digunakan dalam penelitian ini adalah sabuk dengan ukuran yang sama dan dengan jarak yang berbeda, diikat dengan baut dan mur pada flens.
7. Kamera digital Canon dan HP Nokia N73, yang digunakan untuk mengabadikan eksperimen.
8. *Digital Photo Contact Tachometer*, digunakan untuk mengukur putaran poros pompa.

Set up peralatan pengujian dilakukan untuk memperoleh data eksperimental sebagai berikut:

1. Hubungkan kabel daya dari *power supply* ke *Vibrometer* dan *labjack*
2. Hubungkan *Labjack* dengan *Vibrometer* dengan menggunakan *coaxial*
3. Hubungkan *labjack* ke PC dengan menggunakan *USB cable*
4. Pasang dan operasikan *vibrometer* dengan tegangan 12 Volt/1A yang arusnya diatur melalui *power supply*
5. Kondisikan jarak antara *vibrometer* dengan poros pompa dengan jarak 24 cm
6. Operasikan motor dan pompa dan biarkan bekerja berputar sekitar 20 menit untuk kestabilan putaran
7. Arahkan *vibrometer laser* keporos pompa dan mulai lakukan pengukuran dan pengamatan sesuai dengan variabel yang di inginkan dan *labjack* dapat digunakan converter untuk memonitor dan mengontrol kerja dari PC laptop.



Gambar 6. Tachometer dan vernier caliper



Gambar 7. Vibration meter

Metode pengujian yang dilakukan yaitu pengujian langsung, dimana pada pengujian ini, seluruh variabel nilainya didapat dari hasil pengukuran dan digunakan sebagai bahan pengamatan atau analisis.



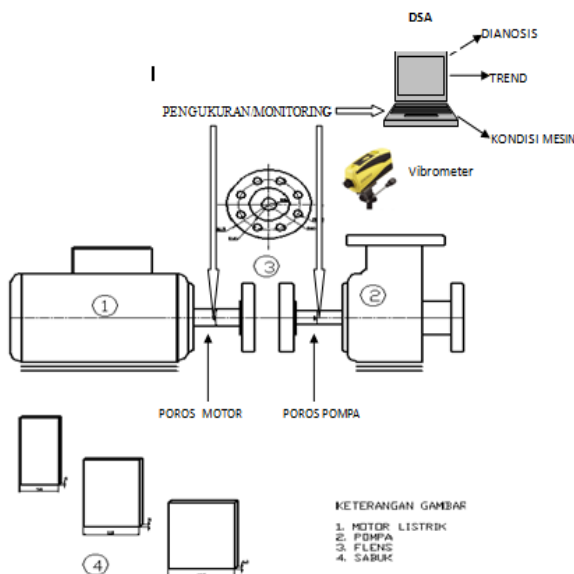
Gambar 8. Labjack



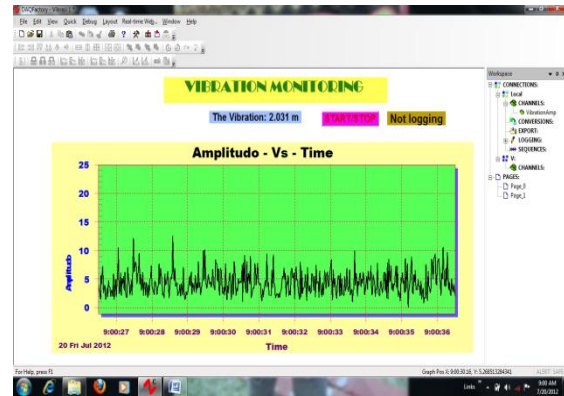
Gambar 9. Kabel catu daya dan coaxial

Penyelidikan getaran yang timbul akibat variasi jarak kopling, konfigurasi posisi pemasangan sabuk ke kopling, lebar dan tebal sabuk dengan titik pengukuran searah sumbu horizontal. Pengukuran dilakukan pada titik yang telah ditentukan yaitu dengan pengambilan berdasarkan time domain, dan frekuensi domain dimana titik berat pengukuran berada pada poros pompa yang berputar.

Secara eksperimental pengujian dan pengambilan data dilakukan untuk memperoleh karakteristik getaran akibat dari sistem penyambungan kopling sabuk pada poros pompa.



Gambar 10. Hubungan pengukuran dan monitoring obyek pemantauan dengan analisis data

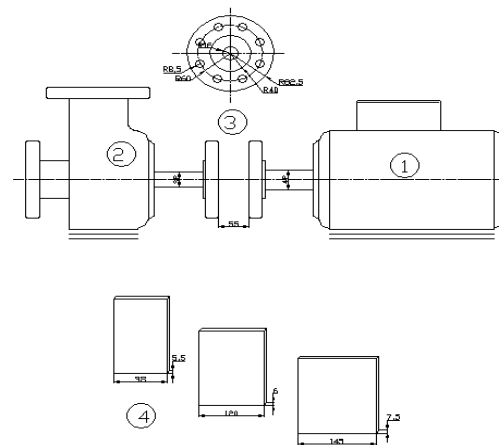


Gambar 11. Data pengamatan

Sesuai dengan maksud penelitian, variabel ini menjadi fokus perhatian yang perlu dikondisikan untuk pengolahan data guna mendapatkan suatu hasil yang mendekati sempurna.

Adapun variabel yang diamati dalam penelitian ini adalah:

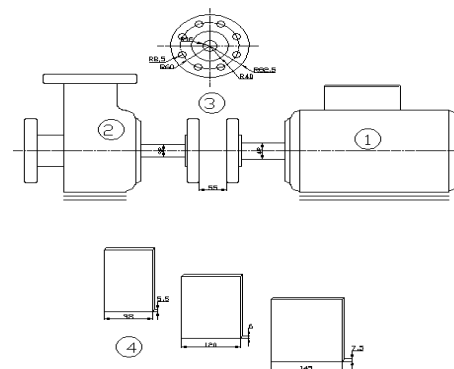
1. Putaran input dari motor
2. Putaran output dari motor keporos pompa
3. Jarak antara kedua kopling



KETERANGAN GAMBAR

1. MOTOR LISTRIK
2. POMPA
3. FLENS
4. SABUK

Gambar 12. Pemasangan sabuk dengan jarak 7,5 cm



KETERANGAN GAMBAR

1. MOTOR LISTRIK
2. POMPA
3. FLENS
4. SABUK

Gambar 13. Konfigurasi posisi pemasangan sabuk dalam-dalam

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

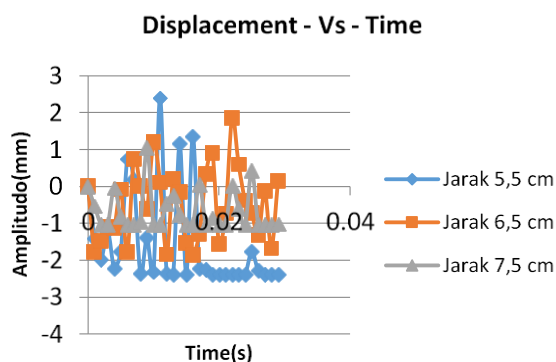
Hasil perbandingan dan analisa getaran dapat di lihat pada keterangan dibawah ini:

Pada pemasangan sabuk dalam-dalam, dengan lebar dan tebal sabuk yang sama (T 4,5 mm L 98 mm), untuk jarak 7,5 cm mempunyai simpangan yang terkecil (1,05 mm/s) jika dibandingkan dengan jarak yang berbeda (5,5 cm 6,5 cm).

Tabel 1. Perbandingan analisa getaran pada jarak yang berbeda, lebar dan tebal yang sama (L98 T4,5), posisi sabuk dalam-dalam

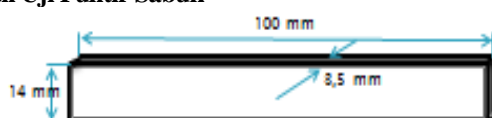
No	Time(s)	Disp 5,5(L98T4,5)	Disp 6,5(L98T4,5)	Disp 7,5(L98T4,5)
1	0	0	0	0
2	0.001	-1.39666	-1.770971235	-0.5366452
3	0.002	-1.9720011	-1.471314535	-1.02808233
4	0.003	-1.20488	-1.093746935	-1.02808233
5	0.004	-2.2177197	-1.129705835	-0.039215
6	0.005	-1.7562483	-0.086899835	-0.8303089
7	0.006	0.736896	-1.776964435	-1.02808233
8	0.007	0.197514	0.746145165	-1.02808233
9	0.008	-2.36754806	0.008990165	-0.9561647
10	0.009	-1.384674	-0.596316835	1.051536
11	0.01	-2.31360984	1.201624165	-1.02808233
12	0.011	2.402988	0.098887165	-1.02808233
13	0.012	-2.36754806	-1.848882025	-0.4767139
14	0.013	-2.37953433	0.200770165	-0.2489747
15	0.014	1.156415	-0.152824835	-0.7643844
16	0.015	-2.37953433	-1.531245835	-1.02808233
17	0.016	1.366175	-1.854875165	-1.02808233
18	0.017	-2.2237128	-1.279534135	0.050682
19	0.018	-2.2536785	0.326626165	-1.02808233
20	0.019	-2.37953433	0.901967165	-0.8542814
21	0.02	-2.37953433	-1.561211535	-1.02808233
22	0.021	-2.37953433	-0.734158835	-1.02808233
23	0.022	-2.37953433	1.854875165	0.038696
24	0.023	-2.37953433	0.590324165	-0.6025697
25	0.024	-2.37953433	-0.386556835	-1.02808233
26	0.025	-1.7682345	-0.728165835	0.42825
27	0.026	-2.2896373	-1.321486135	-1.02808233
28	0.027	-2.37953433	-0.134845835	-1.02808233
29	0.028	-2.37953433	-1.675081135	-1.02808233
30	0.029	-2.37953433	0.140839165	-1.01010292

Dari grafik pengujian pada gambar menunjukkan:



Gambar 14. Grafik analisa getaran pada jarak yang berbeda, lebar dan tebal yang sama (L98 T4,5), posisi sabuk dalam-dalam

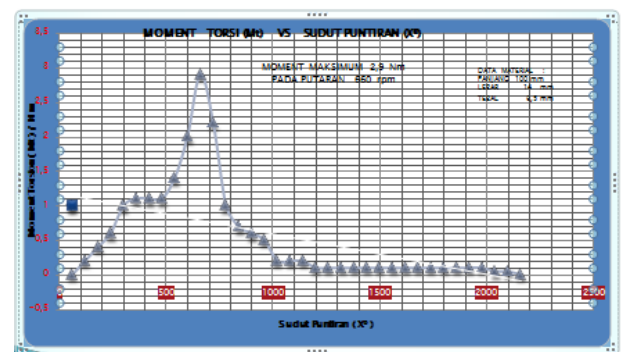
Hasil Uji Puntir Sabuk



Gambar 15. Spesimen uji

Tabel 2. Pengambilan data uji puntir sabuk

Pelarian / Momen	Sudut Berputaran (°)	Derivasi (T) Rum
10	10	0
10	110	0.2
10	120	0.4
10	130	0.6
10	140	0.8
10	150	1
10	160	1.1
10	170	1.1
10	180	1.1
10	190	1.2
100	200	1
110	210	1.8
110	220	1.1
110	230	1
110	240	0.7
110	250	0.8
110	260	0.3
110	270	0.3
110	280	0.3
110	290	0.3
110	300	0.3
110	310	0.3
110	320	0.3
110	330	0.3
110	340	0.3
110	350	0.3
110	360	0.3
110	370	0.3
110	380	0.3
110	390	0.3
110	400	0.3
110	410	0.3
110	420	0.3
110	430	0.3
110	440	0.3
110	450	0.3
110	460	0.3
110	470	0.3
110	480	0.3
110	490	0.3
110	500	0.3
110	510	0.3
110	520	0.3
110	530	0.3
110	540	0.3
110	550	0.3
110	560	0.3
110	570	0.3
110	580	0.3
110	590	0.3
110	600	0.3
110	610	0.3
110	620	0.3
110	630	0.3
110	640	0.3
110	650	0.3
110	660	0.3
110	670	0.3
110	680	0.3
110	690	0.3
110	700	0.3
110	710	0.3
110	720	0.3
110	730	0.3
110	740	0.3
110	750	0.3
110	760	0.3
110	770	0.3
110	780	0.3
110	790	0.3
110	800	0.3
110	810	0.3
110	820	0.3
110	830	0.3
110	840	0.3
110	850	0.3
110	860	0.3
110	870	0.3
110	880	0.3
110	890	0.3
110	900	0.3
110	910	0.3
110	920	0.3
110	930	0.3
110	940	0.3
110	950	0.3
110	960	0.3
110	970	0.3
110	980	0.3
110	990	0.3
110	1000	0.3



Gambar 16. Hasil Uji Puntir

4. KESIMPULAN

Sesuai dengan tujuan penelitian yaitu mendeteksi fenomena getaran yang terjadi pada pompa sentrifugal dengan menggunakan sinyal getaran, maka berdasarkan hasil pembahasan dan analisa dapat disimpulkan bahwa jarak flens, tebal dan lebar sabuk serta posisi pemasangan sabuk menghasilkan tingkat getaran yang berbeda dimana, hasil penelitian menunjukkan bahwa, getaran yang terjadi pada poros pompa dengan pemasangan sabuk yang sama (T4,5 mm dan L98 mm) dengan jarak flens 7,5 cm pada posisi pemasangan sabuk dalam-dalam didapat simpangan yang terkecil yaitu 1,05 mm/s.

5. SARAN

Untuk pengembangan lebih lanjut terhadap penelitian ini maka berikut ini disampaikan beberapa saran, sebagai berikut:

- Selain digunakan sebagai converter untuk pembacaan keluaran getaran, *labjack* juga dapat diujicoba untuk



pembacaan keluaran seperti : pembacaan keluaran tegangan sensor, arus, daya, temperatur dan *humidity*, *wind speed*, *force*, *pressure*, *strain*, *acceleration*, RPM, intensitas cahaya, intensitas suara, konsentrasi gas, posisi dan lain-lain.

2. Perlu pengembangan lebih lanjut mengenai penelitian sambungan kopling flens sabuk, baik dari segi material, panjang sabuk serta jumlah sabuk yang dipasang diantara kedua *flens*.
3. Sebelum menggunakan alat uji dan komponen pendukung lainnya perlu disesuaikan dengan kondisi dan situasi supaya hasilnya lebih sinkron dengan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bagiasna., dan Komang, "Analisa Sinyal Getaran", PT. Krakatau Engeneering, Cilegon Jawa Barat
- [2] Girdhar, P., dan Octo Moniz. Practical Centrifugal Pumps Design, Operation and Maintenance, Netherlands, IDC Technologies, 2005.
- [3] Hajar, I., "Studi Eksperimental Deteksi Fenomena Kavitasi Pada Pompa Sentrifugal Menggunakan Sinyal Getaran Untuk Condition Monitoring. Tesis", Medan, USU, 2010
- [4] Hariharan, V., And Srinivasan, PSS, Vibration analysis of misaligned shaft-ball bearing sytem Vol.2, 2009, hal.45-50.
- [5] ISO 10816-3, 2010 Evaluation Standard for Vibration Monitoring, 24 Nopember 2010, www.mantenimientoplanificado.com.
- [6] Mobley, R. K., Lindley, R., Higgins, dan Darrin, J, Wikoff., Maintenance Engineering Handbook, Seventh Edition, NewYork, McGraw-Hill Book Company, 2008.
- [7] Pain, H. J., The Physics of Vibrations and Waves. 6th Edition. London, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [8] Richmond, V. A., Air Bubble and Cavitation Vibration Signatures of a Centrifugal Pump. SpectraQuest Inc. 2006.
- [9] Rusli, M., Bur, M., dan Hidayat, H., "Analisa Getaran dan Suara Pada Rem Cakram Saat Beroperasi", STTM, 2010
- [10] Scheffer, C., dan Girdhar, P., Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance, Netherlands, IDC Technologies, 2004.
- [11] Suhardjono, "Analisis Sinyal Getaran untuk Menentukan Jenis dan Tingkat Kerusakan Bantalan Bola (Ball Bearing)", Vol.6, 2004, hal.39-48
- [12] Suryanto, "Elemen Mesin 1", Pusat Pengembangan Pendidikan Politeknik Bandung, 1995.
- [13] Sularso, dan Haruo Tahara., "Pompa dan Kompresor Pemilihan, Pemakaian dan Pemeliharaan". Edisi Keenam, Jakarta, PT. Pradya Paramita, 2006.
- [14] Gersik, 2010, "Teori Vibrasi", 20 Nopember 2010, <http://vibrasi.wordpress.com/category/teori-vibrasi>.
- [15] TSP Series API 61", 10th Edition Process Pump, 24 November 2010, www.truflo.com.



SIMULASI STRUKTUR DAN PEMBUATAN MESIN TEKAN RIVET DENGAN SISTEM HIDROLIK YANG DIKONTROL DENGAN *PROGRAMMABLE LOGIC CONTROL (PLC)*

Taufiq Hidayat¹⁾, Beni Tri Sasongko²⁾, Muslim Mahardika³⁾

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada^{1,2,3)}

Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia^{1,2,3)}

Phone : +62-274-521673 | Fax : +62-274-521673 2013^{1,2,3)}

+62818270421¹⁾, +6285643593838²⁾, +6285743271425³⁾

E-mail : taufiq_cnc@yahoo.co.id¹⁾, beni_trisasonko@yahoo.com²⁾, muslim_mahardika@yahoo.com³⁾

ABSTRAK

Industri manufaktur memegang peranan penting dalam penyediaan barang-barang yang berkualitas. Dalam industri manufaktur, sistem mekanisasi terus dioptimalkan untuk menekan biaya produksi dan menjaga keseragaman kualitas produk yang dihasilkan. Satu contoh usaha kecil menengah yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah industri pengecoran aluminium di daerah Giwangan kota Yogyakarta. Industri ini memproduksi peralatan rumah tangga yang pemasarannya masih untuk lokal walau sebagian sudah merambah wilayah luar Yogyakarta. Produk-produk sebagian besar dibuat menggunakan alat bantu atau mesin yang sederhana, bahkan untuk beberapa proses riveting masih menggunakan tenaga manusia/manual menyebabkan hasil akhir kurang baik dari segi kualitas maupun kuantitas. Permasalahan ini bisa diatasi dengan merekayasa dan membuat mesin penekan rivet sehingga kualitas produk meningkat. Penelitian dilakukan melalui 6 (enam) tahapan proses yakni; pendesainan rangka mesin, manufacturing, perancangan sistem hidrolik, perakitan, perancangan kontrol PLC dan pengujian. Rancangan struktur rangka mesin dianalisa menggunakan perangkat lunak analisis tegangan sehingga memberikan gambaran bagian mana dari struktur yang mengalami tegangan dan defleksi maksimal tetapi masih dalam batas aman. Perancangan sistem hidrolik dan pengontrolannya dilakukan untuk mendapatkan sistem kerja yang paling sederhana dan efektif. Pengujian hasil penekanan, dilakukan dengan uji tarik dan geser dimana spesimen berdiameter 5 mm menghasilkan tegangan tarik sebesar 12,7 kg/mm² dan tegangan geser 9,52 kg/mm²

Kata kunci: simulasi struktur, mesin tekan, rivet, sistem hidrolik.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan industri, sebagai motor penggerak perekonomian, akan terus didorong perannya karena telah terbukti memberi kontribusi yang berarti terhadap pembangunan nasional. Mengingat perannya yang strategis, sektor industri khususnya industri manufaktur, perlu ditingkatkan kinerjanya. Salah satu masalah yang menuntut perhatian bersama adalah lemahnya penguasaan teknologi industri. Fakta di pasar menunjukkan bahwa sebagian besar produk lokal dihasilkan oleh industri berbasis teknologi rendah, yakni industri yang menghasilkan nilai tambah relatif rendah. Kondisi ini juga disebabkan oleh belum terpadunya pengembangan iptek di lembaga-lembaga penelitian yang tersebar di berbagai instansi dengan dunia industri. Ketertinggalan atas penguasaan teknologi membuat daya saing produk industri lemah dalam menghadapi persaingan yang semakin ketat. Di pasar lokal, daya saing produk kita semakin terancam akibat belum meluasnya penerapan standarisasi nasional [1].

Industri manufaktur memegang peranan penting dalam penyediaan barang-barang yang berkualitas. Dalam industri manufaktur, sistem mekanisasi terus dioptimalkan untuk menekan biaya produksi dan menjaga keseragaman kualitas produk yang dihasilkan. Dengan perkembangan sistem mekanisasi, di mana teknologi mesin menjadi kunci utamanya, memudahkan manusia untuk mengerjakan sesuatu menjadi lebih efisien dan cepat. Sistem mekanisasi dalam proses manufaktur tidak hanya ditemui dalam skala industri-industri berskala besar, namun sistem ini dapat diterapkan juga dalam industri kecil menengah. Diharapkan, produk-produk industri kecil menengah selain dapat memenuhi kebutuhan lokal, dapat juga bersaing dengan produk yang dihasilkan oleh industri besar karena adanya standarisasi produk hasil sistem mekanisasi. Pada akhirnya, sistem ini dapat mendorong dunia usaha kecil menengah untuk

mengembangkan usaha menjadi lebih maju, sehingga kesejahteraan dapat dinikmati pada berbagai lapisan masyarakat.

Salah satu contoh usaha kecil menengah yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah industri pengecoran aluminium di daerah Giwangan kota Yogyakarta. Produk dari industri ini berupa peralatan rumah tangga yang pemasarannya masih untuk lokal walau sebagian sudah merambah wilayah luar Yogyakarta.

Dari bahan dasar aluminium bekas, kemudian diolah dengan cara cor ulang menjadi peralatan seperti wajan, panci, ketel, cetakan kue dan peralatan lainnya. Produk-produk tersebut dibuat sebagian besar masih menggunakan alat bantu atau mesin yang sederhana, bahkan untuk beberapa proses akhir masih menggunakan tenaga manusia.

Dari hasil pengamatan dan survei yang telah penulis lakukan, beberapa proses yang dikerjakan manual menyebabkan hasil akhir kurang baik dari segi kualitas maupun kuantitas. Penurunan ini berbanding lurus dengan jam kerja pekerjanya, dimana saat masih pagi atau awal jam masuk kerja hasil pekerjaannya baik tetapi semakin siang saat kondisi pekerja sudah mulai lelah, hasil pekerjaan juga semakin menurun.

Proses akhir dari produksi industri aluminium di seputaran Giwangan Kota Yogyakarta yang masih mengandalkan tenaga manusia dirasa sangat menghambat proses produksi. Permasalahan inilah yang akan penulis coba untuk ikut mengatasinya dengan merekayasa dan membuat suatu mesin yang bisa mempertahankan kualitas proses akhir peralatan rumah tangga yang diproduksi oleh industri aluminium berupa sebuah alat/mesin tekan untuk proses *riveting*.

Dengan mesin tekan bertenaga hidrolik yang dibuat diharapkan hasil akhir proses pengelingan akan rapi dan seragam dari awal hingga akhir jam kerja sehingga kualitas produk meningkat.

Hasil beberapa penelitian yang telah dilakukan menyatakan bahwa proses penggunaan hidrolis yang digabungkan dengan kontrol PLC mempermudah suatu proses manufaktur [2]. Penggunaan kontrol PLC sangat mudah diaplikasikan didalam otomatisasi mesin dan sangat umum dipakai dalam proses produksi di bidang manufaktur dimana biaya pengembangan dan mempertahankan sistem otomatisasi relatif lebih tinggi [3]. Siti Noor Azrin Sukiran (2010) telah melakukan penelitian tentang desain dan pembuatan mesin *punch* dengan tenaga pneumatik dengan menggunakan solidwork 2007 dalam pendesainan dan Fluidsim untuk mensimulasikan proses.

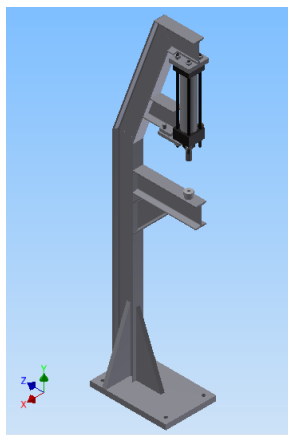
Dengan perkembangannya teknik komputer, analisi kekuatan desain suatu gambar mekanik yang merupakan pekerjaan sulit dan menghabiskan sebagian waktu pendesainan bisa dengan mudah dilakukan dan simulasi mekanismenya dapat dilihat sebelum prototype dibuat [4].

Soegeng Wijono (2011) mengadakan penelitian tentang pembuatan ulir pada baut untuk penyambung patah tulang, dimana dalam makalahnya disajikan suatu metode konvensional yaitu melalui proses pemesinan (*machining processes*) dan proses penempaan (*forging processes*). Proses penempaan pada penelitian tersebut menggunakan tenaga hidrolik dimana *hexagon tool* secara perlahan ditekan pada *bone scaw* sehingga membentuk *slot hexagon* sedalam 3 mm yang berfungsi sebagai tempat kunci L (*hexagon key*). [5]

2. METODOLOGI

Proses pembuatan mesin tekan *rivet* ini melalui enam tahapan proses yaitu; pendesainan kerangka, manufaktur, perancangan sistem hidrolik, perakitan, perancangan kontrol PLC dan pengujian.

Pendesainan kerangka menggunakan perangkat lunak CAD yang kemudian disimulasikan tegangan dan defleksi yang terjadi pada struktur rangka tersebut menggunakan perangkat lunak *stress analysis*.



Gambar 1. Desain struktur rangka mesin tekan *rivet*

Proses *manufacturing* selanjutnya adalah pembuatan bagian-bagian mesin menggunakan mesin perkakas konvensional diantaranya yaitu mesin bubut, milling, bor, gerinda. Bersamaan itu pula dikerjakan proses perancangan sistem hidroliknya, dimana pada tahap ini disimulasikan menggunakan bantuan perangkat lunak FluidSim-H versi demo. Komponen hidrolik utama yang digunakan adalah aktuator silinder *double acting*, katup kontrol arah 4/3 solenoid, *hydraulic power pack* dan katup kontrol aliran satu arah.

Tahapan berikutnya yaitu perakitan bagian-bagian mesin yang sudah dibuat dimana penyambungan bangiannya menggunakan las listrik dan mur-baut.

Untuk kontrol sistem sengaja menggunakan PLC karena mesin ini selain fungsi utamanya sebagai penekan *rivet* juga dikembangkan pula sebagai pemotong kawat yang digunakan sebagai bahan baku *rivet*nya. PLC yang digunakan yakni LS XGB seri XBC10E dimana mempunyai 6 input dan 4 output sedang pemrogramannya dengan sistem ladder diagram menggunakan perangkat lunak XG5000 versi 3.62

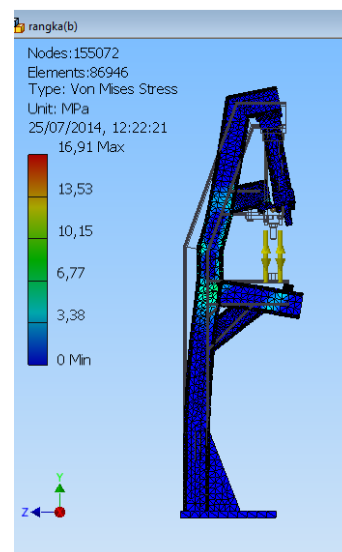


Gambar 2. Perangkat LS XGB seri XBC10E

Pengujian unjuk kerja mesin dengan melakukan uji tarik dan geser terhadap *rivet* berbahan aluminium yang ditekan pada dua buah plat. Diameter *rivet* yang diujikan yakni 3 mm, 4 mm, dan 5 mm dilakukan menggunakan mesin uji tarik untuk memperoleh nilai kekuatan tarik dan geser dari hasil pengelangan tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

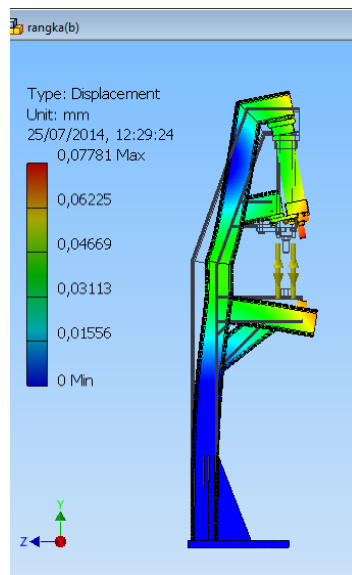
Penggunaan perangkat lunak *stress analysis* disini bukan untuk mendapatkan hasil angka-angka yang pasti pada bagian struktur tetapi dimaksudkan untuk melihat apa ada bagian struktur yang mengalami *stress* dan *defleksi* berlebihan yang ditandai dengan warna merah pada hasil simulasinya.



Gambar 3. Hasil simulasi terhadap *stress*

Pada simulasi ini tekanan yang dikenakan pada struktur sebesar 3 Mpa yang didapat dari uji awal *rivet* diameter 5 mm yang diujal dipasaran menggunakan uji tekan. Terlihat tidak

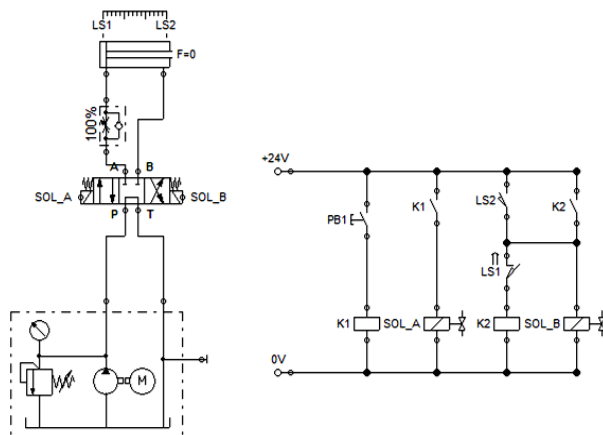
ada bagian yang berwarna merah, menandakan struktur aman untuk digunakan.



Gambar 4. Hasil simulasi terhadap *displacement*

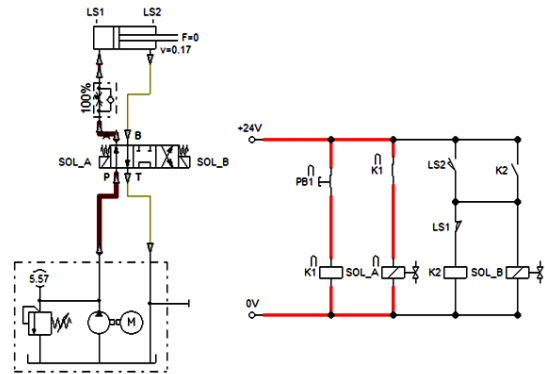
Displacement yang terjadi terlihat pada gambar 4, dimana ada bagian yang berwarna merah yang menandakan bagian tersebut mengalami pergeseran secara maksimal sekitar 0,07781 mm. Besaran angka ini dirasa tidak terlalu berpengaruh terhadap hasil penekanannya.

Proses selanjutnya yang perlu dibahas yaitu perancangan sistem hidrolik. Pada proses ini sistem disimulasikan menggunakan perangkat lunak FluidSim-H versi demo. Desain yang akan diterapkan menggunakan silinder kerja ganda dengan tekanan kerja maksimal 3 MPa dan kontrol aliran diproses oleh katup kontrol aliran 4/3 dengan aktuasi elektrik dan pegas.

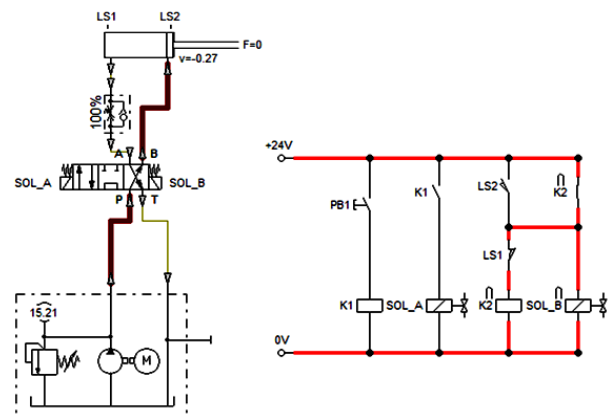


Gambar 5. Rangkaian simulasi sistem hidrolik

Saat PB1 (pedal) ditekan maka arus listrik akan memicu relay K1 sehingga solenoid A (Sol_A) akan aktif yang selanjutnya katup kontrol arah 4/3 bergeser kekanan sehingga fluida mengalir menuju aktuator sisi kiri. Kecepatan aliran fluida menuju aktuator ini diatur menggunakan katup kontrol aliran satu arah. Aktuator akan berhenti dimanapun jika PB1 dilepas dan maju lagi jika PB1 kembali ditekan. Saat aktuator mencapai posisi dimana terdapat *limit switch* 2 (LS2), aktuator akan berhenti walaupun PB1 tetap ditekan dan kembali keposisi awal secara otomatis jika PB1 dilepas.



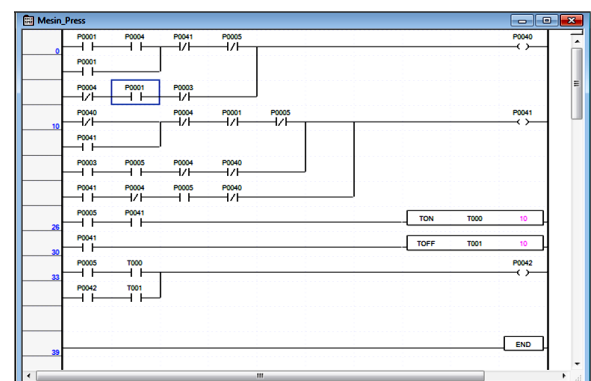
Gambar 6. Saat aktuator bergerak maju



Gambar 7. Saat aktuator kembali posisi awal

Penggunaan *Programmable Logic Controller (PLC)* diterapkan karena dalam rencana pengembangannya, mesin ini akan dibuat multifungsi yaitu selain sebagai penekan *rivet*, juga difungsikan untuk memotong kawat aluminium yang telah digunakan sebagai bahan *rivet* selama ini sehingga dengan satu *switching* maka mesin tersebut berubah fungsi.

Pemrograman PLC menggunakan perangkat lunak XG5000 versi 3.62 yang kompatibel dengan perangkat PLC-nya yaitu LS XGB seri XBC10E dimana bahasa pemrogramannya dengan mode *ladder diagram*.



Gambar 8. *Ladder diagram* multifungsi

Ladder diagram yang dibuat sudah lengkap dengan program fungsi pemotong, dimana P0040 adalah solenoid A dan P0041 adalah solenoid B, sedangkan P0042 akan digunakan untuk motor pengumpan kawat menuju pemotong. Perubahan fungsi mesin diaktifkan dengan *switch* P0005, dimana jika P0005 tidak *generated* maka pergerakan mesin akan sama dengan saat dimodelkan pada sistem

hidrolik diatas dan jika P0005 *generated* maka solenoid A dan B secara otomatis aktif terus berulang-ulang. Motor pengumpan akan berputar saat aktuator kembali ke posisi semula dan berhenti saat aktuator maju menekan. Lamanya motor berputar diatur menggunakan timer (T000 dan T001) hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan panjang pemotongan yang diharapkan

Pengujian hasil penekanan rivet oleh mesin tekan yang dibuat dilakukan terhadap rivet berdiameter 5 mm yang terbuat dari bahan aluminium pada dua buah plat. Hasil uji tarik menghasilkan kekuatan sebesar 12,7 kg/mm² dan tegangan geser 9,52 kg/mm².



Gambar 9. Hasil jadi mesin tekan rivet

4. KESIMPULAN

Penggunaan perangkat lunak untuk pendesainan rangka, simulasi pemodelan analisa *stress* dan *displacement* serta pemodelan sistem hidrolik sangat membantu untuk mendapatkan hasil perancangan mesin tekan rivet secara cepat dan efektif dimana bisa ditentukan apakah desain dan sistem yang akan dibuat bisa diterapkan atau tidak dan penggunaan kontrol PLC terhadap sistem hidrolik mempermudah dalam mengubah unjuk kerja dari sistem hidrolik tersebut.

Hasil penekanan yang telah diujikan dan ditunjukan kepada stakeholder (pengusaha) di Giwangan mendapatkan respon yang positif dan mampu menarik minat untuk diproduksi lebih banyak lagi. Pengusaha menyarankan untuk melakukan inovasi rancang bangun pada mesin perkakas lain yang dapat berguna untuk meningkatkan mutu produk yang dihasilkan khususnya dalam industri berskala kecil menengah dan dalam kaitan penelitian ini ada harapan untuk memfungsikan mesin ini sebagai *punch*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bappenas, 2009, Rencana Awal Kerja Pemerintah Tahun 2007, 5 Mei 2014, www.bappenas.go.id/data-dan-informasi-utama/rancangan-awal-rencana-kerja-pemerintah-tahun-2007/?&kid=1406209557
- [2] Wang Hong a, 2011. Design of PLC-base Hydraulic System for Workpiece Turnover. *Procedia Engineering* 15 (2011) 122-126, Elsevier.

- [3] Kelvin T Erickson (2005), *Programmable Logic Controllers: An Emphasis on Design and Applications*, Dagwood Vally Press LLC.
- [4] Tiang Hongyu dan Zhang Ziyi, 2011. Design and Simulation Base on Pro/E for a Hydraulic Lift Platform in Scissor Type. *Procedia Engineering* 16 (2011) 772-781.
- [5] Soegeng Wijono, Muslim Mahardika, Suyitno dkk, 2011. Pembuatan Ulir Pada Baut Untuk Penyambung Patah Tulang, *Seminar Nasional Teknik Industri, UGM, Yogyakarta*, ISBN 978-602-99680-0-2.

DESAIN MODEL 3D MASSIVELY PARALLEL ROBOTS (3D-MPRs) BERBASIS KONTROL NEURO-FUZZY (NF)

Roche Alimin¹⁾, Hans Natalius¹⁾, Felix Pasila²⁾

Prodi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra¹⁾, Prodi Teknik Elektro Universitas Kristen Petra²⁾

Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia^{1,2)}

Phone: +62-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658^{1,2)}

E-mail : ralimin@peter.petra.ac.id¹⁾, felix@petra.ac.id²⁾

ABSTRAK

Bentuk sederhana dari sistem kerja Massively Parallel Robots (MPRs) dapat dilakukan dengan menggunakan aktuator diskrit yang disusun dalam bentuk array (paralel atau seri-paralel) yang mekanismenya dikendalikan oleh metode Artificial Intelligence sebagai otak pengendali. Dengan demikian, aktuator array dengan mekanisme kerja binary state (on atau off) dapat digunakan untuk aplikasi yang sangat luas di bidang Biomechanics, khususnya untuk aplikasi robot rehabilitasi (Exoskeleton Leg) dimana robot/manipulator tersebut dapat meniru sistem kerja otot pada kaki manusia. Untuk aplikasi MPRs, dibutuhkan devais diskrit yang dapat bekerja untuk posisi binari atau beberapa posisi state saja, seperti kondisi netral, positif dan negatif. Beberapa jenis aktuator yang mungkin digunakan untuk aplikasi MPRs dapat berupa solenoid, pneumatic, dielectric elastomer dan shape memory alloy. Aktuator-aktuator ini memiliki keuntungan karena relatif tidak mahal dan ringan. Namun demikian, kesulitan utama dalam mengontrol aktuator ini adalah kompleksitas untuk aktivasi kontrol diskrit 3 state (ternary state) yang berbanding eksponensial proporsional dengan jumlah aktuator yang digunakan. Tujuan dari paper ini adalah mendisain model tiga dimensi (3D) dari MPRs dengan menggunakan prinsip pengaktifan aktuator pneumatik yang dapat dikontrol kondisi 3 state (ternary state) dari susunan paralel 8 pasang aktuator. Mekanisme kontrol real-time berbasis Neuro-Fuzzy (NF) diusulkan untuk menjadi mekanisme kontrol 3D-MPRs. Sebagai hasil, paper ini memberi contoh model 3D-MPRs yang dapat dikontrol secara real-time dengan metoda NF.

Kata kunci: 3D-MPRs, metoda neuro-fuzzy, ternary state aktivasi kontrol, mekanisme kontrol real-time..

1. PENDAHULUAN

Artificial Intelligence untuk aplikasi pemodelan dan kontrol sudah mulai dikenal sejak ilmu komputasi berbasis statistik dan matematik di awal tahun 1940-an. Hal ini juga ditunjang oleh perkembangan komputer yang sangat pesat, dimana proses perhitungan matematik yang sangat rumit, dapat diselesaikan dalam waktu yang sangat singkat. Sejak prinsip Neural Network diperkenalkan (NN, tahun 1943), dan juga, Fuzzy System (FS, tahun 1965) dan Evolutionary Computation (EC, tahun 1973), Aplikasi AI dengan cepat menjadi fokus riset para ilmuwan yang tertarik mengembangkan metode kontrol dari sistem yang sangat kompleks dan non-linier tanpa harus mengetahui dengan pasti model matematik sistem tersebut. Ketiga disiplin ilmu ini menjadi semakin populer (selanjutnya NN, FS dan EC disebut sebagai metoda Artificial Intelligence, AI) khususnya dalam pemodelan, hal ini dikarenakan kemampuan dari NN untuk mereduksi waktu dan tenaga yang dibutuhkan untuk proses komputasi, karena memiliki kemampuan pembelajaran dan fitur ekstraksi. Sedangkan FS memiliki kapasitas untuk membangkitkan rule dari data time series sehingga dapat diinterpretasi dan diintegrasikan dengan human expert. Dibandingkan kedua metode sebelumnya, EC mempunyai keunikan karena memiliki kapasitas untuk mendapatkan global minimum dari setiap permasalahan non-linier. Dari ketiga strategi AI ini, masing-masing memiliki varian atau turunan, sehingga semakin banyak ilmuwan yang menggabungkan ketiganya dalam proses implementasi. Dari penggabungan atau perkawinan ketiganya telah lahir ratusan bahkan ribuan teknik baru yang dalam waktu tidak terlalu lama telah dimanfaatkan sangat luas dalam berbagai ilmu.

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah memberi kontribusi awal bagaimana mendisain model 3D-

MPRS yang yang dapat dikendalikan dengan struktur neuro-fuzzy (NF). Struktur NF yang digunakan adalah tipe Multi Input Multi Output (MIMO) Takagi-Sugeno (TS) network, dengan kemampuan untuk mendapatkan optimal parameter dari fuzzy membership function, yang biasanya sangat sulit diperoleh. Optimal parameter didapatkan dengan meng-update parameter dalam metode learning Levenberg-Marquardt Algoritim, LMA (Pasila, dkk. 2006, 2007, 2008, 2012, 2013).

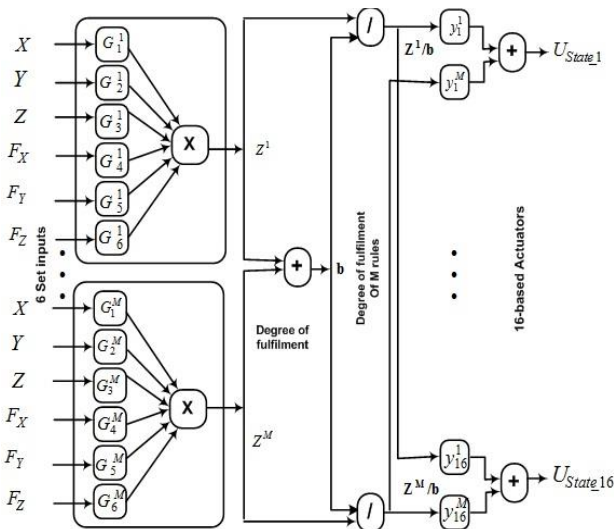
Makalah ini menjelaskan state of the art dari penelitian ini. Desain 3D model dari MPRs dengan jumlah aktuator 16 buah dan penerapan algoritma kontrol tipe struktur MIMO neuro-fuzzy network yang didesain dengan menggunakan representasi multilayer feedforward network dari Fuzzy System dan menggunakan algoritma training accelerated LMA.

MPRs adalah jenis Binary state manipulator banyak digunakan dalam aplikasi robotika dan biomekanik. Jenis bi-state actuator ini termasuk dalam devais diskrit dimana state actuator hanya memiliki dua kemungkinan, yaitu activated-not activated, open-closed atau contracted-relaxed (contoh aktuator antara lain: pneumatik, dielectric elastomer actuator, shape memory alloy). Dengan kondisi state tersebut, bi-state actuator ini memiliki keuntungan dibanding aktuator kontinu, antara lain: harga yang relatif murah dan membutuhkan dukungan minimal dari devais elektronik dibandingkan dengan tipe kontinu. Sebaliknya, bi-state actuator ini memiliki masalah dalam mengaktifasi kedua state, terutama untuk jumlah aktuator yang banyak dalam sebuah sistem manipulator. Untuk itu dibutuhkan mekanisme kontrol strategi yang efisien dan dapat bekerja dengan real time. Sehubungan dengan kontrol strategi, beberapa riset sebelumnya telah dilakukan pada manipulator jenis diskrit. Mulai pertengahan tahun 1990 Chirikjian dkk. melakukan beberapa teknik aktivasi diskrit manipulator didasarkan atas kontrol posisi

menggunakan algoritma efisien untuk aproksimasi trayektori *Snake Like Robot* [Chirikjian, dkk., 1994, 1995, 1997, 2001, 2004]. Selanjutnya Yang dan Waldron mempublikasikan teknik *force kontrol* pada *binary manipulator* di awal tahun 2000 untuk teknik aktivasi *binary state*. Salah satu teknik aktivasi *state* diinspirasi oleh beberapa teknik *biologically inspired*, seperti mekanisme *online Hopfield network (HN)* and *Boltzmann machine (BM)* [Yang, dkk., 2001a, 2001b]. Permasalahan saat ini adalah kebutuhan akan satu solusi aktivasi *state* yang optimal dari eksponensial solusi yang timbul karena banyaknya *binary state actuator* dalam manipulator. Lebih lanjut, dibutuhkan mekanisme kontrol aktivasi yang bekerja *real time* dan sebagai aproksimator *binary state* dengan *error* yang kecil. Hal ini belum dapat diperoleh dengan prinsip yang ditawarkan Chirikjian dan Waldron. Penelitian ini menawarkan metode *Artificial Intelligence* berbasis jaringan *hibrid neuro-fuzzy (NF)* untuk menjawab permasalahan di atas. Menurut Palit, dkk. [2002, 2005, 2008] dan Pasila dkk. [2006, 2013], mekanisme *NF* sudah terbukti sebagai aproksimator yang efisien dalam bidang *engineering*, seperti *time series forecasting*, *pattern recognition*, dan untuk pemodelan dan kontrol. Desain struktur *NF* dengan perbaikan *training algorithm* untuk tipe *MIMO (Multi Input Multi Output)* dan *MISO* yang dikembangkan oleh Palit, dkk. [2002, 2005, 2008], digunakan untuk menyelesaikan sistem non-linier yang kompleks. Selanjutnya struktur tersebut dikembangkan lebih lanjut oleh Pasila, dkk. [2006] dengan penambahan beberapa metode perbaikan *error*, kecepatan konvergensi dan reduksi kompleksitas dari struktur *NF*. Dibandingkan dengan metode *ANFIS* yang dikembangkan oleh Jang [1993], struktur *neuro-fuzzy* yang dikembangkan Palit, dkk. dan Pasila, dkk. mempunyai akurasi dan *performance training* yang lebih baik dan lebih cepat.

2. METODOLOGI

Struktur *feedforward MIMO-NF* yang dikembangkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Model ini menggunakan tipe *TS fuzzy rules*, *product inferencing* dan *weighted average defuzzifier*. Blok *gaussian nodes* G_1^1 sampai G_n^M menghitung *degree of membership* dari nilai input numerik pada himpunan *antecedent fuzzy*.

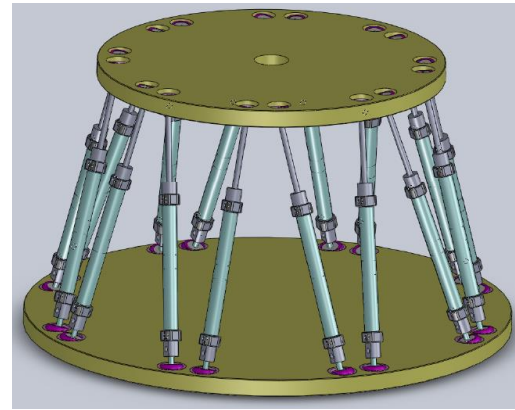


Gambar 1. Takagi-Sugeno-Tipe *MIMO Feedforward Neuro-Fuzzy Network* untuk Mekanisme *MPRS*

Selanjutnya, bagian pengali (\times) merepresentasikan operator *antecedent conjunction* dan output dari bagian ini merupakan nilai *degree of fulfilment* yang bersesuaian (z^l) dengan $l = 1, 2, \dots, M$, dimana M merepresentasikan *number of rules*. Bagian pembagi ($/$), bersama dengan *summation nodes* ($+$), digunakan untuk menghitung *normalized degree of fulfilment* (z^l / b) dari masing-masing *corresponding rule*, sehingga setelah multiplikasi dengan *TS rule consequent* yang sesuai (y_j^l), digunakan sebagai input untuk bagian akhir penjumlahan ($+$) pada nilai output *defuzzified* f , tidak lagi berupa nilai *fuzzy*, namun langsung menjadi nilai output dari model *3D-MPRS*, yaitu *state* dari *binary actuator*.

Desain 3D-MPRS Pada Robot Manipulator

Untuk mengimplementasikan jaringan *NF* untuk kontrol *state* manipulator, salah satu model *3D-MPRS* dapat diimplementasikan dengan metode *AI*, seperti Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Model *3D-MPRS* dengan 6-DOF Menggunakan 16 Aktuator Pneumatik (double 8-Ternary Output)

Aktuator diaktivasi oleh *binary force actuator* seperti pada Gambar 2 memiliki 6-DOF. Aktivasi diskrit diimplementasikan pada 8 pasang aktuator (total 16 aktuator dengan *spherical joints*) yang identik dengan *force generator*, dimana suplai *Force* (untuk $i = 1, \dots, 8$):

$$F_i = F u_i \left[\frac{A(\alpha) - B_i}{\|A(\alpha) - B_i\|} \right] \quad (1)$$

Dengan F adalah *force magnitude* dan u_i adalah *activation state* (1, 0 atau -1) dari i -th pasang aktuator. Dengan memperhitungkan semua kontribusi dari *force*, *resultant torque* M yang dapat dihasilkan dari seluruh aktuator pada output dapat ditulis sebagai berikut:

$$M = F \sum_{i=1}^8 b_i(\alpha) u_i \quad (2.a)$$

$$b_i(\alpha) = k \cdot [A(\alpha) - O] \times [A(\alpha) - B_i] / \|A(\alpha) - B_i\| \quad (2.b)$$

Dimana k adalah *unit normal to plane of motion* dari mekanisme *MPRS*.

Penelitian ini akan membuat model 3 dimensi dari *MPRS* dengan menggunakan delapan pasang aktuator 3-state berdasarkan prinsip perhitungan *force* dan *moment* dari persamaan (1) dan (2) dengan posisi aktuator akan ditentukan kemudian namun disesuaikan dengan Gambar 2.

Implementasi Hibrid Neural Network Pada Fuzzy Systems

Struktur *FS* dengan tipe *TS MIMO NF network* seperti pada Gambar 1, dapat diturunkan menjadi beberapa persamaan di bawah ini, lihat *Palit* [2005].

$$f_j = \sum_{l=1}^M y_j^l \cdot h^l \quad (3a)$$

dimana,

$$y_j^l = W_{0j}^l + W_{1j}^l x_1 + W_{2j}^l x_2 + \dots + W_{nj}^l x_n \quad (3b)$$

$$h^l = (z^l / b), \text{ dan } b = \sum_{l=1}^M z^l \quad (3c)$$

$$z^l = \prod_{i=1}^n \mu_{G_i^l}(x_i); G_i^l(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{x_i - c_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \quad (3d)$$

Rule-rule l^{th} dari struktur *FS* dapat ditulis sebagai:

R^l : IF x_1 is G_1^l AND ... AND x_n is G_n^l THEN

$$y_j^l = W_{0j}^l + W_{1j}^l x_1 + \dots + W_{nj}^l x_n. \quad (4)$$

dimana, x_i dengan nilai $i = 1, 2, \dots, n$; adalah n input sistem, f_j dengan nilai $j = 1, 2, \dots, m$; adalah m output sistem, dan G_i^l dengan nilai $i = 1, 2, \dots, n$ dan $l = 1, 2, \dots, m$ adalah *GMFs* dari persamaan (3d) dengan nilai parameter mean dan varian c_i^l dan σ_i^l secara berurutan, dan y_j^l adalah output *consequent* dari l^{th} rule. Perlu diingat bahwa *GMFs* G_i^l merupakan representasi dari *linguistic terms* seperti *low*, *medium*, *high*, dll. *Rule-rule* pada persamaan (4) dikenal dengan nama *Takagi-Sugeno rules*.

Gambar 1 juga menunjukkan bahwa *FS* dapat direpresentasikan menjadi tiga layer *feedforward network*. Karena *NN* ditambahkan dalam stuktur *FS*, maka sebagai pengganti parameter *weight* dan *bias* pada *NN*, mean c_i^l dan juga varian σ_i^l sebagai parameter dari *Gaussian*

membership functions, bersama dengan parameter w_{oj}^l, w_{ij}^l sebagai *rules consequent* dari tipe *Takagi Sugeno*. Dengan demikian, fungsi *NN* adalah meng-*update* nilai *mean*, *varian* dan *rules consequent* selama proses *training* pada struktur *FS*, dan menyimpan parameter terbaik dari ketiganya. Jika semua parameter dari *NN network* sudah diperoleh dalam proses *training*, maka *setfup rule* dari *FS* dapat digunakan untuk memprediksi satu set data.

Accelerated Levenberg-Marquardt Algorithm Pada System Neuro-Fuzzy

Accelerated LMA sangat penting dalam proses mendapatkan parameter terbaik. Metode ini menawarkan kecepatan konvergensi dan juga kontrol osilasi yang biasanya menjadi masalah pada metode *LMA* biasa [*Pasila*, 2006].

Proses penurunan persamaan *accelerated LMA* adalah sebagai berikut. Jika sebuah fungsi $V(w)$ akan meminimal-kan parameter vektor w dengan menggunakan metoda *Newton*, maka parameter *update* dari vektor w tersebut dapat didefinisikan sebagai:

$$\Delta w = - \left[\nabla^2 V(w) \right]^{-1} \cdot \nabla V(w) \quad (5a)$$

$$w(k+1) = w(k) + \Delta w \quad (5b)$$

Pada persamaan (5a), $\nabla^2 V(w)$ adalah matriks *Hessian* dan $\nabla V(w)$ adalah gradien dari $V(w)$. Jika fungsi $V(w)$ dibawa ke dalam bentuk fungsi *Sum Squared Error (SSE)*, maka menjadi fungsi seperti berikut:

$$V(w) = 0.5 \cdot \sum_{r=1}^N e_r^2(w) \quad (6)$$

Kemudian gradien dari $V(w)$ dan matriks *Hessian* $\nabla^2 V(w)$ secara umum didefinisikan sebagai:

$$\nabla V(w) = J^T(w) \cdot e(w) \quad (7a)$$

$$\nabla^2 V(w) = J^T(w) \cdot J(w) + \sum_{r=1}^N e_r(w) \cdot \nabla^2 e_r(w) \quad (7b)$$

dimana, matriks *Jacobian* $J(w)$ memiliki bentuk seperti persamaan (7c):

$$J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1(w)}{\partial w_{N_p}} \\ \frac{\partial e_2(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2(w)}{\partial w_{N_p}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_N(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_N(w)}{\partial w_{N_p}} \end{bmatrix} \quad (7c)$$

Persamaan (7c), dapat dilihat bahwa dimensi *Jacobian* adalah $(N \times N_p)$, dimana N adalah jumlah sampel *training* dan N_p adalah jumlah total parameter yang di-*update* dalam *network*. Untuk metoda *Gauss-Newton*, bagian kedua dari persamaan (7b) diasumsikan nol. Konsekuensinya, *update* dari persamaan (7a) akan menjadi:

$$\Delta w = - \left[J^T(w) \cdot J(w) \right]^{-1} \cdot J^T(w) \cdot e(w) \quad (8a)$$

Selanjutnya, dilakukan modifikasi pada metoda *LMA* dari metoda *Gauss-Newton*:

$$\Delta w = - \left[J^T(w) \cdot J(w) + \mu \cdot I \right]^{-1} \cdot J^T(w) \cdot e(w) \quad (8b)$$

dimana, I adalah $(N_p \times N_p)$ matriks identitas, dan parameter μ dikalikan atau dibagi dengan suatu faktor/konstanta jika nilai dari $V(w)$ naik atau turun selama proses iterasi.

Di bawah ini adalah persamaan *update* sesuai dengan (5a)

$$w(k+1) = w(k) - \left[J^T(w) \cdot J(w) + \mu \cdot I \right]^{-1} \cdot J^T(w) \cdot e(w) \quad (8c)$$

Hal yang penting dari persamaan (8c) adalah jika nilai μ besar, persamaan diatas menjadi *steepest descent algorithm* dengan *step size* $1/\mu$, dan untuk nilai μ kecil, menjadi metoda *Gauss-Newton*.

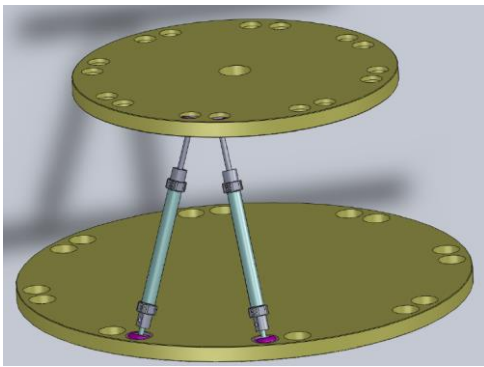
Lebih lanjut, *Palit* dkk. (2005) juga menambahkan strategi *modified error index (MEI)* pada algoritma *training LMA* untuk meningkatkan kecepatan *training convergence*. Implementasi penambahan *MEI* pada *gradient SSE* dapat didefinisikan dengan menggunakan matriks *Jacobian* sebagai:

$$\nabla SSE_{new}(w) = J^T(w) \cdot \left[e(w) + \gamma \cdot (e(w) - e_{avg}) \right] \quad (9)$$

dimana $e(w)$ adalah vektor kolom dari *error*, e_{avg} adalah *error training* rata-rata dari tiap kolom, sedangkan γ adalah faktor konstan, $\gamma \ll 1$ harus dipilih dengan eksperimen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model *3D-MPRS* menggunakan 16 aktuator pneumatik, yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk 8 pasang aktuator, dengan masing-masing menggunakan sendi peluru (*spherical joints*) pada kedua ujungnya. Konfigurasi aktuator yang berpasangan ini bertujuan untuk menghindari gerakan *twist* di antara *platform* atas dan bawah, dengan syarat setiap pasang aktuator harus mendapat kondisi *ternary* yang sama dari output kontrol *real-time Neuro-Fuzzy (NF)*. Konfigurasi setiap pasang aktuator dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi Sepasang Aktuator Pada Model *3D-MPRS*.

Double-action pneumatic actuator digunakan sebagai aktuator. Silinder ini dikendalikan oleh *directional control valve (DCV) 5/3* dengan posisi netral yang dapat mengakibatkan silinder (aktuator) dalam kondisi *floating*. Hal ini berkenaan dengan output kontrol *real-time Neuro-Fuzzy (NF)* yang bersifat *3-state*.

Idealnya gerakan dua buah silinder yang berpasangan harus sinkron. Untuk meminimalkan *error* yang terjadi maka dipasang *flow control valve (FCV)* pada masing-masing *port* setiap silinder serta dilakukan penyetelan. Dengan gerakan sinkron per pasangan aktuator dan susunan aktuator yang tidak paralel maka gejala *twist* antara *platform* atas dan bawah dapat dihindari.

Kombinasi dari kedelapan pasang aktuator akan menghasilkan $1024 (2^8)$ posisi *platform* atas. Proses pembelajaran kontrol *real-time Neuro-Fuzzy (NF)* yang diajukan membutuhkan data posisi *X*, *Y* dan *Z* dari *platform* atas dan gaya *F_x*, *F_y*, *F_z* masing-masing aktuator terkait dengan posisi *platform* atas tersebut. Beberapa kombinasi kondisi *3-state* aktuator (*fully extend*, *floating* dan *fully retract*) diambil (sebanyak 50 data) untuk mendapatkan data berupa posisi *platform* atas dan gaya yang terjadi pada masing-masing aktuator yang akan digunakan sebagai input pembelajaran bagi kontrol *real-time Neuro-Fuzzy (NF)*.

4. KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari paper ini adalah: 1) Dibutuhkan devais diskrit yang dapat bekerja untuk 3 posisi (*ternary*), seperti kondisi netral, positif dan negatif untuk implementasi *3D-MPRS*; 2) Jenis aktuator yang

digunakan untuk aplikasi *MPRs* adalah berupa *double-action pneumatic actuator*, dimana aktuator ini dapat menjalankan aktivasi kontrol diskrit *3-state (ternary state)*; 3) Untuk mengontrol kondisi *state* dari 8 pasang aktuator dibutuhkan mekanisme kontrol *real-time Neuro-Fuzzy (NF)*. Sebagai hasil akhir, paper ini memberi contoh model *3D-MPRS* dengan 8 pasang aktuator yang dapat dikontrol secara *real-time* dengan metode *NF*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Palit, D. Popovic (2002), Nonlinear combination of forecasts using ANN, FL and NF approaches, *FUZZ-IEEE*, 2:566-571.
- [2] Palit, D. Popovic (2005), Computational Intelligence in Time Series Forecasting, Theory and Engineering Applications, Springer.
- [3] E. Uphoff and G. S. Chirikjian (1995), Efficient workspace generation for binary manipulators with many actuators, *J. Robotic Syst.* 12 (6), 383–400.
- [4] G. S. Chirikjian (1994), A binary paradigm for robotic manipulators, in: *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, San Diego, CA, pp. 3063–3069.
- [5] G. S. Chirikjian (1995), Kinematic synthesis of mechanisms and robotic manipulators with binary actuators, *ASME J. Mech. Design* 117, 573–580.
- [6] G. S. Chirikjian (1997), Inverse kinematics of binary manipulators using a continuum model, *J. Intel. Robotic Syst.* 19, 5–22.
- [7] I. Ebert-Uphoff (1997), On the development of discretely-actuated hybrid-serial-parallel manipulators, PhD Dissertation, Johns Hopkins University.
- [8] J. Suthakorn and G. S. Chirikjian (2001), A new inverse kinematics algorithm for binary manipulators with many actuators, *Adv. Robot.*, vol. 15, no. 2, pp. 225–244.
- [9] J. Wang and G. S. Chirikjian (2004), Workspace Generation of Hyper-redundant Manipulators as a Diffusion process on SE(N), *IEE Trans. On Robotics and Automation*, Vol.20, No.3, pp. 399-408.
- [10] J.S.R. Jang (1993), ANFIS: Adaptive network Based Fuzzy Inference System, *IEEE Trans. On SMC.*, 23(3):665-685
- [11] P.H. Yang, K.J. Waldron (2001a), “Massively Parallel Actuation,” *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Como, Italy.
- [12] P.H. Yang (2001b), Design and Control of Bundles of Binary Actuators for Manipulator Actuation, PhD Dissertation, The Ohio State University.
- [13] F. Pasila (2006), Forecasting of Electrical Load using Takagi-Sugeno type MIMO Neuro-Fuzzy network, Master thesis, Bremen.
- [14] F. Pasila, A.K. Palit, G. Thiele (2008), Neuro-Fuzzy Approaches for Electrical Load forecasting using additional Moving Average Window Data Filter on Takagi-Sugeno Type MISO Network *Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics*, JACIII 12(4): 361-369, Fuji Technology Press Ltd, Japan.
- [15] F. Pasila, R. Verterchy, G. Berselli, and V. Parenti Castelli (2013), Inverse static analysis of massive parallel arrays of three-state actuators via artificial intelligence, Book Chapters of Springer, Proceedings of the 19th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control, Romansy.

SISTEM KENDALI FUZZY LOGIC PADA TRI-STAR WHEELCHAIR

Rafiuddin Syam, Wahyu H. Piarah dan Alfian Djafar

Prodi Teknik Mesin Universitas Hasanuddin

Jl. Perintis Kemerdekaan Km 10, Makassar 90245. Indonesia

Phone: 0411-586400 Fax: 0411-586015

E-mail : rafiuddinsyam@gmail.com, alfian.djafar@gmail.com

ABSTRAK

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem Fuzzy Logic Control (FLC) mamdani istem dengan kondisi multi input dan multi output (MIMO) untuk Tristar electric powered Wheelchair. Langkah pertama dalam mendekati masalah ini adalah bagaimana membangun model dinamis nonlinear dari sistem. Kemudian merancang sistem kontrol berdasarkan Fuzzy Logic dengan bantuan MatlabToolbox. Tipe Mamdani fuzzy logic diterapkan dengan menggunakan 2 variabel input dan 2 variabel output. Input berupa error pada jarak dan error pada sudut, sedangkan output berupa kecepatan sudut masing-masing pada dua buah roda, roda kiri dan roda kanan. Pada poenggunaan FLC sistem dikembangkan aturan dasar dengan jumlah 18 aturan yang dihasilkan dari variasi aturan (Rule) kecepatan sudut pada kedua buah roda. Fungsi keanggotaan yang pada setiap nilai linguistik adalah tipe Gaussian, begitu pula diterapkan nilai linguistik yang sama bagian output FLC sistem. Kecepatan sudut roda kiri dan roda kanan sesuai dengan referensi input dan hasil output dioptimalisasikan dengan Metode FLC untuk posisi mobile robot. Sinyal kendali (output dari FLC) akan beradaptasi sehingga mobile robot dapat kembali keposisi reefrensi ketika menerima gangguan baik internal maupun external, robot dapat kembali stabil. Kursi roda elektrik ini menggunakan 3 roda kecil pada bagian kiri dan kanan sehingga sistem ini dapat berjalan pada jalanan yang tidak rata dan tanjakan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan Root Mean Square Error (RMS) Error Method. Dari hasil pengujian, fuzzy logic dapat diterapkan pada roda tri-star wheelchair ini.

Kata kunci: Fuzzy Logic Control, Tristar Wheelchair, Non Linear Problem.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan dalam bidang penelitian seperti ilmu komputer, robotika, atau teknologi sensor memungkinkan untuk memperluas jangkauan aplikasi yang akan mendukung orang tua lanjut usia (lansia). Aplikasi yang dimaksud memungkinkan pengguna untuk melakukan perjalanan lebih efisien dan lebih mudah, sertamemberikan kemudahan dalam beraktifitas dan mengurangi ketergantungan terhadap orang lain. Robot kursi roda menjadi perangkat bantu yang paling populer dalam menjawab permasalahan ini. Penelitian terus dilakukan, dari yang dulunya kursi roda konvensional menjadi kursi roda otomatis, dengan sistim navigasi, kursi roda yang mampu menanjak, kursi roda yang mampu menaiki tangga dan sebagainya.

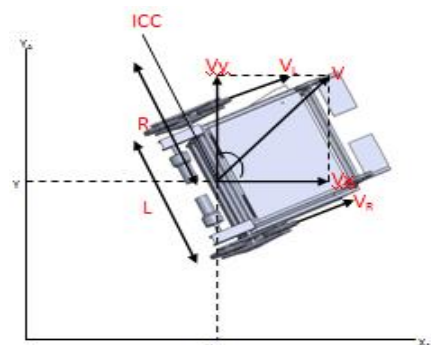
Tri-Star Wheelchair tergolong planetary wheelchair. Mekanisme ini didasari oleh beberapa roda kecil yang merata dengan bentuk seperti "Y" atau "+" . Roda kecil bisa berputar pada porosnya, dan juga dapat membuat revolusi di sekitar poros tengah. Setiap roda kecil berputar pada porosnya sendiri, ketika kursi roda bergerak di tanah, dan setiap roda kecil berputar mengikuti putaran poros tengah, ketika kursi roda naik atau turun tangga.

Penelitian sering dihadapkan dengan perlunya mempertimbangkan timbal balik antara pengembangan sistem kognitif yang kompleks yang sulit dikontrol, atau mengadopsi sejumlah asumsi yang mengarah pada model yang disederhanakan tidak cukup mewakili system. Pilihan yang melibatkan sistem yang kompleks kurang lazim karena kurangnya metode analisis yang memadai dapat menangani ketidakpastian dan mewakili pengetahuan dalam sistem kontrol praktis. Penelitian terbaru dan aplikasi menggunakan metode komputasi non-analitis seperti logika fuzzy, komputasi evolusioner, dan jaringan saraf telah menunjukkan utilitas dan potensi untuk sistem kontrol cerdas yang kompleks. Secara khusus, logika fuzzy telah terbukti menjadi alat yang nyaman untuk menangani ketidakpastian dunia nyata dan representasi pengetahuan.

Logika fuzzy seperti logika klasik adalah toleran terhadap ketidaktepatan, ketidakpastian, dan kebenaran parsial. Hal ini membuat lebih mudah dalam menerapkan fuzzy logic control untuk model nonlinear dibandingkan teknik pengendalian konvensional lainnya. Dalam konteks pengendalian mobile robot, logika berbasis sistem fuzzy memiliki keuntungan yang memungkinkan sifat intuitif navigasi berbasis sensor dengan mudah dimodelkan menggunakan terminologi linguistik. Beban komputasi sistem inferensi fuzzy relatif ringan.. Akibatnya, sistem kontrol fuzzy reaktif mengizinkan keputusan cerdas yang akan dibuat dalam real time, sehingga memungkinkan gerakan halus dan tidak terputus

2. METODOLOGI

Robot jenis kursi roda elektrik ini merupakan bagian dari mobile robot, pada dasarnya memiliki dua roda utama yang masing-masing digerakan oleh penggerak tersendiri (umumnya berupa motor DC magnet permanen dengan gear-reduksi yang berfungsi untuk memperkuat torsi motor), selain itu robot dengan satu atau dua buah roda castor yang ditempatkan dibagian belakang robot yang berfungsi sebagai penyeimbang.



Gambar 1. Posisi dan orientasi robot mobile dalam sistem koordinat Cartesian. [11]

Gambar 1 memperlihatkan arsitektur robot dilihat dari bagian atas. Jika kedua roda penggerak tersebut berputar dengan kecepatan yang sama maka robot tersebut akan bergerak dengan arah yang lurus, sedangkan jika kecepatan salah satu roda lebih lambat maka robot akan bergerak membentuk kurva dengan arah lintasan menuju salah satu roda yang bergerak lebih lambat. L adalah jarak antara dua roda. R adalah radius kelengkungan sesaat dari lintasan robot, relatif terhadap sumbu titik tengah. ICC adalah pusat lengkung sesaat. $V_R(t)$ adalah kecepatan linear roda kanan $V_L(t)$ adalah kecepatan linear roda kiri.

Untuk panjang jari-jari nominal roda r , serta kecepatan rotasi roda kanan, dan kiri berturut-turut ω_R dan ω_L maka kecepatan linear roda kanan dan kiri dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$v_R(t) = r\omega_R(t) \quad (1)$$

$$v_L(t) = r\omega_L(t) \quad (2)$$

Ketika robot melakukan gerak memutar sesaat dengan panjang jari-jari R yang diukur dari pusat rotasi dan titik pusat kedua roda, kecepatan rotasi dapat dihitung sebagai:

$$\omega(t) = \frac{v_R}{R + \frac{L}{2}} \quad (3)$$

$$\omega(t) = \frac{v_L}{R - \frac{L}{2}} \quad (4)$$

$$\omega(t) = \frac{v_R(t) - v_L(t)}{L} \quad (5)$$

Jari-jari kelengkungan sesaat dari lintasan robot relatif terhadap sumbu titik tengah diberikan sebagai

$$R = \frac{L(v_R(t) + v_L(t))}{2(v_R(t) - v_L(t))} \quad (6)$$

Kecepatan linier robot $v(t)$ dapat diketahui berdasarkan kedua kecepatan linear roda.

$$v(t) = \omega(t) = \frac{1}{2}(v_R(t) + v_L(t)) \quad (7)$$

Persamaan kinematika dapat direpresentasikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= v(t)\cos(\theta(t)) \\ \dot{y}(t) &= v(t)\sin(\theta(t)) \\ \dot{\theta}(t) &= \omega(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Sehingga

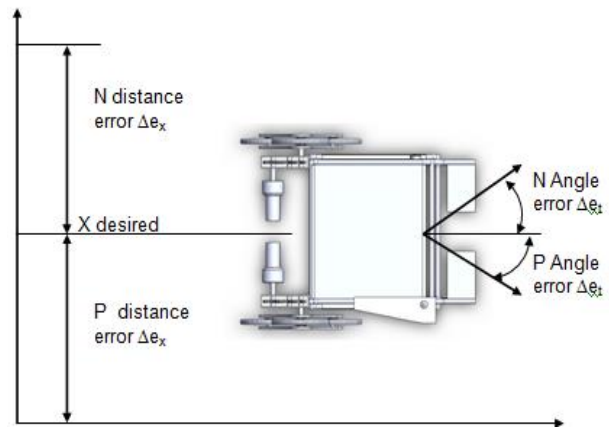
$$\begin{aligned} x(t) &= \int_0^t v(\sigma)\cos(\theta(\sigma))d\sigma \\ y(t) &= \int_0^t v(\sigma)\sin(\theta(\sigma))d\sigma \\ \theta(t) &= \int_0^t \omega(\sigma)d\sigma \end{aligned} \quad (9)$$

Persamaan 9 juga dapat direpresentasikan dalam bentuk berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t)\cos \theta \\ v(t)\sin \theta \\ \omega(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R(t) \\ v_L(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(v_R + v_L)\cos \theta \\ \frac{1}{2}(v_R + v_L)\sin \theta \\ (v_R - v_L)/L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\cos \theta & \frac{1}{2}\cos \theta \\ \frac{1}{2}\sin \theta & \frac{1}{2}\sin \theta \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

Fuzzy Logic Control (FLC) dirancang untuk mengontrol gerakan mobile robot. FLC dalam penelitian ini memiliki dua input, yakni error dalam posisi dan error dalam sudut robot. Output yang dihasilkan adalah kecepatan sudut masing-masing roda, roda kiri dan roda kanan. Desain FLC ini dirancang dengan bantuan Fuzzy Logic Toolbox pada MATLAB. Toolbox berisi fungsi, antarmuka pengguna grafis dan struktur data yang memungkinkan pengguna untuk dengan cepat merancang, menguji, mensimulasikan dan memodifikasi sistem inferensi fuzzy.



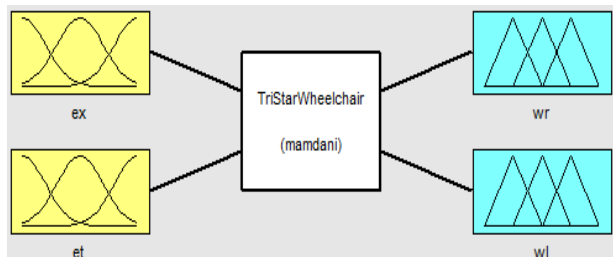
Gambar 2. Kursi Roda Dalam Bidang Cartesian

Gambar 2 terlihat jelas bahwa dua input error dalam sudut orientasi θ and error dalam jarak x . Error pada jarak dan error pada sudut masing-masing memiliki nilai Negatif, Zero, dan Positif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

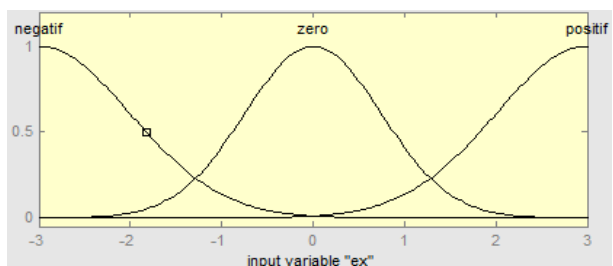
Variabel Linguistik, Nilai dan Fungsi Keanggotaan

Gambar 3 terlihat bahwa Fuzzy Inference System (FIS) dengan menggunakan tipe Mamdani. Variabel linguistik adalah error dalam jarak Δx , error dalam sudut $\Delta \theta$, dan perubahan kecepatan sudut dari dua roda $\Delta \omega_r$ dan $\Delta \omega_l$. Variabel input yaitu $\Delta \theta$ dan Δx , sedangkan outputnya adalah $\Delta \omega_r$ dan $\Delta \omega_l$. Jadi sistem fuzzy logic pada mobile robot ini memiliki 2 input dan 2 output.

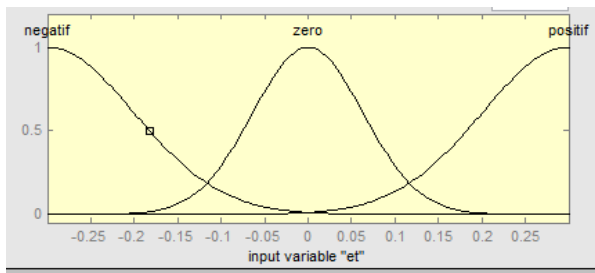


Gambar 3. Fuzzy Inference System (FIS)

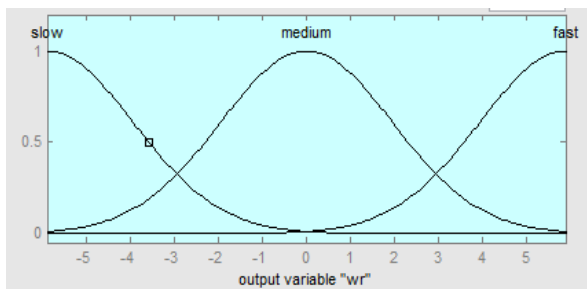
Ketiga variabel linguistik telah ditetapkan tiga nilai linguistik. Error $\Delta \theta$ dan Δx memiliki nilai linguistik N (negatif), Z (no), P (positif). Perubahan kecepatan sudut dari dua roda $\Delta \omega_r$ dan $\Delta \omega_l$ memiliki nilai linguistik S (Slow), M (medium) dan F (Fast). Kemudian, fungsi keanggotaan yang pada setiap nilai linguistik adalah tipe Gaussian. Fungsi keanggotaan dari $\Delta \theta$, Δx , dan $\Delta \omega_r$ dan $\Delta \omega_l$ masing-masing ditunjukkan pada Gambar 4-7.



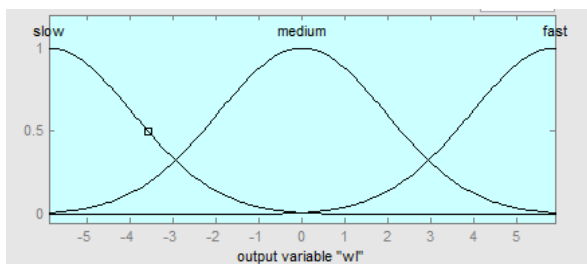
Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Error pada jarak Δx



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Error pada jarak Δe_t



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan pada Δw_r



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan pada Δw_l

Aturan Fuzzy Logic (Rule)

Aturan dasar untuk *Fuzzy Logic Control* tercantum dalam Tabel 1 dan 2. Jadi kita melihat bahwa ada 18 jumlah aturan yang dihasilkan dari Rule kecepatan sudut kedua buah roda, roda kiri dan roda kanan.

Tabel 1. Rule Base kecepatan sudut roda kanan Δw_r

$\Delta e_x / \Delta e_t$	N (Negatif)	Z (Zero)	P (Positif)
N (Negatif)	Slow	Slow	Slow
Z (Zero)	Slow	Fast	Medium
P (Positif)	Slow	Medium	Fast

Tabel 2. Rule Base kecepatan sudut roda kanan Δw_l

$\Delta e_x / \Delta e_t$	N (Negatif)	Z (Zero)	P (Positif)
N (Negatif)	Fast	Medium	Slow
Z (Zero)	Medium	Fast	Slow
P (Positif)	Slow	Slow	Slow

Mesin Inferensi

Pada bagian ini diperlihatkan logika *rule* yang digunakan dalam sistem kendali kursi roda elektrik sebagai mobile robot.

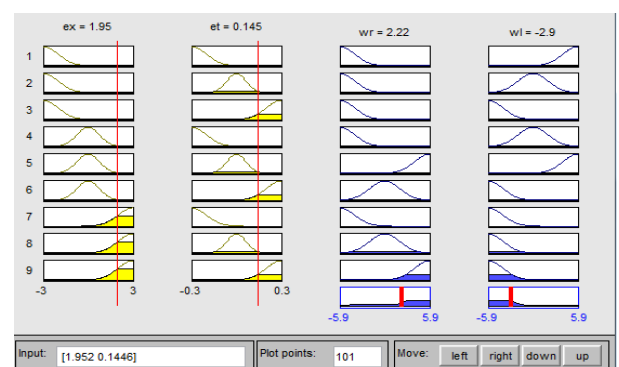
- Jika Δe_x negative dan Δe_t negative, maka Δw_r slow dan Δw_l fast
- Jika Δe_x negative dan Δe_t zero, maka Δw_r slow dan Δw_l medium
- Jika Δe_x negative dan Δe_t positif, maka Δw_r slow dan

Δw_l slow

- Jika Δe_x zero dan Δe_t negative, maka Δw_r slow dan Δw_l medium
- Jika Δe_x zero dan Δe_t zero, maka Δw_r fast dan Δw_l fast
- Jika Δe_x zero dan Δe_t positif, maka Δw_r medium dan Δw_l slow
- Jika Δe_x positif dan Δe_t negative, maka Δw_r slow dan Δw_l slow
- Jika Δe_x positif dan Δe_t zero, maka Δw_r medium dan Δw_l slow
- Jika Δe_x positif dan Δe_t positif, maka Δw_r fast dan Δw_l slow

Rule Viewer

Dalam bentuk gambar yang mudah dimengerti rule digambarkan dalam bentuk fungsi keanggotaan, seperti yang terlihat dibawah ini.



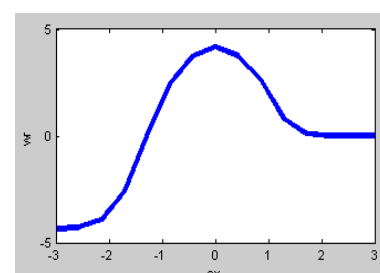
Gambar 8. Rule Viewer

Rule Viewer menunjukkan bagaimana error yang diberikan dalam jarak dan sudut sesuai dengan output defuzzifikasi. Dalam situasi pada gambar 8, dijelaskan bahwa error dalam jarak (Δe_x) adalah 1,95 dan error dalam sudut (Δe_t) adalah 0.145. Output pada roda kanan (w_r) adalah 2,26 yang berarti kecepatan sudut pada roda kanan cepat (*fast*), sedangkan Output pada roda kiri (w_l) adalah -2,9 yang berarti kecepatan sudut pada roda kanan lambat (*slow*).

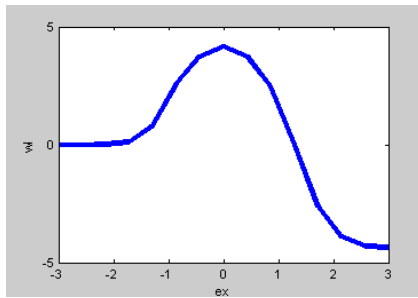
Hal ini sejalan dengan aturan Mesin Inferensi bahwa jika Δe_x positif dan Δe_t positif, maka Δw_r fast dan Δw_l slow. Itu berarti kecepatan sudut roda yang tepat adalah lebih cepat dari kecepatan nominal, sedangkan kecepatan sudut roda kiri adalah lebih lebih dari kecepatan nominal.

Ketika Δe_t bernilai positif yang berarti kesalahan pada jarak menyebabkan robot menjauh, sedangkan Δe_t bernilai positif yang berarti kesalahan dalam sudut orientasi. Sinyal kontrol harus sedemikian rupa sehingga robot sejajar kembali baik jarak maupun sudut orientasinya menjadi nol.

Surface

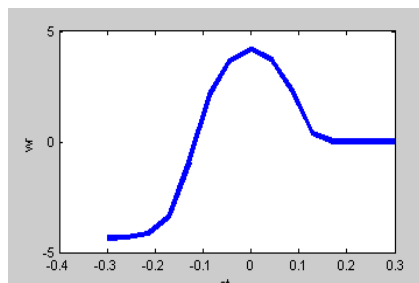


Gambar 9.a. Grafik Hubungan antara e_x dan w_r ;

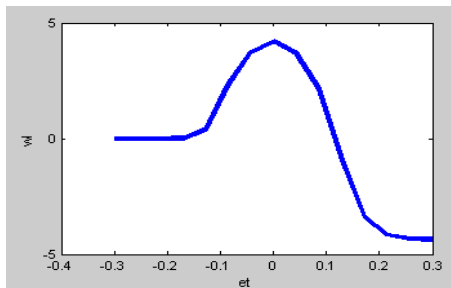


Gambar 9b. Grafik Hubungan antara e_x dan w_1

Gambar 9 dan 10 merupakan tampilan pemetaan antara variabel-variabel input dan variabel-variabel output. Gambar 9 adalah grafik hubungan antara error pada jarak dengan kecepatan sudutnya. Sedangkan gambar 10 adalah grafik hubungan antara error pada sudut dengan kecepatan sudutnya. Dari keempat gambar, terlihat bahwa kecepatan sudut maksimum akan tercapai jika berada pada kondisi normal, dalam hal ini nilai error adalah nol.



Gambar 10a. Grafik Hubungan antara e_t dan w_2



Gambar 10b. Grafik Hubungan antara e_d dan w_1

4. KESIMPULAN

Pemodelan dari kontroler fuzzy adalah proses berulang-ulang dari trial and error. Tidak selalu jelas apa kombinasi terbaik dari input-outputnya, fungsi keanggotaan, dan aturan yang harus dikenakan untuk sistem tertentu. Oleh karena itu, kemungkinan memperoleh logika fuzzy yang optimal sebagai hasil dari trial and error kecil. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini, termasuk penentuan fungsi keanggotaan fuzzy.

Dalam penelitian ini, *Fuzzy logic controller* (FLC) dibangun dengan dua input berupa error dalam jarak dan error dalam sudut. Kecepatan sudut diatur sesuai dengan yang diinginkan dalam mencapai suatu posisi yang diharapkan. Sinyal kontrol (output dari FLC) harus sedemikian rupa sehingga robot sejajar kembali lurus dalam jarak dan sudut menjadi nol. Dengan hasil tersebut, fuzzy logic dapat diterapkan ke sistem tri-star wheelchair.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fiona Howel, Jan Priebe, "Asistensi Sosial Lanjut Usia di Indonesia: Kajian Empiris Program ASLUT". Tim Nasional Percepatan Penanggulangan Kemiskinan, 2013.
- [2] Yanco H.A., "Shared User-Computer Control of a Robotic Wheelchair System". Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.
- [3] Gali, A. dan Zulkifli, "Rancang bangun Kursi Roda Elektrik Dengan Mekanisme Roda Gigi Lurus". Universitas Hasanuddin. Makassar, 2009.
- [4] Hutaeruk dan Andi Gumonggom, "Perancangan Kursi Roda Untuk Jalan Datar dan Menanjak dengan Sudut Kemiringan Tanjakan 30 Derajat". Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya, 2010.
- [5] Zhang, Lin dan Feihong, Xi, "An Optimization Design for the Stair Climbing Wheelchair". Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, 2012.
- [6] Wakhid A.G.A., "Pengembangan Desain Kursi Roda Khususnya Pada Lansia berdasarkan Citra (Image) Produk dengan Metode Kansei Engineering". Universitas Sebelas Maret. Surakarta, 2011.
- [7] Faizin A., Ragam Bentuk, Bahan Dan Variasi Tangga. Niaga Swadaya, 2007.
- [8] Katsuhito Ogata, Leksono Edi, Teknik Kontrol Automatic, Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1993.
- [9] Kiyokatsu Suga, Sularso, Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1991.
- [10] Paisal, "Rancang Bangun Wheeled Mobile Robot (Wmr) Dengan Roda Tri-Star Sebagai Rescue Robot". Universitas Hasanuddin. Makassar, 2011.
- [11] Mustari, "Rancang Bangun Kursi Roda Elektrik yang Dapat Naik Turun Tanjakan". Universitas Hasanuddin. Makassar, 2011.
- [12] Prabowo P.W., Rahmadya T.H., Penerapan Soft Computing dengan Matlab, Rekayasa Sains, Jakarta, 2009.
- [13] Eduward Tigor, Wahyudi, Iwan Setiawan, "Tuning Parameter Proporsional Integral dengan FL (Fuzzy Logic) untuk pengaturan Level Air Berbasis Mikro-kontroler Atmega 8535". Universitas Diponegoro, 2009.
- [14] Thiang, Resmana, Wahyudi. "Aplikasi Kendali Fuzzy Logic untuk Pengaturan Kecepatan Motor Universal". Universitas Kristen Petra.
- [15] Vansi Mohan Peri. "Fuzzy Logic Controller for An Autonomous Mobile Robot". Jawaharlal Nehru Technological University. India.

APLIKASI KENDALI FUZZY LOGIC UNTUK MODEL EXCAVATOR PNEUMATIK

Rafiuddin Syam¹⁾, Irdam²⁾ dan Wahyu H. Piarah¹⁾

Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin¹⁾

Jalan Perintis Kemerdekaan Km 10, Makassar 90245 Indonesia

Jurusan Mesin Akademi Teknik Soroako²⁾

Jalan Sumantri Brojonegoro No.1 Soroako 92983 Indonesia

Phone/Fax: +62411586015

E-mail : rafiuddinsyam@gmail.com¹⁾, irdamsumasang77@yahoo.co.id²⁾

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat model excavator dengan sistem pneumatic. Disamping itu digambarkan penggunaan fuzzy logic control (FLC) untuk sistem pneumatik pada model excavator. Tahapan penelitian dimulai dari perancangan dan pembuatan model excavator dimulai dengan perencanaan yang meliputi pemilihan bahan, aktuator, menentukan dimensi, cara kerja, mekanisme, metode pengontrolan. Pada tahap pembuatan model ini meliputi pembuatan sistem mekanik, pemasangan aktuator dan pembuatan program. Sebelum memulai membuat program didaului dengan menurunkan formulasi kinematika model excavator, adapun metode yang dipakai adalah manipulator dengan empat derajat kebebasan dan mobile robot sebagai basis dengan 2 derajat kebebasan. Tracking roda dipilih dalam menjalankan excavator ini. Sedang untuk bagian lengan, terdapat boom, arm dan bucket serta landasan dari lengan excavator yang dapat berputar pada bagian dasar dari lengan ini. Pengujian dilakukan pada aktuator gerak rotasi yaitu motor listrik DC dan aktuator gerak lurus yaitu silinder pneumatik. Sebuah microcontroller Arduino-mega digunakan untuk mengontrol aktuator rotasi dan gerak lurus, selanjutnya dimodelkan dengan menggunakan kendali logika fuzzy tipe mamdani, multi input multi output (MIMO) dengan perincian sebagai berikut 3 input dan 2 output. Pada penelitian ini, kendali fuzzy model excavator dengan sistem pneumatik dengan fungsi keanggotaan sebagai fungsi Gaussian. Penulis memilih sistem ini disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab untuk menguji unjuk kerjanya.

Kata kunci: Pneumatik, teknik kendali, fuzzy logic control, excavator, model.

1. PENDAHULUAN

Semua sistem yang menggunakan tenaga yang disimpan dalam bentuk udara yang dimampatkan untuk menghasilkan suatu kerja disebut dengan sistem pneumatik. Dalam penerapannya, sistem pneumatik banyak digunakan sebagai sistem automasi. Mesin-mesin yang berada di perusahaan terutama dalam proses industri dan produksi sekarang ini banyak memanfaatkan pesawat-pesawat pneumatik, seperti mesin-mesin pres, rem, buka tutup pintu, dan pelubangan. Pneumatik mulai digunakan untuk pengendalian maupun pergerakan mesin-mesin dan alat-alat produksi. Saat ini dalam penggunaannya pneumatik banyak dikombinasikan dengan sistem elektrik. Rangkaian elektrik berupa saklar, solenoid, dan limit switch digunakan sebagai penyusun sistem kendali katup. Untuk aplikasi yang cukup rumit digunakan PLC (*Programmable Logic Controller*) yaitu kontroler yang dapat deprogram [1].

Kemajuan teknologi dewasa ini membuat industri-industri modern berupaya untuk meningkatkan kualitas, kuantitas dan efektivitas produk-produk yang mereka hasilkan. Oleh karena itu industri-industri modern tersebut memerlukan pengotomatisasian secara kontinyu dan sistem yang banyak digunakan pada saat sekarang ini adalah pneumatik. Hal ini dikarenakan pneumatik mempunyai beberapa keuntungan yang tidak dipunyai oleh sistem lain. Walaupun dewasa ini dunia industri didalam pencapaian efisiensi yang tinggi, menggabungkan sistem pneumatik dengan sistem elektrik, elektronik, hidrolik, dan mekanik.

Di dalam perkembangannya sistem pneumatik digabungkan dengan sistem elektrik untuk mempermudah pengoperasian yang disebut Sistem Elektropneumatik. Keuntungan penggunaan komponen elektrik sebagai kontrol dari sistem pneumatik adalah sinyal elektrik dapat ditransmisikan melalui kabel secara mudah dan cepat dengan jarak yang jauh. Sedangkan untuk sinyal mekanik atau sinyal transmisi pneumatik lebih rumit.

Penggunaan udara yang dimampatkan dalam sistim pneumatik memiliki beberapa keuntungan antara lain, ketersediaan yang tak terbatas, mudah disalurkan, fleksibilitas temperatur, aman, bersih, pemindahan daya dan kecepatan sangat mudah diatur, dapat disimpan, mudah dimanfaatkan. [2]

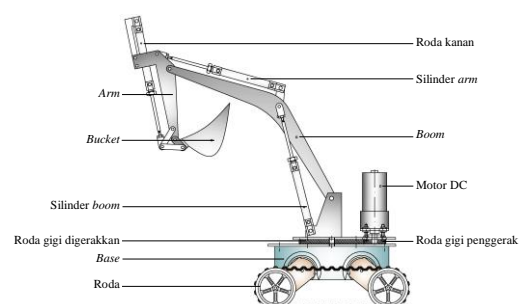
Penelitian ini akan disusun sebagai berikut: pada bagian kedua tinjauan pustaka. Selanjutnya kendali logika fuzzy akan dibahas pada bagian tiga, akhirnya pada bagian empat akan dibahas kesimpulan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Perancangan dan penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari sampai juni 2014 di *Workshop* Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Adapun beberapa tahapan dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Desain model excavator dengan sistem pneumatik

Dari Gambar 1 terlihat gambar model excavator yang akan dibuat. Dari keseluruhan gambar terdapat beberapa komponen yang diperoleh dengan membeli yaitu bagian roda, roda gigi, motor DC dan silinder pneumatik. Komponen yang lain dibuat dari material pelat aluminium tebal 3,2 mm dan tebal 1,6 mm dengan dimensi disesuaikan dengan komponen-komponen yang dibeli.

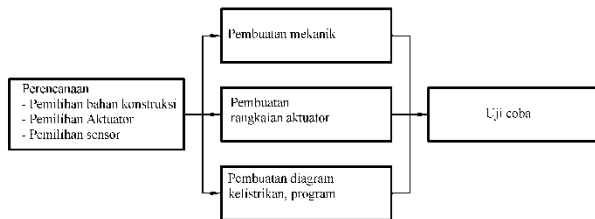


Gambar 1. Model excavator dengan sistem pneumatik



b. Tahapan pembuatan model *excavator* pneumatik

Secara garis besar, tahapan pembuatan model *excavator* pneumatik dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan pembuatan model *excavator* dengan sistem pneumatik

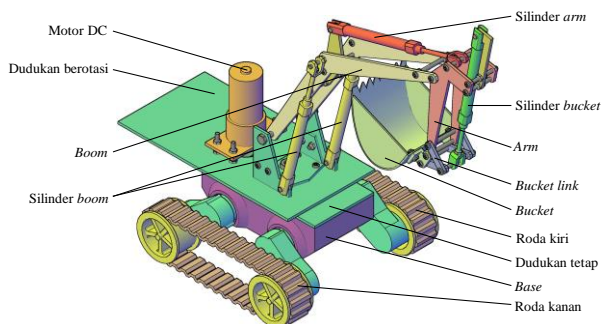
Tahapan pembuatan model *excavator* pneumatik, yaitu perencanaan, meliputi pemilihan *hardware* dan desain kemudian melakukan pembuatan, meliputi mekanik, elektronik, program serta terakhir dilakukan uji coba.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

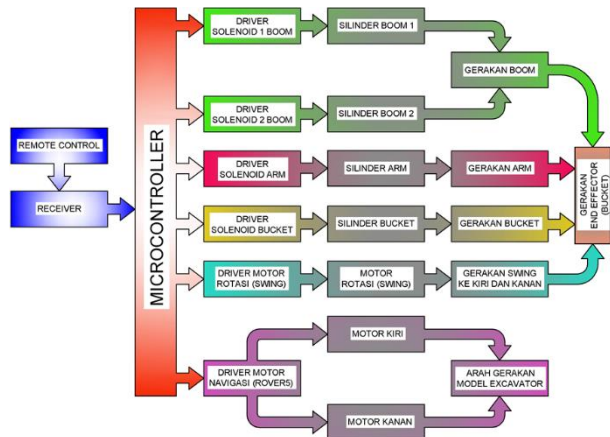
Mendesain model *excavator* dengan sistem pneumatik

Pada Gambar 3 terlihat desain mekanik model *excavator* dengan sistem pneumatik dalam gambar tiga dimensi. Secara umum model *excavator* ini terbagi atas dua bagian yaitu bagian *base* dan lengan. Pada bagian *base* yang berwarna ungu terdapat dua buah roda kiri dan kanan yang berfungsi sebagai navigasi untuk arah maju dan mundur, berbelok ke kiri dan ke kanan. Pada bagian atas *base* yang berwarna biru muda berfungsi sebagai gerak rotasi dan dudukan untuk seluruh komponen, baik elektronik, mekanik maupun pneumatik. Gerak rotasi digerakkan oleh sebuah motor DC yang berwarna orange. Pada bagian lengan terdapat empat buah silinder pneumatik yang berfungsi sebagai aktuator gerakan lurus. Seperti terlihat pada Gambar 3 dua silinder warna kuning untuk menggerakkan *boom* (kuning muda), warna merah untuk *arm* (merah muda) dan warna hijau untuk *bucket* (hijau muda).

Pada Gambar 4 terlihat skema pengendalian/kontrol model *excavator* dengan sistem pneumatik. Model *excavator* ini dikontrol dengan sistem kontrol loop terbuka, dimana sinyal perintah atau input diberikan lewat sebuah remote control yang selanjutnya diolah pada mikrokontroler, kemudian dilanjutkan pada *driver* motor dan *solenoid valve* kemudian aktuator-aktuator akan bergerak sesuai dengan perintah yang diberikan pada remote control yang menghasilkan gerakan pada lengan model *excavator* dan arah pada rover 5 yaitu maju, mundur, berbelok ke kiri dan kanan.



Gambar 3. Desain mekanik model *excavator* dengan sistem pneumatik dalam gambar tiga dimensi

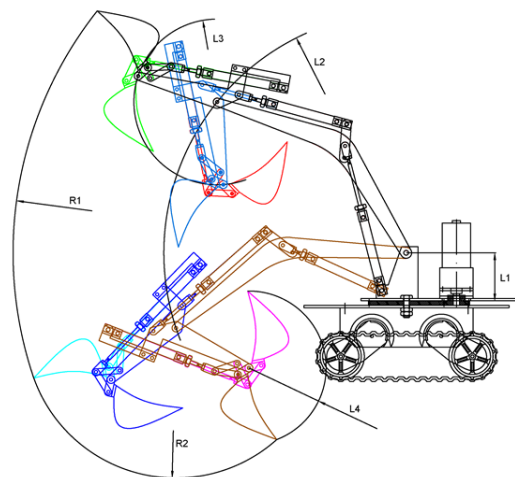


Gambar 4. Skema pengendalian/kontrol model *excavator* dengan sistem pneumatik

Membuat fuzzy logic control model *excavator*

Sistem pergerakan model *excavator* sistem pneumatik dapat ditunjukkan pada Gambar 3, dimana pergerakan dari lengan model *excavator* diperoleh dari kombinasi gerakan dari tiga silinder pneumatik untuk menghasilkan posisi dari bucket. Jarak kerja (*working range*) juga dapat dilihat pada Gambar 5 R1 adalah jarak atau radius terjauh yang diperoleh dari gerakan silinder *boom*, silinder *arm* menghasilkan R2 dan L4 diperoleh dari silinder *bucket*. Pada Tabel 1 diperlihatkan aturan dasar untuk menentukan posisi *bucket* akibat dari pergerakan silinder pneumatik.

Dari Gambar 5 terlihat jangkauan *bucket* yang diperoleh dari variasi gerakan silinder *boom*, *arm* dan *bucket*. L2 adalah radius yang dibentuk dari gerakan *boom* dengan panjang 307 mm, L3 dari gerakan *arm* dengan panjang 105 mm, L4 dari gerakan *bucket* dengan panjang 98 mm. Sedangkan R1 adalah radius terjauh dari *base* dengan panjang 500 mm, R2 dibentuk dari gerakan *arm* dan *bucket* dengan panjang 191 mm.



Gambar 5. Jarak kerja model *excavator*

Pada Tabel 1 terlihat posisi *bucket* yang diakibatkan oleh gerakan silinder *boom*, *arm* dan *bucket*. Tanda (+) menunjukkan posisi silinder pneumatik maju dan tanda (-) menunjukkan posisi silinder mundur. Tanda (X) adalah jarak *bucket* dari base, semakin besar angka dibelakang X maka jarak *bucket* dari base semakin jauh, tanda (Y) menunjukkan ketinggian *bucket* dari base, semakin besar angka dibelakang Y maka ketinggian *bucket* dari base semakin tinggi.

Tabel 1. Aturan dasar

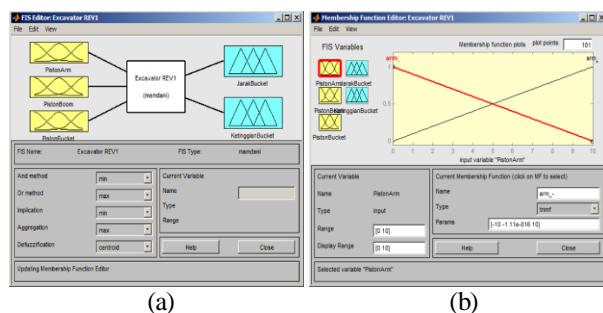
Aturan	Silinder			Posisi Bucket	
	Boom	Arm	Bucket	Jarak	Tinggi
1	+	+	+	X1	Y6
2	+	+	-	X4	Y5
3	+	-	-	X7	Y8
4	-	-	-	X8	Y3
5	-	-	+	X5	Y2
6	-	+	+	X3	Y4
7	+	-	+	X6	Y7
8	-	+	-	X2	Y1

Kontrol ketinggian dan jarak akan didapatkan dengan menggunakan *fuzzy inference system (FIS) editor* dan didisain dalam *rule tipe mandani*. Fungsi keanggotaan untuk masukan dan keluaran ditunjukkan pada gambar 6-8.

Pada Gambar 6a terlihat 3 *input* dan 2 *output fuzzy inference system (FIS)* model *excavator*, bagian sebelah kiri ada tiga input yang diperoleh dari silinder *boom*, *arm* dan *bucket*. Di sebelah kanan ada dua *output* yang diperoleh dari variasi gerakan dari tiga silinder pneumatik yaitu jarak dan ketinggian *bucket*. Di tengah terdapat tipe *fuzzy inference system (FIS)* yaitu *mandani* system.

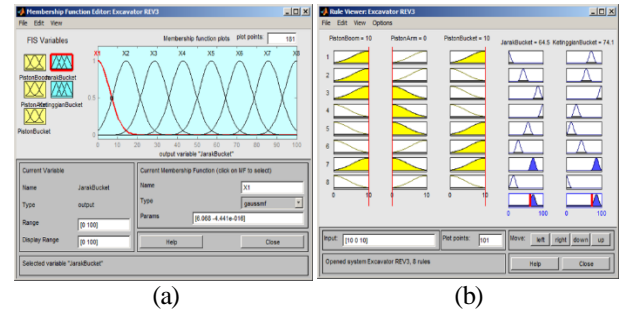
Pada Gambar 6b terlihat fungsi keanggotaan untuk masukan “Piston Boom”, pada jendela berwarna kuning untuk mengatur fungsi keanggotaan yaitu nama fungsi keanggotaan, *range* dan tipe-nya. Nama untuk fungsi keanggotaan yaitu jika silinder pneumatik maju diberi nama *boom +* jika mundur *boom -*. Angka 0-10 menyatakan jangkauan mulai dari posisi mundur ke posisi maju atau sebaliknya. Demikian juga untuk mengatur “Piston Arm” dan “Piston Bucket”.

Pada Gambar 7a terlihat fungsi keanggotaan untuk keluaran “JarakBucket”, pada jendela berwarna biru untuk mengatur fungsi keanggotaan yaitu nama fungsi keanggotaan, *range* dan tipe-nya. Nama untuk fungsi keanggotaan yaitu jika jarak *bucket* dekat diberi nama X1 jika jauh X2 sampai X8. Angka 0-100 menyatakan jangkauan mulai dari posisi X1 sampai X2, X2 sampai X3, dan seterusnya. Demikian juga untuk mengatur keluaran untuk “Ketinggian Bucket”.

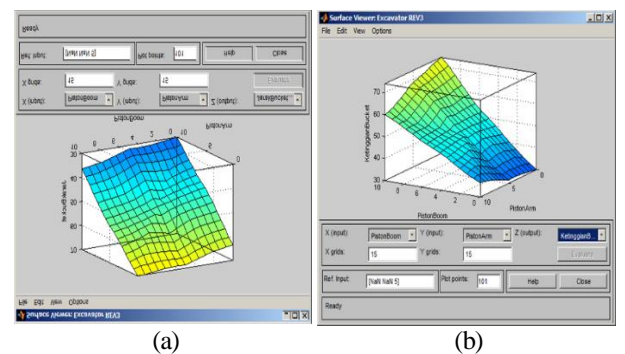

Gambar 6. (a) *Input dan output FIS model excavator* (b) Fungsi keanggotaan untuk masukan silinder *boom*, *arm* dan *bucket*

Pada Gambar 7b terlihat *rule* dari keseluruhan, ada 8 *rule* yang dapat kita buat, untuk mengatur kecenderungan apakah jarak *bucket* semakin jauh atau dekat, kita dapat melakukan dengan menggeser garis tengah berwarna merah untuk tiap fungsi keanggotaan masukan. Pada gambar segitiga berwarna biru terlihat kecenderungan posisi *bucket*, semakin penuh segi tiga tersebut maka kecenderungan posisi *bucket* berada pada

posisi itu semakin besar.


Gambar 7. (a) Fungsi keanggotaan untuk keluaran jarak dan ketinggian *bucket*, (b) Melihat *rule* dari keseluruhan

Pada Gambar 7b terlihat *rule* dari keseluruhan, ada 8 *rule* yang dapat kita buat, untuk mengatur kecenderungan apakah jarak *bucket* semakin jauh atau dekat, kita dapat melakukan dengan menggeser garis tengah berwarna merah untuk tiap fungsi keanggotaan masukan. Pada gambar segitiga berwarna biru terlihat kecenderungan posisi *bucket*, semakin penuh segi tiga tersebut maka kecenderungan posisi *bucket* berada pada posisi itu semakin besar.


Gambar 8. (a) Melihat *surface* dari *fuzzy* untuk *output* jarak (b) Melihat *surface* dari *fuzzy* untuk *output* ketinggian

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, posisi ketinggian dan jarak *bucket* diatur menggunakan kendali logika *fuzzy*. Berdasarkan hasil simulasi, tampak bahwa variasi gerakan dari tiga silinder pneumatik dapat menentukan posisi *bucket* model *excavator*. Dengan kendali logika *fuzzy* ini dapat diatur posisi *bucket* yang diinginkan dengan membuat atau menambahkan *rule*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arief Budi Yulianto dan Mohammad Eri K. (2012), Tugas akhir, Rancang bangun HMI untuk modul pneumatik silinder *single action*
- [2] Nurmanto, Keuntungan dan kerugian penggunaan pneumatik, <http://nurmanto.com/keuntungan-dan-kerugian-penggunaan-pneumatik/>, (diakses 12 Oktober 2013)
- [3] Anonim, <http://www.pusat-definisi.com/2012/11/excavator-adalah.html> (diakses 02 November 2013)
- [4] Muhammad Nabil, (2012), Definisi dan jenis-jenis robot, <http://muhammadnabil.wordpress.com/2012/06/28/definisi-robot-dan-jenis-jenis-robot/> (diakses 27 Nopember 2013)



- [5] Craig. John J., (1955), Introduction to robotics: mechanics and control / John J. Craig.— 2nd ed.
- [6] Jacob Rosen, Models of robot manipulation EE 543
- [7] Mittal Nagrath, (2003), Robotics and Control. Tata McGraw-Hill
- [8] Saeed B. Niki, (2001), Introduction to robotics analysis, systems, application. Prentice Hall
- [9] Danang Yudoyono. (2004), Tugas akhir, Rancang bangun alat pembuat cetakan kue dengan perangkat elektro pneumatik
- [10] Prabowo Pudjo Widodo/Rahmadya Trias Handayanto, (2009), Penerapan soft computing dengan matlab



ANALISA HIDRAULIK JARINGAN PERPIPAAN SATU FASE CAIR MENGGUNAKAN METODE ITERASI HARDY CROSS

Achilleus Hermawan¹⁾, Joko Waluyo²⁾, Indarto³⁾

Program studi S2 Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada ¹⁾,
Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada ^{2,3)}

Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia ^{1,2,3)}

Telepon: +62-274-521673, Fax: +62-274-521673^{1,2,3)}

E-mail : achilleus.hermawan@mail.ugm.ac.id¹⁾, jokowaluyo@ugm.ac.id²⁾, indarto@ugm.ac.id²⁾

ABSTRAK

Analisa hidraulik merupakan suatu langkah penting dalam perancangan jaringan perpipaan yang handal. Pada implementasinya, distribusi air pada suatu daerah pemukiman menggunakan jaringan perpipaan yang kompleks untuk menyalurkan air secara simulatan di beberapa tempat secara simultan pula. Penyelesaian jaringan perpipaan kompleks ini cukup rumit karena memerlukan metode iterasi untuk mendapatkan hasil yang konvergen. Untuk mengefektifkan perhitungan iterasi, diperlukan suatu kajian lanjut agar dapat dihasilkan suatu langkah cepat untuk memperoleh hasil perhitungan yang konvergen. Pada makalah ini, dilakukan kajian untuk melakukan analisa hidraulik suatu jaringan perpipaan kompleks untuk mendistribusikan fluida satu fasa cair. Analisa hidraulik menggunakan persamaan Hazen-Williams untuk mengkonversi debit aliran ke penurunan tekanan fluida, sedangkan penyelesaiannya menggunakan metode Hardy Cross. Teknik iterasi pada metode Hardy Cross yang biasanya dilakukan secara manual, diselesaikan dengan menggunakan program yang disusun berbasis bahasa Matlab. Validasi hasil perhitungan dilakukan dengan memperbandingkan hasilnya terhadap hasil perhitungan manual serta menggunakan suatu software komersil untuk jaringan perpipaan. Hasil kajian menunjukkan bahwa program perhitungan yang disusun di dalam penelitian ini mampu menyelesaikan perhitungan iterasi di dalam analisa hidraulik jaringan perpipaan. Hasil konvergen perhitungan mampu diselesaikan dengan 21 langkah iterasi. Dari hasil validasi, terlihat bahwa program perhitungan mempunyai deviasi di bawah 3 % terhadap hasil-hasil perhitungan software jaringan perpipaan. Program perhitungan ini bermanfaat untuk dikembangkan lebih lanjut di dalam perancangan suatu jaringan perpipaan kompleks.

Kata kunci: analisa hidraulik, jaringan perpipaan, program perhitungan, metode Hardy Cross.

1. PENDAHULUAN

Jaringan perpipaan umum diaplikasikan untuk mentransmisikan maupun mendistribusikan fluida baik cair maupun gas dari suatu tempat ke tempat lain. Dalam perancangan jaringan perpipaan tersebut, kerugian tekanan menjadi salah satu parameter yang perlu diperhitungkan. Parameter ini menjadi penting untuk diperhitungkan agar dapat diperoleh suatu efisiensi jaringan perpipaan yang optimal [1]. Dalam hal ini, analisa hidraulik merupakan salah satu langkah penting dalam perancangan jaringan perpipaan yang efisien dan handal. Tidak jarang jaringan perpipaan yang digunakan untuk mendistribusikan fluida cair maupun gas menggunakan jaringan yang kompleks. Dalam kasus tersebut, penyelesaian analisa hidraulik jaringan perpipaan memerlukan metode khusus yang melibatkan teknik iterasi. Metode- metode khusus dengan teknik iterasi ini dimaksudkan untuk memperoleh hasil perhitungan yang konvergen. Beberapa persamaan yang digunakan dalam analisa hidraulik jaringan perpipaan adalah persamaan Hazen-Williams, persamaan Lacey, persamaan Poliflow, persamaan Panhale dan persamaan Weymouth. Persamaan Hazen-Williams digunakan untuk jaringan perpipaan dengan fluida cair, sedangkan persamaan Lacey, persamaan Poliflow, persamaan Panhale dan persamaan Weymouth digunakan untuk jaringan perpipaan gas. Persamaan Lacey digunakan untuk fluida gas bertekanan rendah, persamaan Poliflow digunakan untuk fluida gas bertekanan sedang dan persamaan Panhale untuk fluida gas bertekanan tinggi, sedangkan persamaan Weymouth dapat digunakan untuk fluida gas bertekanan tinggi serta turbulen sempurna. Beberapa metode iterasi yang digunakan dalam analisa hidraulik adalah metode iterasi Newton Raphson dan

metode iterasi Hardy Cross. Metode iterasi Hardy Cross merupakan metode yang umum digunakan dalam analisa hidraulik jaringan perpipaan fluida cair. Metode ini merupakan teknik iterasi numeris untuk perhitungan laju aliran dan penurunan tekanan aliran loop di dalam jaringan perpipaan [2].

Beberapa metode yang berpondasi pada metode Hardy Cross telah dikembangkan oleh peneliti-peneliti lain. Haman dan Brameller [3] mengembangkan suatu metode untuk menyelesaikan persamaan-persamaan laju aliran dan head secara simultan. Komparasi dari beberapa metode yang dijabarkan menunjukkan bahwa secara umum, dalam analisis jaringan perpipaan, penyelesaian dengan menggunakan analisa loop menghasilkan karakteristik konvergensi yang lebih baik, sedangkan penyelesaian dengan menggunakan analisa nodal dinilai lebih tepat untuk memformulasikan persamaan-persamaan dengan tingkat *sparsity* maksimum. Dengan menggunakan teori pada sistem elektrik, metode tersebut mengkombinasikan formulasi nodal dan loop menjadi suatu metode hibrida yang lebih efisien. Arsene dkk [4,5] mengembangkan skema simulasi jaringan perpipaan untuk mendistribusikan fluida satu fasa cair. Skema tersebut menitikberatkan pada investigasi implikasi dari persamaan-persamaan loop serta estimasi keadaan yang digunakan terhadap efektifitas algoritma. Brkic [6,7] menjabarkan komparasi antara beberapa metode analisa hidraulik jaringan perpipaan berdasarkan kriteria efisiensi dalam pencapaian konvergensi hasil perhitungan. Dari beberapa metode yang dikomparasikan; metode Hardy Cross yang telah dimodifikasi, metode Andrijahshev dan metode Nodal-Loop memiliki performa yang berimbang ketika diaplikasikan pada jaringan perpipaan sederhana 3 loop. Secara umum, metode iterasi Hardy Cross memiliki keunggulan dan efektivitas

dalam menghasilkan karekteristik konvergensi yang baik.

Terkait dengan hal-hal tersebut di atas, makalah ini menyajikan kajian tentang analisa hidraulik jaringan perpipaan satu fase cair dengan menggunakan metode Hardy Cross. Analisa hidraulik menggunakan persamaan Hazen-Williams untuk mengkonversi debit aliran ke penurunan tekanan fluida, sedangkan penyelesaiannya menggunakan metode Hardy Cross. Teknik iterasi pada metode Hardy Cross yang biasanya dilakukan secara manual, diselesaikan dengan menggunakan suatu program perhitungan berbasis bahasa Matlab. Validasi hasil perhitungan dilakukan dengan cara mengkomparasikan hasil yang diperoleh terhadap hasil-hasil simulasi dengan menggunakan *software* komersil untuk jaringan perpipaan.

2. METODOLOGI

Pada penelitian ini, digunakan langkah-langkah penyelesaian seperti tersaji pada Gambar 1. Diagram alir menunjukkan bahwa pada perhitungan laju aliran maupun penurunan tekanan loop, persamaan Hazen-Williams difungsikan untuk mengkonversi debit aliran menjadi penurunan tekanan fluida, sedangkan penyelesaiannya menggunakan teknik iterasi Hardy Cross. Persamaan Hazen-Williams mengasumsikan suatu keadaan setimbang antara tekanan dan gaya gesek pada kondisi yang stedi pada aliran fluida inkompresibel, sedangkan metode Hardy Cross pada dasarnya merupakan teknik iterasi suksesif untuk menghitung nilai koreksi pada langkah permulaan perhitungan. Dalam algoritma program perhitungan ini, setiap persamaan diselesaikan secara individual. Beberapa kondisi batas yang harus dipenuhi dalam perhitungan dengan metode Hardy Cross adalah penjumlahan aljabar laju aliran tiap-tiap nodal adalah nol (Hukum I Kirchoff tentang kontinuitas aliran) serta penjumlahan aljabar penurunan tekanan pada setiap loop adalah nol pada akhir prosedur iterasi (Hukum II Kirchoff tentang kontinuitas potensial) [2].

Pendekatan awal nilai laju aliran volumetrik pada setiap cabang diperlukan dalam permulaan perhitungan. Nilai pendekatan awal tersebut harus memenuhi persyaratan kondisi batas. Pada setiap loop, nilai pendekatan baru laju aliran dikoreksi secara substitutif. Proses ini akan berulang hingga keseluruhan loop memiliki deviasi dibawah toleransi nilai yang ditetapkan [8].

Hubungan antara *slope of hydraulic gradient* (S), debit aliran (Q), diameter pipa (d) dan nilai kekasaran (C_i) dinyatakan dalam persamaan Hazen-Williams berikut.

$$S = 0.54 \sqrt{\frac{Q}{0.2785 C_1 d^{2.63}}} \quad (1)$$

Besarnya *initial lose head (LH)* berbanding lurus dengan panjang saluran (L) dan *slope of hydraulic gradient (S)*

$$LH = SL \quad (2)$$

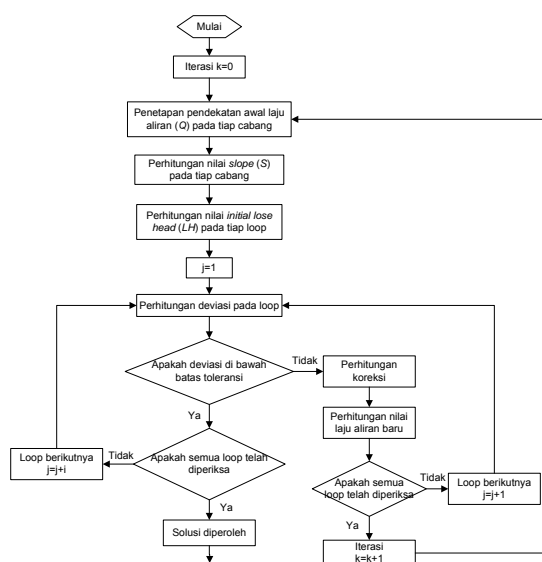
Untuk persamaan Hazen-Williams, nilai koreksi (k) pada tiap-tiap loop diperoleh melalui persamaan berikut.

$$\Delta = - \frac{\sum LH}{1.85 \sum (LH/Q_0)} \quad (3)$$

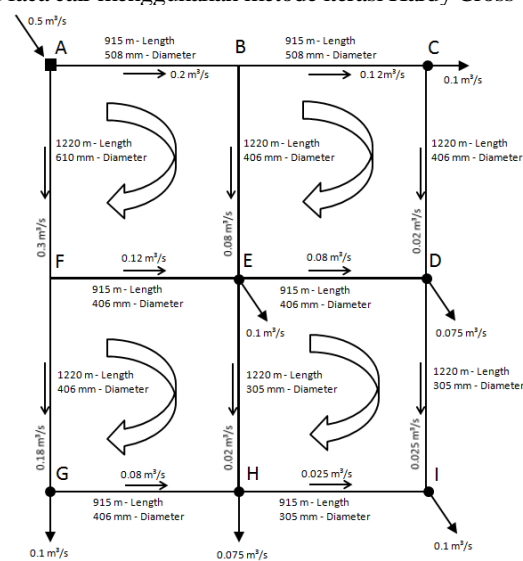
Skematik jaringan perpipaan yang digunakan adalah jaringan perpipaan paralel (kompleks) seperti terlihat pada Gambar 2. Nominal diameter pipa yang digunakan disesuaikan dengan ukuran standar pipa yang terdapat di pasaran dengan nilai kekasaran relatif (C_f) adalah 120. Pada

skema, terdapat 1 nodal yang merupakan nodal referensi (*source*) yaitu nodal A, serta 6 nodal yang merupakan nodal beban (*load*) masing-masing adalah nodal C, D, E, F, H dan I. Nodal referensi ini merupakan titik di mana fluida cair dipasok ke dalam jaringan perpipaan, sedangkan nodal beban merupakan titik-titik di mana fluida disuplai.

Arah aliran pada setiap segmen pipa serta arah loop ditentukan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Besarnya laju aliran yang dipasang ke nodal referensi adalah $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan besarnya beban yang dikehendaki adalah $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ pada titik C, $0.075 \text{ m}^3/\text{s}$ pada titik D, $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ pada titik E, $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ pada titik G, $0.075 \text{ m}^3/\text{s}$ pada titik H dan $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ pada titik I. Pada loop I, besarnya nilai-nilai asumsi pendekatan awal adalah pada segmen pipa A-B $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, B-C $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$, E-F $-0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ dan F-A $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Pada loop II, segmen pipa B-C $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$, C-D $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, D-E $-0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ dan E-B $-0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. Pada loop III, segmen pipa F-E $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$, E-H $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, HG $-0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ dan G-F $-0.18 \text{ m}^3/\text{s}$. Pada loop IV, segmen pipa E-D $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$, D-I $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, I-H $-0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ dan H-E $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$. Tanda negatif mengindikasikan arah yang berlawanan.



Gambar 1. Diagram alir analisa hidraulik jaringan perpipaan satu fasa cair menggunakan metode iterasi Hardy Cross



Gambar 2. Skema serta pendekatan awal laju aliran pada kasus jaringan perpipaan kompleks

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan

Pada simulasi numeris analisa hidraulik jaringan perpipaan, verifikasi hasil perhitungan merupakan parameter yang mengindikasikan bahwa telah terjadi kesesuaian hasil perhitungan terhadap kondisi-kondisi batas yang ditentukan. Pada makalah ini verifikasi hasil perhitungan yang diperoleh melalui program diindikasikan dengan diperolehnya konvergensi hasil perhitungan.

Pendekatan awal nilai laju aliran volumetrik (Q) perlu dilakukan pada setiap segmen pipa. Pada penetapan ini diterapkan konsep kekekalan massa yaitu penjumlahan total laju aliran pada setiap segmen pipa sama dengan laju aliran yang masuk pada nodal referensi. Nilai penjumlahan total tersebut juga sama dengan penjumlahan total laju aliran pada keseluruhan nodal beban.

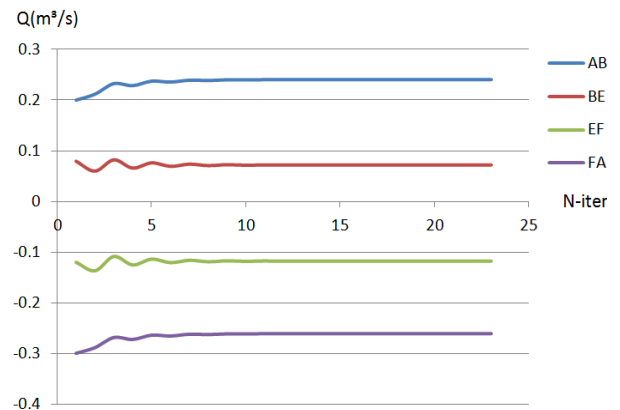
Perhitungan nilai *slope of hydraulic gradient* pada setiap segmen pipa menggunakan persamaan (1), perhitungan nilai rugi tekanan pada setiap loop menggunakan persamaan (2), dan perhitungan nilai deviasi pada loop menggunakan persamaan (3). Jumlah iterasi yang dikehendaki diperoleh melalui perhitungan laju aliran pada cabang-cabang setelah perhitungan laju aliran loop diselesaikan secara individual. Semakin dekat nilai-nilai asumsi yang digunakan terhadap nilai hasil perhitungan yang dihasilkan, fluktuasi yang terjadi akan semakin kecil sehingga konvergensi hasil perhitungan akan semakin cepat diperoleh.

Pada contoh kasus yang diaplikasikan, konvergensi keseluruhan segmen pipa dapat dicapai pada langkah iterasi ke-21. Segmen-segmen tertentu telah mengalami konvergensi lebih awal yaitu; segmen pipa H-G dan G-F yaitu pada iterasi ke-14. Segmen pipa D-I dan I-H merupakan segmen yang mengalami konvergensi terlama yaitu pada iterasi ke-21. Segmen-segmen pipa lainnya mengalami konvergensi antara iterasi ke-14 dan 21 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

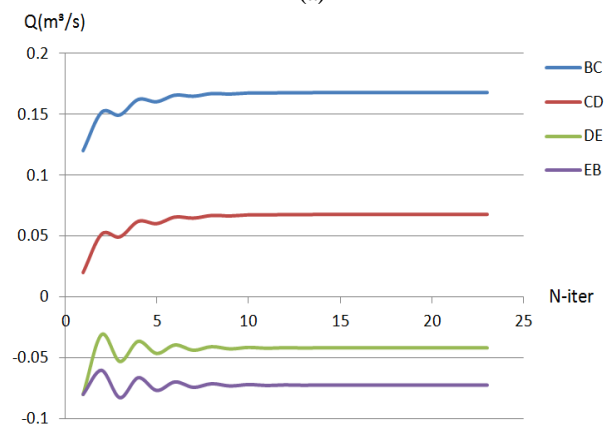
Validasi program perhitungan

Validasi program perhitungan diperlukan untuk mengetahui kehandalan program perhitungan juga besarnya deviasi yang terjadi. Pada makalah ini, proses validasi terhadap program perhitungan yang disusun dilakukan dengan mengkomparasikan hasil yang diperoleh melalui program perhitungan terhadap hasil-hasil perhitungan yang diperoleh dengan menggunakan beberapa *software* komersil yang umum digunakan dalam analisa hidraulik jaringan perpipaan.

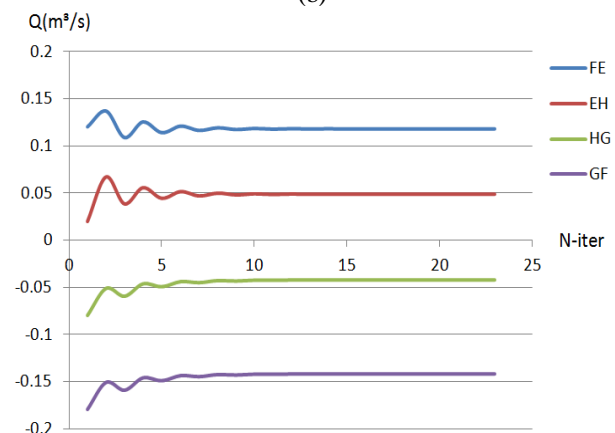
Pada komparasi program perhitungan terhadap beberapa *software* komersil jaringan perpipaan, deviasi terendah ditampilkan pada segmen pipa D-I, I-H dan H-E yaitu 0% untuk komparasi terhadap *software* komersil Pipeflow serta segmen pipa B-C yaitu 0.12% untuk komparasi terhadap *software* komersil Pipesim. Deviasi tertinggi ditampilkan pada segmen pipa B-E dan E-B sebesar 0.42% untuk komparasi terhadap *software* komersil Pipeflow. Pada segmen pipa yang sama juga diperoleh deviasi tertinggi sebesar 2.04% untuk komparasi terhadap *software* komersil Pipesim seperti diperlihatkan pada Tabel 1.



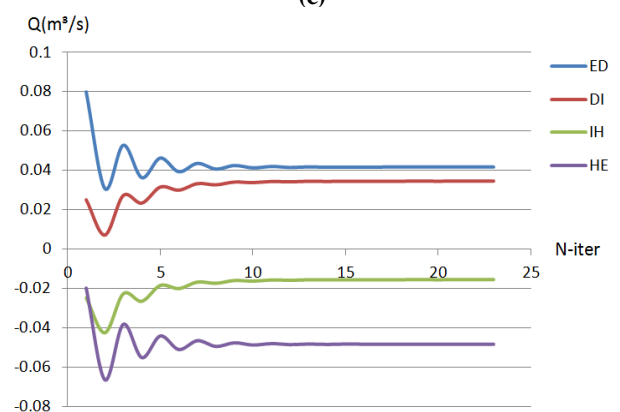
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3. Grafik konvergensi hasil perhitungan pada (a) Loop I (b) Loop II (c) Loop III (d) Loop IV



Tabel 1. Komparasi terhadap beberapa *software* komersil

Segmen	Laju aliran volumetrik (m ³ /s)				
	Matlab	Pipeflow	Deviasi (%)	Pipesim	Deviasi (%)
AB	0.2401	0.2400	0.04	0.2414	0.54
BE	0.0723	0.0720	0.42	0.0738	2.04
EF	-0.1178	-0.1179	0.08	-0.1161	1.47
FA	-0.2599	-0.2600	0.04	-0.2586	0.50
BC	0.1678	0.1679	0.06	0.1676	0.12
CD	0.0678	0.0679	0.15	0.0676	0.29
DE	-0.0416	-0.0415	0.24	-0.0417	0.24
EB	-0.0723	-0.0720	0.42	-0.0738	2.04
FE	0.1178	0.1179	0.08	0.1161	1.47
EH	0.0485	0.0485	0.00	0.0482	0.64
HG	-0.0422	-0.0421	0.24	-0.0425	0.72
GF	-0.1422	-0.1421	0.07	-0.1425	0.21
ED	0.0416	0.0415	0.24	0.0417	0.24
DI	0.0344	0.0344	0.00	0.0343	0.28
IH	-0.0156	-0.0156	0.00	-0.0157	0.62
HE	-0.0485	-0.0485	0.00	-0.0482	0.64

4. KESIMPULAN

Kajian analisa hidraulik jaringan perpipaan satu fase cair telah dipaparkan dalam makalah ini. Persamaan yang digunakan di dalam program perhitungan adalah persamaan Hazen-Williams, teknik iterasi yang digunakan adalah teknik iterasi Hardy Cross dan bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa pemrograman Matlab. Program perhitungan yang disusun mampu menyelesaikan perhitungan iterasi di dalam analisa hidraulik jaringan perpipaan kompleks. Hasil konvergen perhitungan mampu diselesaikan dengan 21 langkah iterasi. Dari hasil validasi, terlihat bahwa program perhitungan mempunyai deviasi di bawah 3 % terhadap hasil-hasil perhitungan dengan menggunakan beberapa *software* komersil. Program perhitungan ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk efektivitas analisa hidraulik jaringan perpipaan kompleks.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ekinci, O., Konak, H., *An Optimization Strategy for Water Distribution Networks*, Journal of Water Resour Manage (2009) 23:169–185
- [2] Cross, H., *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*, University of Illinois: Engineering Experiment Station (1936) 286:3–29
- [3] Hamam, Y.M., Brameller, A., *Hybrid method for the solution of piping networks*, Proc IEEE (1971); 118(11):1607–12
- [4] Arsene C.T.C., Bargiela A., Al-Dabass D., *Modelling and simulation of water systems based on loop equations*, International Journal of Simulation (2004); 5(1-2): 61–72
- [5] Arsene C.T.C., Al-Dabass D., Hartley J., *A Study on modelling and simulation of water distribution systems based on loop corrective flows and containing controlling hydraulics elements*, Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation, IEEE Computer Society (2012)
- [6] Brkic, D., *An improvement of Hardy Cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks*, Journal of Applied Energy 86 (2009) 1290–1300
- [7] Brkic, D., *Iterative Methods for Looped Network Pipeline Calculation*, Journal of Water Resour Manage (2011) 25:2951–2987
- [8] Osiadacz, A.J., *Simulation and analysis of gas networks*, Houston: Gulf Publishing Company, 1987
- [9] Giles, R.V., Evett, J.B., Liu, C., *Theory and Problems of Fluid Mechanics and Hydraulics* (3rd edition), Schaum's Outline Series: McGraw-Hill, 1995

SIMULASI NUMERIK DENGAN PENDEKATAN 3D-URANS ALIRAN YANG MELINTASI SUSUNAN EMPAT SILINDER SINGKULAR DEKAT DINDING PADA “SMALL-GAP”

A. Grummy Wailanduw¹⁾, Triyogi Yuwono²⁾, Wawan Aries Widodo³⁾

Mahasiswa Pascasarjana ITS Surabaya,

Dosen Jurusan Teknik Mesin, FT-Unesa, Indonesia¹⁾

Dosen Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya, Indonesia²⁾

Dosen Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya, Indonesia³⁾

E-mail: grummy_wailanduw@yahoo.co.id

ABSTRAK

Aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular di center line telah banyak dilakukan, baik secara eksperimen, simulasi, maupun visualisasi. Fenomena aliran yang terjadi di sekeliling silinder berbeda, ketika susunan empat silinder sirkular tersebut diletakkan dekat dinding, terutama pada “small gap”. Pengaruh lapis batas dari dinding akan mempengaruhi aliran pada lower cylinder terutama down-stream cylinder yang sebelumnya hanya dipengaruhi oleh up-stream cylinder. Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap fenomena aliran di sekeliling susunan silinder yang diletakkan sangat dekat dengan dinding tersebut. Metode simulasi numerik disini menggunakan bantuan software FLUENT 6.3.26, dan karakteristik aliran diteliti pada susunan empat silinder sirkular $L/D = 4$ yang ditempatkan sangat dekat dinding dengan rasio $G/D = 0,1$ dan $G/D = 0,2$ dengan bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$ berdasarkan diameter silinder. Dalam menentukan model viskos yang akan digunakan, dilakukan validasi antara hasil simulasi numerik yang menggunakan berbagai model viskos dan hasil eksperimen pada silinder tunggal yang ditempatkan di center line. Hasil validasi menunjukkan bahwa dari berbagai model viskos URANS yang telah dicoba, model viskos k- ω sst memiliki hasil yang mendekati hasil eksperimen. Berdasarkan penelitian tersebut, diperoleh pressure coefficient distribution (C_p) dari upper cylinder dan lower cylinder yang berbeda. Selanjutnya dari hasil simulasi ini juga dapat dilihat bahwa daerah di belakang silinder sirkular, antara upper dan lower cylinder terjadi perbedaan pola vortex shedding antara jarak kedua rasio tersebut.

Kata kunci: simulasi numerik, 3D-URANS, susunan empat silinder sirkular, dekat dinding

1. PENDAHULUAN

Aliran yang melintasi silinder sirkular dekat dinding banyak dijumpai dalam aplikasi engineering, seperti konstruksi sistem perpipaan di bawah laut, alat penukar kalor shell and tube atau tube banks. Ketika aliran melintasi silinder sirkular yang ditempatkan dekat dinding akan terbentuk suatu pola aliran atau flow pattern yang tertentu sesuai dengan geometri kontur bodi, dan juga menimbulkan gaya-gaya aerodinamik, seperti lift force dan drag force, pada bodi. Lift force menyebabkan efek getaran atau vibrasi pada konstruksi sehingga dapat mengurangi kekuatan dari material tersebut, sementara drag force dikaitkan dengan suatu aliran dapat memperlambat atau mengurangi momentum aliran tersebut. Gaya-gaya aerodinamik pada silinder sirkular ini terjadi sebagian besar karena dipengaruhi atau didominasi oleh pressure forces, sedangkan pengaruh viscous forces relatif kecil, terutama pada bilangan Reynolds yang cukup tinggi. Selain itu juga dipengaruhi oleh adanya flow interference akibat pola aliran yang terbentuk antara dinding dan silinder sirkular tersebut.

Flow interference adalah fenomena aliran yang terbentuk ketika aliran pada silinder sirkular dipengaruhi oleh aliran dinding tersebut. Fenomena flow interference ini sangat bergantung pada kecepatan free stream dan diameter silinder (bilangan Reynolds), dan sifat-sifat lapis batas, seperti jenis dan tebal lapis batas dari dinding. Sementara lift force timbul ketika kecepatan aliran yang mengalir pada kontur bodi mengalami perubahan karena efek viscous, sehingga terjadi perbedaan distribusi tekanan antara bagian atas dan bagian bawah dari bodi, dan menghasilkan suatu getaran atau vibrasi

ketika perbedaan tersebut berlangsung secara kontinyu. Bodi tersebut akan mengalami lift force positif apabila distribusi tekanan di bagian bawah bodi lebih besar dari distribusi tekanan bagian atas, dan sebaliknya menimbulkan lift force negatif apabila distribusi tekanan bagian atas bodi lebih besar dari distribusi tekanan bagian bawah. Besar kecilnya lift force ditentukan oleh orientasi arah aliran terhadap bluff body tunggal atau dalam susunan tertentu, serta geometri dari kontur bodi. Sedangkan drag force terjadi ketika aliran yang mengalir pada bodi bagian atas dan bagian bawah tersebut terlepas atau terpisah (separasi) dari bodi. Terlepasnya aliran dari kontur bodi dikarenakan momentum aliran tersebut tidak mampu mengatasi adverse pressure dan skin friction akibat shear stress. Besar kecilnya drag force ditentukan oleh kapan terjadinya pemisahan aliran tersebut, dengan kata lain apabila separasi terjadi lebih awal maka wake region makin lebar dan berarti drag force juga besar, dan sebaliknya apabila separasi tertunda maka wake region lebih sempit sehingga drag force juga kecil.

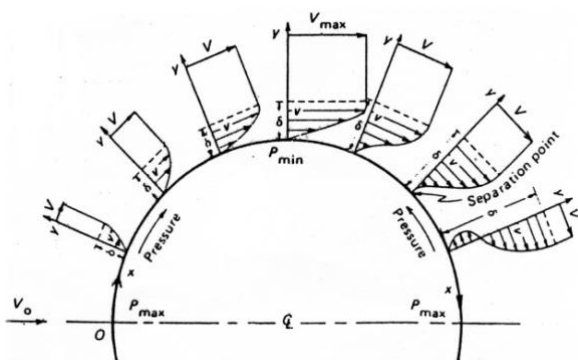
Faktor-faktor yang menentukan posisi separasi pada silinder sirkular antara lain: kecepatan free stream dan profil aliran, free stream turbulence, geometri, dan kekasaran permukaan bodi.

Penelitian secara eksperimen maupun visualisasi terkait dengan silinder dekat dinding sudah banyak dilakukan oleh Ramamurthy dan Lee (1973), Lei et.al (1999), Choi dan Lee (2000), Price et.al (2002), Lin et.al (2005), Nishino et.al (2008), dan Wang dan Tan (2008). Penelitian secara eksperimen mengamati bentuk pola aliran yang terjadi disekeliling silinder sirkular dan pengaruhnya terhadap karakteristik aerodinamik, seperti drag dan lift coefficient,

dengan memvariasi jarak antara silinder dengan dinding datar, posisi penempatan silinder pada lapis batas. Melalui kajian eksperimen ini diperoleh hasil bahwa variasi rasio gap silinder terhadap dinding berpengaruh terhadap *drag* dan *lift coefficient*, tetapi ketebalan lapis batas dinding lebih berpengaruh secara signifikan terhadap *drag coefficient*. Sementara melalui visualisasi dapat diidentifikasi perilaku aliran menjadi empat pola yang berbeda, yaitu: terbentuknya *vortex shedding* yang tidak beraturan terutama pada *lower side* dari silinder *wake*, tetapi *outer shear layer* tetap terbentuk secara periodik pada rasio gap yang sangat kecil; mulai ada kombinasi antara *inner shear layer shedding* dari silinder dengan lapis batas dinding pada rasio gap kecil; terbentuknya onset *vortex shedding* dari silinder pada rasio gap menengah; dan tidak terjadi separasi dari lapis batas dinding, juga *upstream* atau *downstream cylinder* pada rasio gap yang besar. Penelitian tentang susunan dua silinder sirkular *side by side* maupun *tandem* dekat dinding juga telah dilakukan oleh Yuwono et.al (2010) dan Wawan et.al (2010).

Penelitian berikut ini bertujuan untuk menggambarkan fenomena aliran yang terbentuk di sekeliling susunan empat silinder sirkular dengan konfigurasi *in-line* pada $L/D = 4$ dekat dinding dengan rasio $(G/D) = 0,1$ dan $0,2$ melalui simulasi numerik. Penggunaan metode simulasi numerik sebagai suatu studi awal sangat bermanfaat, karena selain dapat menggambarkan dan memprediksi fenomena yang akan terjadi, juga dapat digunakan untuk mengeksplorasi lebih dalam fenomena atau kejadian yang tidak dapat ditunjukkan melalui eksperimen. Dengan demikian waktu penelitian menjadi lebih singkat dan dapat menghemat biaya dari suatu penelitian, walaupun penerapan metode simulasi inipun memiliki keterbatasan, yaitu adanya ketidak pastian (*uncertainty*) dan pengambilan asumsi ideal.

Medan aliran yang melintasi permukaan silinder sirkular terbagi menjadi *upperside* dan *lowerside* di titik separasi. Titik separasi terjadi pada daerah yang tekanannya meningkat (*adverse pressure gradient*). Fluida kemudian akan mengalami separasi karena momentum fluida didekat dinding tidak mampu menghadapi kombinasi gaya *viscous* dan *gradien* tekanan searah aliran. Selanjutnya akan terbentuk *viscous wake*, seperti diilustrasikan oleh gambar berikut ini.



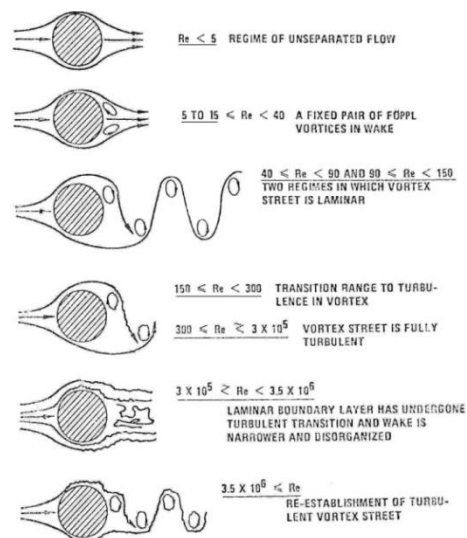
Gambar 1. Pertumbuhan boundary layer dan tekanan dari aliran yang melintasi permukaan silinder

Regime aliran melalui silinder sirkular tunggal yang dipresentasikan oleh Lienhard sebagai berikut:

- Pada bilangan *Reynolds* (Re) yang sangat kecil ($Re < 5$) aliran tidak terpecah. Seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds*, aliran terpecah untuk membentuk sepasang resirkulasi eddy pada tiap sisi dari silinder.
- Pada bilangan *Reynolds* (Re) yang semakin meningkat,

shedding eddy menjadi semakin panjang searah aliran, panjangnya meningkat secara linier terhadap bilangan *Reynolds* sampai aliran stabil pada $Re \sim 4 \times 10^1$, *vortices* kemudian terpecah, konsekuensinya periodik *staggered vortex street* terbentuk.

- Pada bilangan *Reynolds* (Re) hingga $\sim 1,5 \times 10^2$, *vortex street* bertambah lebar yang berjalan di belakang hingga beberapa diameter. Peningkatan pertama kali dari *wake* yang berkembang menjadi dua baris sejajar *staggered vortices*. Teori inviscid *Von Karman* menunjukkan *vortex street* akan stabil saat rasio lebar dengan jarak *streamwise* adalah 0,28. Pada daerah ini, *vortex street* adalah laminar.
- Pada bilangan *Reynolds* (Re) $= 3 \times 10^2$, memunculkan lapisan batas laminar yang melalui bagian depan silinder, saat melalui bagian belakang silinder, lapisan terpecah dan memecah menjadi turbulen *wake*. Dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* ($3 \times 10^2 \leq Re < 3 \times 10^5$) titik separasi akan bergerak ke depan.
- Pada bilangan *Reynolds* sekitar 3×10^5 , titik separasi akan bergerak ke belakang hal ini dipengaruhi oleh turbulensi aliran bebas (*free stream*) dan kekasaran permukaan benda, yang ini akan menyebabkan *drag* semakin turun dengan tajam dan *vortex shedding* menjadi tidak beraturan.
- Pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi lagi *vortex street* muncul kembali.

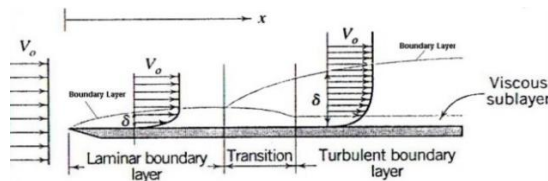


Gambar 2. Regime aliran melalui silinder sirkular

Sementara aliran pada bidang/plat datar merupakan *zero pressure gradient flow*, artinya tidak terjadi perubahan tekanan dalam aliran selama mengalir di atas plat datar. Dengan demikian penyebab dari gradiasi kecepatan di dalam lapisan batas karena adanya tegangan geser pada bidang datar akibat viskositas dari fluida yang mengalir.

Aliran *viscous* di dalam lapisan batas tepat di atas permukaan plat datar kecepatannya sama dengan 0 (nol), atau dikatakan tidak terjadi slip (*no slip condition*) pada bidang tempatnya mengalir. Sampai batas ketebalan tertentu dari permukaan tempat mengalir terjadi gradiasi kecepatan hingga pada suatu titik tertentu dimana kecepatannya sama dengan kecepatan aliran bebas (*free stream*). Perkembangan aliran yang terjadi didalam lapisan batas dapat berupa laminar atau turbulen. Kecepatan aliran laminar dalam lapisan batas adalah u , sementara kecepatan aliran turbulen didalam lapisan batas adalah merupakan kecepatan rata-rata (\bar{u}) ditambah dengan

kecepatan fluktuasi pada tiga komponen (u' , v' , dan w'). Lapisan batas yang terjadi pada plat datar apabila dialiri oleh suatu aliran ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Lapisan batas laminar terjadi mulai ujung depan atau *leading edge* diikuti dengan transisi dan akhirnya menjadi turbulen.



Gambar 3. Lapisan batas kecepatan pada plat datar

Secara umum faktor-faktor yang mempengaruhi posisi transisi dalam lapisan batas adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan solid bodi atau *surface roughness*, perpindahan panas, gaya-gaya bodi atau *body forces*, dan gangguan-gangguan yang diberikan pada free-stream atau *free-stream disturbances*.

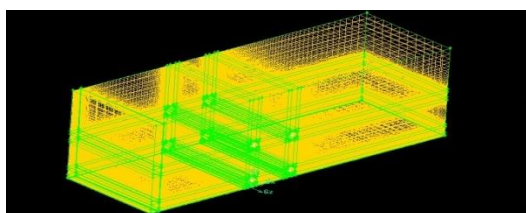
2. METODOLOGI

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam simulasi numerik ini adalah: (a) Membuat geometry set-up dalam bentuk tiga dimensi (3-D), untuk silinder sirkular pada jarak rasio dengan dinding (G/D)= 0,1 dan 0,2, gambar 4; (b) Membuat meshing tiga dimensi dalam bentuk *hexahedron*; (c) Menentukan *boundary condition* dari domain yang dibuat; (d) Memilih teknik untuk iterasi, yaitu menggunakan *pressure velocity coupling* SIMPLE dan diskritisasi menggunakan *second order upwind* agar menghasilkan akurasi dan stability yang tinggi; (e) Melakukan proses iterasi dengan menggunakan pemodelan U-RANS 3D; (f) Melakukan *post processing* dari hasil iterasi.

Untuk pengecekan *grid independency* dilakukan analisis terhadap berbagai meshing dengan variasi nodes dan face, dan diperiksa nilai maksimum y^+ (y plus). Selanjutnya dalam menentukan model viskos yang akan digunakan, dilakukan validasi antara hasil simulasi numerik yang menggunakan berbagai model viskos dan hasil eksperimen pada silinder sirkular tunggal yang ditempatkan di *center line*. Hasil validasi menunjukkan bahwa dari berbagai model viskos U-RANS yang telah dicoba, model viskos $k-\omega$ SST memiliki hasil yang mendekati eksperimen maupun model numerik LES.

Simulasi numerik di sini menggunakan bantuan software FLUENT versi 6.3.26, untuk mengamati karakteristik aliran di sekeliling silinder sirkular. Bentuk geometri diambil 3-D dengan tujuan untuk menyesuaikan dengan eksperimen yang pengukurannya dilakukan pada daerah *midspan*.

Karakteristik aliran yang diperoleh melalui simulasi numerik ini meliputi distribusi tekanan (koefisien tekanan, C_p), visualisasi aliran yang melintasi silinder sirkular (*velocity pathline*).



Gambar 4. Bentuk meshing 3-D dari model silinder sirkular dekat dinding menggunakan hexahedron

Persamaan pengendali pada aliran 3-D, *incompressible flow* dan *unsteady state*:

a. Persamaan konservasi masa:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

b. Persamaan momentum:

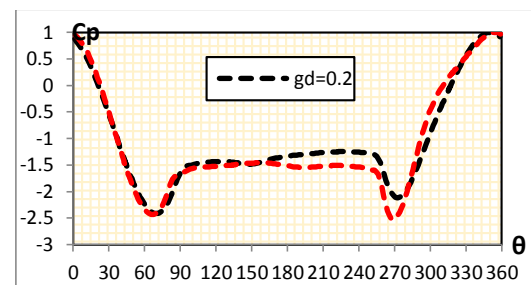
$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2c)$$

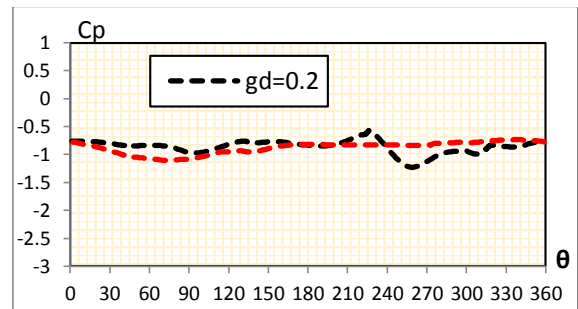
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur plat datar maupun pada silinder sirkular yang diprediksi oleh model turbulensi $k-\omega$ SST pada kecepatan 13 m/s, atau pada bilangan Reynolds = $5,3 \times 10^4$.



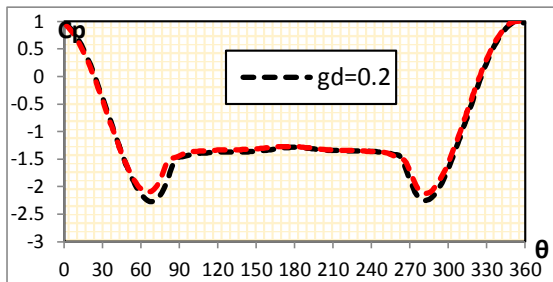
Gambar 5. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur silinder *upstream silinder-1* dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,1$ dan $0,2$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$, numerik 3D-URANS

Dari Gambar 5 dapat diketahui pada rasio $G/D=0,1$ dan $G/D=0,2$, harga $C_p=1$ atau titik stagnasi terjadi pada sudut $\theta_s=355^\circ$. Ini menunjukkan bahwa aliran yang menuju ke silinder-1 tidak tegak lurus terhadap silinder, karena posisi peletakan silinder dekat dinding menyebabkan terjadinya efek blockage, sehingga sebagian besar fluida akan terdefleksi ke *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari tekanan minimum yang terjadi pada $\theta=70^\circ$ dan separasi terjadi pada $\theta=100^\circ$.



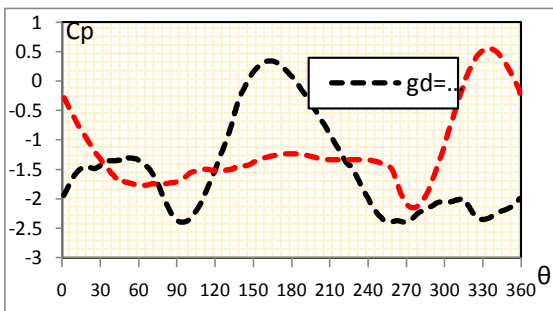
Gambar 6. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur silinder *downstream silinder-2* dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,1$ dan $0,2$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$, numerik 3D-URANS

Dari Gambar 6 menunjukkan terdapat distribusi koefisien tekanan C_p yang memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *shearlayer* melingkupi pada kontur silinder-2, terutama pada *frontside-upper* silinder.



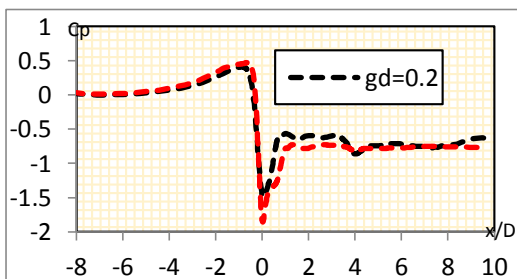
Gambar 7. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur silinder *upstream silinder-3* dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,1$ dan $0,2$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ numerik 3D-URANS

Dari Gambar 7 dapat diketahui bahwa $C_p=1$ atau titik stagnasi terjadi pada $\theta_s=355^\circ$, ini menunjukkan bahwa momentum aliran pada *lowerside* silinder lebih besar dibanding *upperside*, sehingga titik stagnasi bergerak ke bawah menjauhi *frontside* $\theta_s=360^\circ$. Akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari tekanan minimum pada $\theta=65^\circ$ dan titik separasi $\theta=110^\circ$.



Gambar 8. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur silinder *downstream silinder-4* dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,1$ dan $0,2$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$, numerik 3D-URANS

Dari gambar 8 dapat diketahui bahwa distribusi koefisien tekanan C_p untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder dikelilingi oleh *shear layer*. Sementara pada *lowerside front* terjadi reattachment dari *shear layer*.



Gambar 9. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada *plat datar* dekat susunan empat silinder sirkular *in-line square* dengan $L/D=4$ variasi $G/D=0,1$ dan $0,2$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$, numerik 3D-URANS

Gambar 9 menunjukkan distribusi koefisien tekanan sepanjang dinding yang diamati dari $-8.75 \leq x/D \leq 9.6$. Keberadaan *upstream silinder-1* dan *downstream silinder-2* yang dekat dinding menyebabkan efek blockage pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* dari silinder dan dinding, ini ditandai dengan harga $C_p < 1,0$, $G/D=0,1$. Ketika aliran melalui celah mengalami akselerasi, yang ditandai dengan dua nilai tekanan minimum (C_p negatif) pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang positif ini recovery menjadi static pressure pada $x/D \geq 9$, dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

4. KESIMPULAN

Distribusi koefisien tekanan pada silinder-1 menunjukkan distribusi yang tidak simetri terutama pada seluruh rasio $G/D=0,1 \leq G/D < 1,0$, yang ditandai dengan tidak adanya posisi titik stagnasi $C_p=1$ pada front side. Ini dikarenakan posisi silinder-1 yang dekat dengan dinding datar, sehingga timbul efek blockage dan menyebabkan sebagian besar fluida mengalir ke *upperside* silinder-1

Perpindahan fluida juga membawa penambahan momentum pada aliran diantara silinder-1 dan silinder-3, yang ditandai dengan posisi titik separasi yang bergerak ke *frontside* dari silinder-3 dengan bertambahnya rasio gap.

Koefisien base pressure pada silinder-1 menurun dengan bertambahnya rasio gap G/D hal ini sesuai dengan penelitian Choi dan Lee.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Choi, J.H., and Lee, S.J. (2000). "Ground effect of flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer". *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 14, p.697-709.
- Fox, Robert W., and McDonald, Alan T. (2010). *Introduction to Fluid Mechanics*. Seventh edition: SI version, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- Lei, C., et. al. (1999). "Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume: 80, p. 263-286.
- Lin, et. al. (2005). "Flow characteristics around a circular cylinder near a plane boundary". 16TH *International Symposium on Transport Phenomena*, Prague.
- Nishino, T. et. al. (2008). "Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect". *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 24, p.18-33.
- Price, S.J., et. al. (2002). "Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall". *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 16, p. 175-191.
- Ramamurthy, A. S., and Lee, P. M. (1973). "Wall effects on flow past bluff bodies". *Journal of Sound and Vibration*, Volume: 31(4), p. 443-451.
- Wang, X.K., and Tan, S.K. (2008). "Near wake flow characteristics of a circular cylinder close to a wall". *Journal of Fluids and Structures*, Volume:24,p.605-627.

SIMULASI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUDUT SWIRL VANES PADA RADIALLY STRATIFIED FLAME CORE BURNERS TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN

Atok Setiyawan⁽¹⁾ & Senna Septiawan⁽²⁾

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)^(1,2)(10 pt)^{1,2)}

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

Phone: 062-31-5992941, Fax: 062-31-5992941

E-mail: atok_s@me.its.ac.id; atok.setiyawan@gmail.com¹⁾

ABSTRAK

Penggantian jenis bahan bakar dari suatu boiler akan merubah desain burner dan juga berdampak pada kinerja boiler. Perubahan bahan bakar dari minyak bakar ke gas alam pada boiler unit 1 PLTU U.P. Gresik membawa konsekuensi penggantian sistem pembakaran dengan burner jenis Radially Stratified Flame Core (RSFC). Penggantian bahan bakar ini menyebabkan de-rating sekitar 15% dari kapasitas boiler. Penelitian berupa simulasi pengaruh sudut swirl vane terhadap kinerja burner RSFC yang berbasis pada computational fluid dynamics (CFD) dengan menggunakan software ANSYS Fluent 14. RSFC burner beroperasi untuk membakar bahan bakar dengan sistem non-premixed, dimana terdapat tiga swirl combustion air yang menyelimuti bahan bakar. Untuk mengoptimasi turbulensi pembakaran, dapat dilakukan pengaturan sudut swirl vanes pada primary dan tertiary combustion air. Data-data yang digunakan untuk simulasi merujuk pada data operasi kapasitas pembangkit sebesar 85 MWe. Luaran dari penelitian ini adalah karakteristik pembakaran yang berupa, temperatur boiler, emisi NO_x, fraksi massa methane (CH₄) dan oxygen (O₂) pada sisi furnace outlet. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaturan sudut swirl vanes 25% untuk tertiary combustion air pada keseluruhan burner, menghasilkan karakteristik pembakaran yang lebih optimum dibandingkan pengaturan sudut 37.5% dan 50%, dengan hasil temperatur pembakaran rata-rata sebesar 1456.30 °C, sisa CH₄ 0.52%, sisa O₂ 2.41%, pembentukan carbon dioxide (CO₂) 12.75%, dan pembentukan emisi total NO_x 456.76 dry-ppm.

Kata kunci: boiler furnace, burner, combustion air, natural gas, non-premixed, sudut swirl vane.

1. PENDAHULUAN

PLTU 1-2 Unit Pembangkitan (UP.) Gresik pada awalnya – tahun 1981- dioperasikan dengan bahan bakar minyak bakar. Seiring dengan semakin mahalnya bahan bakar minyak dan meningkatnya produksi gas alam (*natural gas*) dengan harga yang lebih murah, maka PLTU 1-2 UP. Gresik dikonversikan ke bahan bakar gas (gas alam) dengan mengganti burner jenis *Radially Stratified Flame Core (RSFC)*^[1]. Namun, selama masa operasional menggunakan gas alam, PLTU unit 1 mengalami *de-rating* sekitar 15%, sehingga hanya dapat menghasilkan daya 85 MWe dari kapasitas daya maksimum 100 MWe^[2]. Salah satu masalah terkait dengan *de-rating* tersebut adalah proses pembakaran didalam burner, dimana kemungkinan pembakaran belum dalam kondisi terbaik/optimum. Untuk mengoptimalkan proses pembakaran, dapat dilakukan dengan mengatur turbulensi udara pembakaran dengan mengatur sudut *swirl vanes* dari RSFC burner. Proses pencampuran udara-bahan bakar dapat dilakukan dengan pengaturan tingkat turbulensi yang berbeda dengan melakukan perubahan sudut *swirl* pada *primary* dan *tertiary combustion air*.

Studi simulasi dengan Computational Fluid Dynamic (CFD) cukup baik untuk dapat memprediksi fenomena dan karakteristik pembakaran di dalam suatu burner. Simulasi numerik dapat dilakukan dengan cara memvariasikan parameter yang tersedia pada burner seperti pada kondisi operasional burner yang sesungguhnya. Pemodelan ini akan lebih murah dan aman bagi pembangkit dari kemungkinan kerusakan tetapi dapat memberikan hasil yang baik. CFD telah digunakan sebagai alat analisa dengan membuat simulasi numerik pada proses pembakaran di dalam boiler oleh beberapa peneliti yang antara lain sebagai berikut. Habib

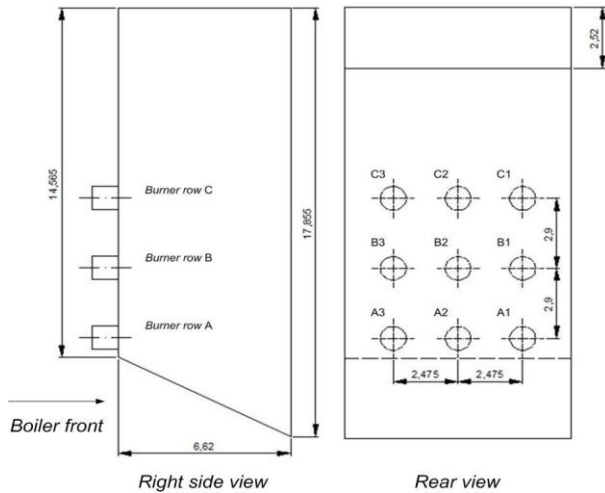
et.al [2008], membuat studi simulasi proses pembakaran pada boiler berkapasitas 160 MW berbahan bakar natural gas yang mempunyai dua burner yang tersusun segaris vertical dengan memvariasikan laju alir dan temperatur udara pembakaran serta sudut swirl udara pembakaran primer. Pada sudut swirl sekitar 45° memberikan hasil yang terbaik dengan konsentrasi NO_x terendah. Dai-fei *et.al.* [2009] mensimulasikan pembakaran dengan udara bertemperatur tinggi dalam proses kalisinasi suspensi gas dari aluminium hydroxide.

Studi numerik terhadap karakteristik pembakaran pada burner *Radially Stratified Flame Core (RSFC)* dilakukan dengan memvariasikan sudut swirl primary dan tertiary air masing-masing sebesar 25%, 37.5% dan 50%. Karakteristik pembakaran yang diperoleh dari CFD antara lain berupa, temperatur boiler, emisi NO_x, fraksi massa methane (CH₄) dan oxygen (O₂) pada sisi furnace outlet.

2. PEMODELAN BOILER FURNACE DAN BURNER

Boiler PLTU 1 jenis *water tube* dengan kapasitas uap super panas sebesar 300 T/h disimulasi pada daerah *furnace*, dengan sistem pembakaran *non-premixed* berbahan bakar *natural gas*, secara *three-dimensional* (3D). Tekanan dan temperatur *feedwater* di dalam *waterwall* yang terletak pada dinding *boiler furnace* masing-masing sebesar 105 kgf/cm² dan 310 °C dengan luas efektif pemanasan *waterwall* yakni 875 m². Boiler dilengkapi dengan sembilan burner yang memiliki konfigurasi arah *swirl counter clockwise* (CCW) untuk burner A1, A3, B2, C1, dan C3, sedangkan arah *swirl clockwise* (CW) untuk burner A2, B1, B3, dan C2. *Natural gas* disemprotkan ke dalam *furnace* melalui 16 *nozzle* berdiameter 10.4 mm yang terpasang pada setiap *fuel-gun*

burner. Cap fuel gun burner memiliki diameter luar 165 mm. Diameter luar untuk aliran *primary air* 360 mm, untuk *secondary air* 518 mm, dan *tertiary air* 862 mm. Swirl vanes pada *secondary air* merupakan *fixed vanes* sehingga tidak dapat dilakukan perubahan sudut. Untuk geometri boiler furnace dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Geometri boiler furnace (satuan : meter)

3. MODEL DAN METODE PENYELESAIAN

Studi simulasi dilakukan dengan menggunakan software CFD, yaitu GAMBIT 2.4.6 dan ANSYS Fluent 14^[3,4], dengan tahapan sebagai berikut:.

Metode Penyelesaian

Beberapa model persamaan matematis yang digunakan dalam simulasi diantaranya:

- *Turbulence model*

Dalam penyelesaian persamaan konservasi massa, momentum, dan energi, serta mendukung akurasi akibat pengaruh *swirl* terhadap proses pembakaran, digunakan model turbulensi *k-ε renormalization group* (RNG)^[5].

- *Combustion model*

Pada penelitian ini, bahan bakar *natural gas* dan udara pembakaran memasuki *furnace* pada aliran yang berbeda sehingga tidak terjadi *mixing* sebelum terjadinya proses pembakaran. Oleh karena itu, digunakan model pembakaran *non-premixed*^[6].

- *Radiation model*

Untuk memperoleh hasil simulasi dengan adanya pengaruh radiasi dari pembakaran, digunakan model radiasi P-1^[6], karena model radiasi P-1 memberikan hasil yang cukup baik dari proses pembakaran.

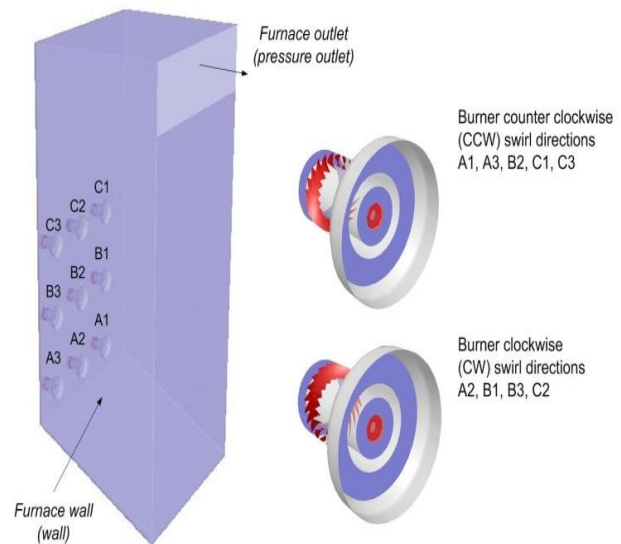
- *NOx pollutant model*

Terdapat tiga mekanisme pembentukan NOx, diantaranya *thermal*, *prompt*, dan *fuel* NOx. Karena hasil analisis *natural gas* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kandungan *nitrogen* (N₂) cukup rendah, model polutan NOx yang dipilih hanya mekanisme *thermal* dan *prompt*^[5,6].

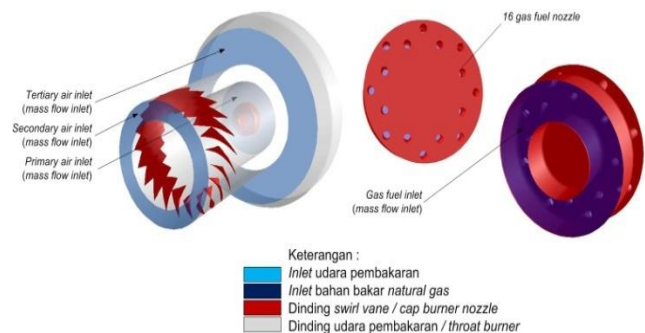
Boundary Conditions dan Solutions

Tahapan pembuatan *domain* dari boiler furnace dan burner di dalamnya menggunakan software GAMBIT 2.4.6 meliputi pembuatan geometri, penentuan *boundary*

conditions, serta melakukan *meshing* pada *domain* yang telah dibuat. Penentuan *boundary conditions* dan hasil pembuatan *domain* dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Dari hasil *meshing*, *domain* memiliki jumlah *nodes* sebanyak 1853917 buah, dengan pemilihan *mesh* jenis *hexahedron* pada sebagian besar *domain*, serta *mesh* jenis *polyhedron* pada *domain* dari burner throat.



Gambar 2. Domain pemodelan boiler furnace dan burner



Gambar 3. Penentuan *boundary conditions* pada inlet burner

Persamaan untuk konservasi massa, momentum, energi, serta besaran skalar lainnya seperti turbulensi dan reaksi kimia, diselesaikan berdasarkan *least square cell based*. Penyelesaian tekanan dan kecepatan menggunakan *semi-implicit method for pressure-linked equations consistent* (SIMPLEC). Pada studi ini, kriteria konvergensi di bawah 10⁻⁵ untuk *residual error* parameter *continuity*, P-1, dan *pollutant* NO. Pengaturan arah *inlet* akibat sudut *swirl* menggunakan *local cylindrical*, dengan nilai yang dapat dilihat pada Tabel 1. *Swirl* untuk *primary air* ditentukan sebesar 50%, yang berlaku untuk keseluruhan variasi *tertiary air swirl*. Dan nilai *input* pada *boundary conditions* untuk tiap burner dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Komponen *Swirl* pada Koordinat *Local Cylindrical*

Swirl	Low (25%)	Medium (37.5%)	High (50%)
Axial component	0.9239	0.8315	0.7071
Tangential component	0.3827	0.5556	0.7071
Arah CW (-) dan Arah CCW (+)			

Tabel 2. Nilai *Input* pada tiap *Boundary Conditions*

Boundary Conditions	Variable		Unit	Value
Load			MWe	85
Gas inlet @ burner	Pressure		Pa g	168674
	Temperature		K	292
	Mass flow rate		kg/s	0.4487
Air inlet @ burner	Pressure		Pa g	5499
	Temperature		K	483
	Mass flow rate	Primary	kg/s	1.5675
		Secondary	kg/s	1.0276
		Tertiary	kg/s	4.8728
Furnace outlet	Pressure		Pa g	4397
	Temperature		K	1700
Furnace Wall	Heat flux		W/m ²	-123313
	Thickness		m	0.004

4. HASIL DAN DISKUSI

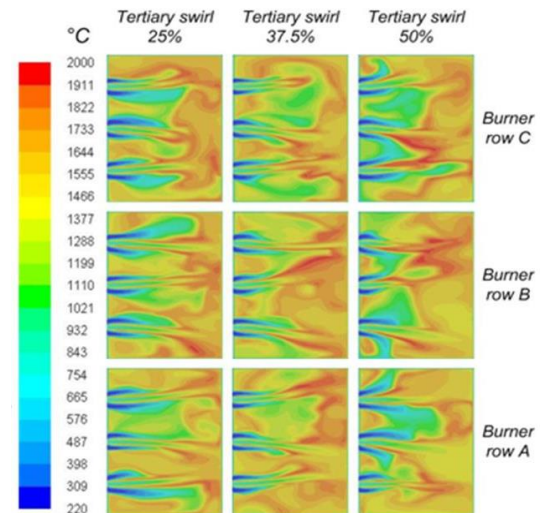
Validasi keakuratan hasil proses simulasi, dilakukan dengan membandingkan data aktual pengoperasian boiler PLTU unit 1, PT. PJB UP Gresik pada beban 85 MWe. Proses validasi ditinjau pada nilai *furnace draft* yang terukur oleh *measuring tap* di dalam boiler furnace. Data aktual diambil dari hasil *performance test* pada bulan April 2013. Validasi hasil simulasi terhadap data aktual dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan Tabel 3, hasil simulasi dari masing-masing variasi *tertiary swirl* memiliki *error* sekitar 1% terhadap data aktual, sehingga hasil simulasi dapat dikatakan cukup baik terhadap kondisi aktual pembakaran *natural gas* yang terjadi di dalam Boiler PLTU unit 1, PT PJB U.P. Gresik.

Tabel 3. Perbandingan Data Aktual dan Hasil Simulasi

Variable	Unit	Act	Tertiary Swirl 25%	Tertiary Swirl 37.5%	Tertiary Swirl 50%
Furnace draft	P _g	4397	4449.46	4448.58	4444.35
Error	%		1.1931	1.1592	1.0643

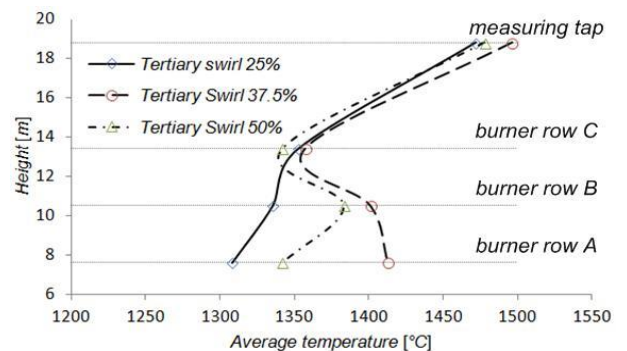
Analisa Distribusi Temperatur Gas buang

Hasil simulasi numerik dari temperatur pembakaran dapat dilihat pada Gambar 4, dimana pengaturan *swirl* 25% untuk *tertiary combustion air* cenderung menghasilkan *flame* yang lebih panjang karena udara pembakaran kurang mampu untuk mengolok aliran *natural gas* sehingga *flame* berpotensi dapat mengenai *rear wall*. Pengaturan *swirl* 37.5% cukup memberikan pengaruh olakan aliran yang lebih baik namun yang perlu diperhatikan adalah *flame* dari burner B1 yang mengarah pada *side wall* serta *flame* dari burner A2 dan C2 yang masih berpotensi mengenai *rear wall*. Dan pada pengaturan *swirl* 50% lebih memberikan pengaruh olakan paling besar sehingga lebih mampu untuk membelokkan arah *flame*. Namun perlu diperhatikan juga bahwa *flame* dari burner B1, C2, dan C3 masih berpotensi mengenai *rear wall*. Prediksi *flame* yang mengenai *rear wall* ini akan sangat penting di dalam proses operasi dan perawatan yang mana bisa menimbulkan *over-heating* pada boiler tube side yang bisa menimbulkan keretakan sampai kebocoran.



Gambar 4. Kontur distribusi temperature tiap elevasi burner hasil simulasi numerik

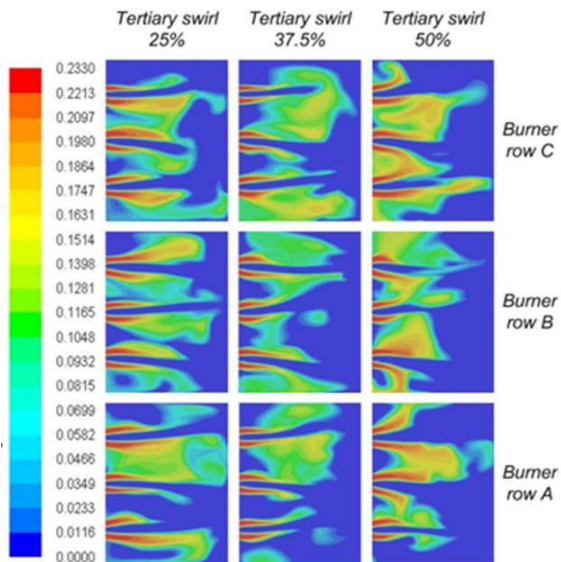
Data kuantitatif temperatur pembakaran pada tiap elevasi dapat dilihat pada Gambar 5. Dari Gambar 5 tersebut diketahui bahwa variasi persentase sudut *swirl vanes* untuk udara pembakaran tersier lebih berpengaruh signifikan terhadap temperatur rata-rata pada elevasi burner row A dan B, namun kurang berpengaruh signifikan terhadap temperatur rata-rata pada elevasi burner row C dan *measuring tap*. Pada elevasi burner row A dan B, temperatur rata-rata tertinggi sekitar 1415 °C terjadi pada pengaturan *swirl* 37.5%, sedangkan pada elevasi burner row C, pengaturan *swirl* 25% dan 37.5% menghasilkan temperatur rata-rata tertinggi yang hampir sama, yakni sekitar 1360 °C. Dan pada elevasi *measuring tap* menuju *furnace outlet*, temperatur rata-rata tertinggi sekitar 1500 °C terjadi pada pengaturan *swirl* 37.5%.



Gambar 5. Nilai temperatur rata-rata tiap elevasi burner

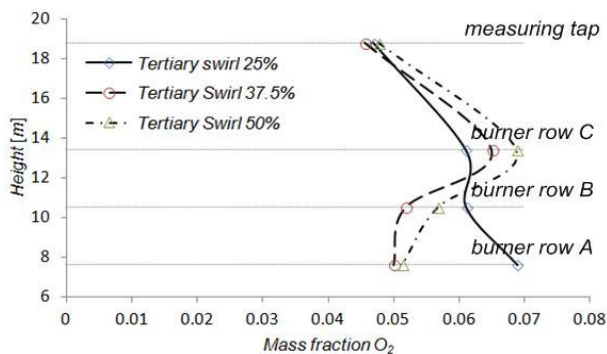
Analisa Fraksi Massa O₂

Hasil simulasi numerik dari pengaruh variasi sudut *swirl vanes* untuk *tertiary combustion air* terhadap O₂ lebih (excess O₂) selama proses pembakaran dapat dilihat pada Gambar 6. Pada elevasi burner row A, terlihat bahwa dengan pengaturan *tertiary air swirl* 37.5% dan 50% dominasi sisa fraksi massa O₂ lebih sedikit daripada pengaturan *tertiary swirl air* 25%. Sedangkan pada elevasi burner row B, pengaturan *tertiary air swirl* 37.5% menghasilkan sisa fraksi massa O₂ paling rendah. Dan sisa fraksi massa O₂ paling rendah pada elevasi burner row C, terjadi dengan pengaturan *tertiary air swirl* 25%.



Gambar 6. Kontur fraksi massa O_2 tiap elevasi burner

Untuk mengetahui sisa fraksi massa O_2 dari daerah tengah *furnace* menuju *furnace outlet* secara kuantitatif dapat diamati pada Gambar 7, dimana dapat diketahui bahwa dengan pengaturan *tertiary air swirl* 37.5% dan 50% pada elevasi *burner row A* menghasilkan sisa fraksi massa O_2 terendah sekitar 0.05. Sedangkan pada elevasi *burner row B* sisa fraksi massa O_2 terendah sebesar 0.052 terjadi dengan pengaturan *tertiary air swirl* 37.5%. Dan pada elevasi *burner row C*, sisa fraksi massa O_2 terendah sekitar 0.061 terjadi dengan pengaturan *tertiary air swirl* 25%. Namun, pada daerah *measuring tap*, keseluruhan pengaturan sudut *swirl vanes* untuk *tertiary combustion air* menghasilkan akumulasi sisa fraksi massa yang hampir sama sekitar 0.05.

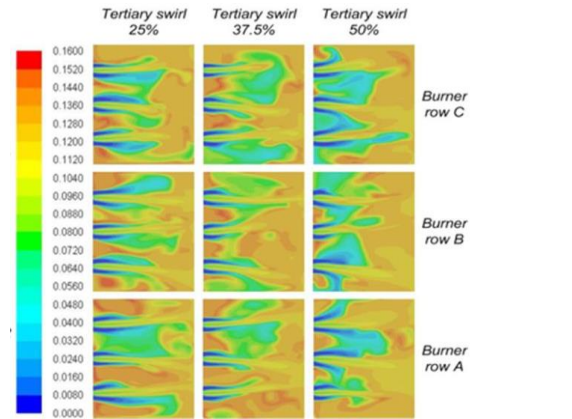


Gambar 7. Nilai sisa fraksi massa O_2 rata-rata tiap elevasi

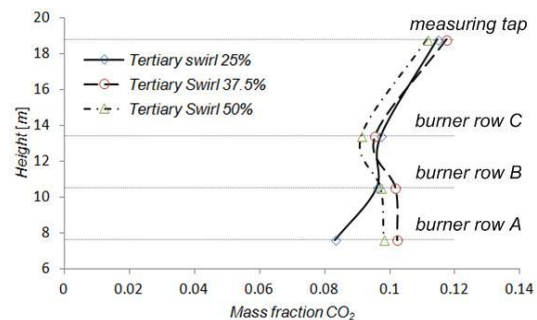
Analisa Fraksi Massa CO_2

Hasil simulasi numerik dari pengaruh variasi sudut *swirl vanes* untuk *tertiary combustion air* terhadap pembentukan massa CO_2 selama proses pembakaran dapat dilihat pada Gambar 8.

CO_2 merupakan komponen utama hasil proses pembakaran, serta keberadaan dan konsentrasi CO_2 didalam gas buang memberikan indikasi tingkat kesempurnaan proses pembakaran. Sehingga dengan konsentrasi CO_2 di dalam gas buang yang lebih tinggi menunjukkan bahwa terjadi proses pembakaran yang lebih sempurna. Selain itu, dapat ditunjukkan bahwa dengan variasi pengaturan sudut *swirl* sebesar 37.5% dan 50% memberikan hasil kontur fraksi massa CO_2 yang hampir sama.



Gambar 8. Kontur sisa fraksi massa CO_2 tiap elevasi burner

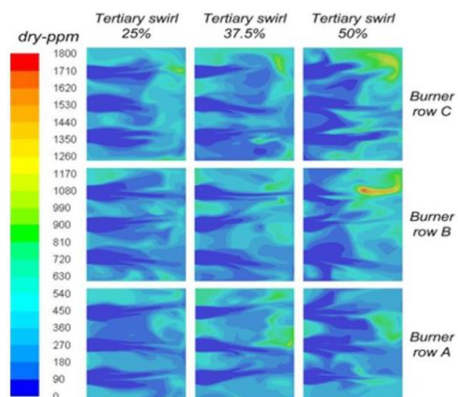


Gambar 9. Hasil simulasi numerik fraksi massa CO_2 rata-rata tiap elevasi

Untuk mengetahui pembentukan massa CO_2 dari daerah tengah *furnace* menuju *furnace outlet* secara kuantitatif dapat diamati pada Gambar 9, dimana pembentukan CO_2 yang lebih besar pada elevasi *burner row A* dan *B* terjadi dengan pengaturan *tertiary air swirl* 37.5%, sedangkan pada elevasi *burner row C* pembentukan CO_2 sedikit lebih besar dengan pengaturan *tertiary air swirl* 25%. Dan pada daerah *measuring tap*, akumulasi CO_2 yang terbentuk hampir memiliki fraksi massa yang sama besar untuk keseluruhan variasi pengaturan *tertiary air swirl*, yakni pada nilai fraksi massa sekitar 0.11.

Analisa Emisi NO_x

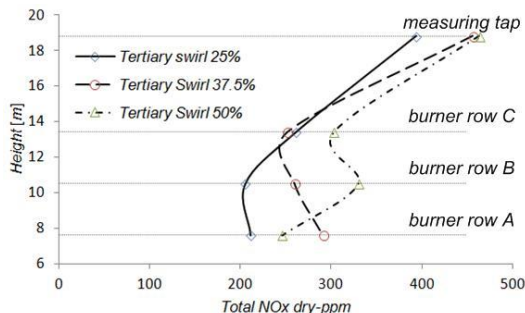
Hasil simulasi numerik dari pengaruh variasi sudut *swirl vanes* untuk *tertiary combustion air* terhadap fraksi NO_x selama proses pembakaran dapat diamati pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil simulasi kontur emisi NO_x pada tiap elevasi burner

Pembentukan emisi NO_x mencapai nilai yang tertinggi pada daerah sekitar pembakaran pada tiap elevasi *burner* menuju *furnace outlet* seperti ditunjukkan pada Gambar 10, dengan adanya kontur warna hijau muda sampai merah tua pada rentang 1170-1800 dry-ppm. Pembentukan emisi NO_x yang lebih tinggi dapat terjadi karena tercapainya temperatur pembakaran yang tinggi karena kurangnya proses pendinginan oleh udara pembakaran dan tersedianya O₂ lebih di dalam gas buang.

Dari pembahasan mengenai distribusi temperatur, telah diketahui bahwa pada pengaturan *tertiary air swirl* 50% menghasilkan temperatur maksimum pembakaran yang lebih tinggi, sehingga pembentukan emisi NO_x juga berpotensi lebih tinggi. Hal tersebut dapat diamati dari kontur warna kuning sampai merah tua yang menunjukkan nilai sekitar 1170 – 1800 dry-ppm, sedangkan pada pengaturan *tertiary air swirl* 37.5% menghasilkan emisi NO_x yang lebih rendah pada nilai sekitar 720 – 1080 dry-ppm dengan kontur warna hijau pupus sampai kuning tua. Dan pembentukan emisi NO_x terendah pada pengaturan *tertiary air swirl* 25%, yang hanya ditunjukkan dominasi warna biru muda dan hijau pupus pada nilai 360 – 630 dry-ppm.



Gambar 11. Nilai emisi NO_x rata-rata tiap elevasi

Untuk mengetahui pembentukan emisi NO_x secara kuantitatif mulai dari daerah pembakaran pada tiap elevasi *burner* menuju *furnace outlet* dapat diamati pada Gambar 11. Pada elevasi *burner row A* dan *B*, pembentukan emisi *total NOx* terendah sekitar 210 dry-ppm pada pengaturan *tertiary air swirl* 25%, dimana dengan adanya *swirl* yang lebih rendah dapat memberikan pendinginan yang lebih merata pada proses pembakaran. Sedangkan pada elevasi *burner row C*, pengaturan *tertiary air swirl* 25% dan 37.5% memberikan pengaruh pendinginan yang hampir sama. Sedangkan pada daerah menuju *furnace outlet*, pengaturan *tertiary air swirl* 37.5% dan 50% mengakibatkan pembentukan NO_x yang lebih tinggi sekitar 450 dry-ppm, dibandingkan pada pengaturan *tertiary air swirl* 25% yang menghasilkan emisi NO_x sekitar 400 dry-ppm. Pada elevasi *burner row B* dan *C*, serta *measuring tap*, pengaturan *tertiary air swirl* 50% rata-rata menghasilkan emisi *total NOx* tertinggi dibandingkan pengaturan *tertiary air swirl* 25% dan 37.5%. Dengan adanya *swirl* yang lebih besar, pendinginan oleh udara pembakaran kurang merata hingga ujung *flame* sehingga pembentukan emisi *total NOx* lebih tinggi pada daerah ujung *flame*.

Optimasi Pembakaran pada Furnace Outlet

Untuk mengetahui proses pembakaran terbaik yang terjadi, maka dapat ditinjau komponen sisa *unburnt fuel* dan sisa oksidan yang tidak terbakar, serta akumulasi pembentukan CO₂ dan emisi NO_x pada sisi *furnace outlet*. Dari Tabel 4, dapat diketahui bahwa dengan memperbesar sudut *tertiary*

air swirl pada keseluruhan *burner*, akan menurunkan kualitas pembakaran yang terjadi. Hal tersebut dapat diamati bahwa pada pengaturan *tertiary air swirl* 50%, sisa CH₄ dan O₂, serta emisi *total NOx* pada *furnace outlet* semakin besar, sedangkan pembentukan CO₂ menurun, dibandingkan pada pengaturan *tertiary air swirl* 37.5 % dan 25%. Pembakaran yang terbaik terjadi dengan pengaturan sudut *tertiary air swirl* sebesar 25% pada keseluruhan *burner*, dengan menghasilkan sisa CH₄, sisa O₂ dan pembentukan emisi *total NOx* terendah masing-masing sebesar 0.52%, 2.41%, 456.76 dry-ppm, serta dengan pembentukan CO₂ tertinggi sebesar 12.75%.

Tabel 4. Optimasi Pembakaran pada *Furnace Outlet*

<i>Tertiary air swirl</i> [%]	CH ₄ [%]	O ₂ [%]	CO ₂ [%]	<i>Total NOx</i> [dry-ppm]
25	0.5197	2.4111	12.745	456.7644
37.5	0.5434	2.575	12.6201	475.6702
50	1.0045	3.5034	11.8196	511.031

5. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

Dari hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa dengan memperbesar persentase sudut *swirl vanes* untuk *tertiary combustion air* pada keseluruhan *burner*, dapat menurunkan kesempurnaan pembakaran *natural gas* di dalam boiler. Pembakaran *natural gas* yang terbaik terjadi pada pengaturan sudut *swirl tertiary combustion air* sebesar 25% dimana hasil pada sisi *furnace outlet* terdapat sisa CH₄, dan O₂ masing-masing sebesar 0.52% dan 2.41%, serta pembentukan CO₂ dan emisi NO_x masing-masing sebesar 12.75%, dan 456.75 dry-ppm.

Rekomendasi

Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka direkomendasikan untuk melanjutkan simulasi numerik dengan memvariasikan kombinasi sudut *swirl* terhadap *tertiary combustion air* untuk mendapatkan pembakaran yang lebih sempurna, panjang *flame* yang lebih menjauh dari rear wall dan emisi yang lebih rendah.

Penghargaan

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pimpinan, teknisi dan staff PT PJB, U.P. Gresik atas dukungannya untuk melakukan studi ini dengan memberikan data-data yang diperlukan dan parner dalam diskusi.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ABB C-E Instruction Manual Indonesia Naval Base Complex PLN Gresik units 1 and 2, ABB C-E Services Inc., Ujung, Surabaya, Indonesia, Windsor, Connecticut, USA; 1997.
- [2] Project Completion Report on the Project for Rehabilitation of Gresik Steam Power Plant units 1 and 2 The Republic of Indonesia, Tokyo Electric Power Services Co. Ltd., Tokyo, Japan; 2001.
- [3] ANSYS FLUENT 14 Theory Guide, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA; 2011.
- [4] ANSYS FLUENT 14 User's Guide, ANSYS Inc.,



Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsbrug, PA
15317, USA; 2011.

- [5] Habib MA, Elshafei M, Dajani M. *Influence of Combustion Parameters on NO_x Production in an Industrial Boiler*. J Computers & Fluids 2008; 37 : 12-23.
- [6] Dai-fei L, Feng-qi D, Hong-liang Z, Wen-bo Z. *Numerical Simulation of High Temperature Air Combustion in Aluminum Hydroxide Gas Suspension Calcinations*. J Trans. Nonferrous Met. Soc. China 2009; 19 : 259-266.

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN
BODI PENGANGGU TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN PADA TIGA SILINDER
SIRKULAR YANG TERSUSUN STAGGER PADA JARAK
ANTAR SILINDER $L/D = 2$ dan $T/D = 1,5, 2$ dan 3
“Studi kasus untuk $BP 30^\circ$ dan tanpa BP pada $Re = 2.2 \times 10^4$ ”**

Bantacut¹⁾, Wawan Aries Widodo²⁾

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember^{1,2)}

Kampus ITS- Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111^{1,2)}

Hp. 0853 7134 2999¹⁾, 0856 302 1971²⁾

email: urbansta@yahoo.com¹⁾, wawanaries@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Perkembangan penelitian untuk mengetahui karakteristik aliran fluida yang melintasi suatu bluff body telah banyak dilakukan dan terus dikembangkan sampai saat ini. Salah satunya adalah aliran yang melintasi tiga silinder sirkular yang tersusun stagger, dan sering di aplikasikan pada berbagai bidang industri seperti konstruksi pipa penyangga lepas pantai, jaringan pipa bawah laut dan shell dan tube heat exchanger. Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan adanya gaya hambat yang timbul pada aliran tersebut, sehingga penelitian kembali dilakukan secara eksperimen untuk mengurangi gaya hambat pada tiga silinder sirkular didalam susunan stagger dengan menempatkan bodi pengganggu didepan silinder upstream pada sudut 30° dengan jarak transversal antar silinder $(T/D) = 1,5, 2$ dan 3 serta jarak longitudinal (L/D) konstan. Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen pada subsonic open circuit wind tunnel dengan blockage ratio 24 % yang diuji pada bilangan Reynolds berbasis diameter silinder sirkular $Re = 2.2 \times 10^4$. Variasi dalam penelitian ini adalah, rasio jarak transversal $(T/D) = 1,5, 2$ dan 3 dan rasio jarak longitudinal $(L/D) = 2$ dengan diameter silinder sirkular $(D = 25 \text{ mm})$ serta bodi pengganggu berbentuk silinder sirkular berdiameter $(d = 4 \text{ mm})$ yang ditempatkan pada sisi upper dan lower dari silinder 1 (upstream) pada posisi 30° . Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jarak (T/D) sangat mempengaruhi distribusi koefisien tekanan disekitar tiga silinder sirkular tersusun stagger, sehingga menyebabkan terjadinya perbedaan distribusi koefisien drag pressure (C_{DP}) dan juga profil kecepatan di belakang susunan silinder. Dan penambahan bodi pengganggu didepan silinder 1 (upstream) pada sudut 30° dapat mereduksi koefisien pressure drag (C_{DP}) sebesar 55% untuk silinder 1 (upstream), akan tetapi untuk silinder 2 (downstream atas) dan silinder 3 (downstream bawah) distribusi koefisien pressure drag (C_{DP}) nya meningkat, hal ini berlaku untuk semua variasi jarak transversal (T/D) .

Kata kunci: bluff body, subsonic open circuit wind tunnel, blockage rasio, jarak longitudinal, jarak transversal.

1. PENDAHULUAN

Salah satu bentuk geometri body yang paling banyak digunakan dalam aplikasi engineering adalah silinder sirkular. Berbagai aplikasi dari silinder sirkular dengan berbagai macam susunan seperti tandem, in-line, staggered, maupun square arrays telah banyak digunakan dibidang engineering seperti konstruksi jembatan rangka baja, jaringan pipa bawah laut, penukar kalor shell-and tube atau tube bank, bejana bertekanan, kabel listrik bertegangan tinggi, pendinginan komponen electronic (electronic cooling), cerobong asap, tiang listrik dan jaringan pipa bawah laut.

Penelitian untuk mereduksi gaya hambat telah dilakukan oleh Annisa [1], yang meneliti aliran yang melintasi dua silinder sirkular tersusun secara tandem dengan menambahkan bodi pengganggu didepan silinder upstream. Yang diuji pada terowongan angin jenis subsonic open circuit wind tunnel dengan $Re_{Dh} 1,56 \times 10^5$ dan ukuran diameter silinder sirkular $D = 24 \text{ mm}$ serta diameter inlet disturbance body $d = 4 \text{ mm}$. Jarak antar silinder $1,5 \leq L/D \leq 4$ dan variasi sudut pengganggu diletakkan pada sudut $\alpha = 30^\circ$ dan 60° . Ukuran wind tunnel digunakan adalah $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dapat mereduksi gaya drag silinder upstream secara optimal, namun gaya drag silinder downstream lebih tinggi daripada gaya drag silinder downstream pada konfigurasi tandem tanpa bodi

pengganggu. Hal sebaliknya ditunjukkan pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 60° , silinder upstream memiliki gaya drag yang lebih tinggi daripada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu sedangkan silinder downstream memiliki gaya drag yang lebih rendah. Hasil penelitian Annisa [5] juga sesuai dengan Alam, dkk [2], Lee, dkk [3], Tsutsui & Igarashi [4], dan Zhang, dkk [5],

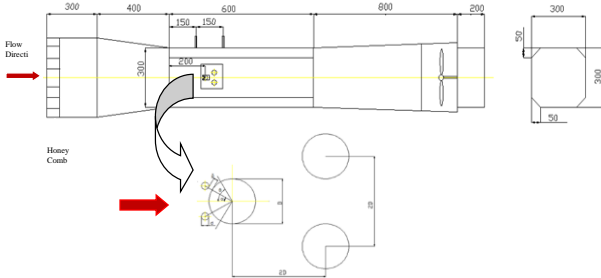
Gu & Sun [6], telah melakukan penelitian secara eksperimen pada tiga silinder sirkular dalam susunan segitiga sama sisi, Konfigurasi ini sangat mirip dengan penelitian yang juga dilakukan oleh Tatsuno, dkk [7], secara eksperimental, dengan susunan segitiga sama sisi juga yang di uji pada terowongan angin (wind tunnel) sistem tertutup dengan $Re = 5,5 \times 10^4$ dan variasi sudut yang berbeda dimulai dari sudut $\beta = 0^\circ$, sampai dengan 60° . Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah $N/d = 1,7, 2,2, 2,5$ dan $4,0$ dan ukuran silinder sirkular yang digunakan adalah panjang 640 mm , diameternya 48 mm terbuat dari silinder aluminium. Pressure tap dipasang setiap 10° pada mid-span secara melingkar pada silinder sirkular. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa variasi rasio jarak N/d dan sudut yang berbeda-beda sangat mempengaruhi pada pola aliran, distribusi tekanan dan koefisien drag yang terjadi pada ketiga silinder sirkular tersebut.

Berdasarkan hasil kajian diatas timbullah gagasan baru untuk melakukan penelitian kembali mengenai usaha untuk mereduksi gaya hambat (drag) pada tiga silinder sirkular

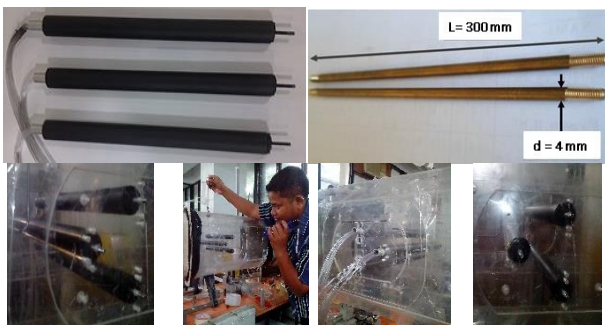
dengan menempatkan *bodi pengganggu* berbentuk silinder pada posisi *upper* dan *lower* di depan silinder 1 (*upstream*).

2. METODE PENELITIAN

Skema dari penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini. Yang ditunjukkan dengan letak benda uji adalah tiga silinder sirkular tersusun stagger dengan *bodi pengganggu* di bagian depan silinder utama.



Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah tiga silinder sirkular yang terbuat dari pipa PVC dengan ukuran panjang $L=300$ mm dan diameter $D=25$ mm serta *bodi pengganggu* terbuat dari bahan kuningan dengan permukaan polos berdiameter $d=4$ mm yang ditempatkan pada saluran sempit berpenampang bujur sangkar ($H=300$ mm, $W=300$ mm dan $L=600$ mm). *Blockage rasionya* adalah 24%. Posisi silinder 1 (*upstream*) ditempatkan pada jarak 200 mm dari *inlet test section* atau berjarak 50 mm dari *pitot static tube*, silinder *downstream* atas dan bawah berjarak 2D dari silinder *upstream* dan posisi *pitot static tube* dibelakang susunan silinder berjarak 4D. *Bodi pengganggu* ditempatkan pada sudut 30° pada jarak gap konstan antara silinder dengan *bodi pengganggu* ($\delta=0.4$ mm). pengujian ini dilakukan pada bilang *Reynolds* berbasis diameter silinder yaitu 2.2×10^4 . Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan *pitot static tube* yang ditempatkan di depan susunan silinder dan dihubungkan ke *pressure transducer* Omega PX655 selanjutnya dihubungkan ke data akuisisi Omega DAQPRO-5300 untuk pembacaan secara digital berupa arus dalam rentang 4mA-20mA, data tekanan dari hasil pembacaan *pressure transducer* diatas selanjutnya diolah secara komputasi untuk mendapatkan nilai *Re* yang diinginkan.



Gambar 2. posisi silinder sirkular dengan bodi pengganggu didalam saluran test section

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui bagaimana karakteristik aliran yang melintasi tiga silinder sirkular tersusun stagger dengan dua *bodi pengganggu* pada sisi *upstream* silinder dan susunan silinder tanpa *bodi pengganggu*, akan dibahas secara

eksperimental melalui data kuantitatif yang didapatkan dari hasil eksperimen. Data kuantitatif berupa koefisien tekanan (C_p), profil kecepatan (U/U_{maks}), dan koefisien drag pressure (C_{dp}). Untuk mendapatkan nilai koefisien distribusi tekanan (C_p) pada permukaan silinder sirkular, diperoleh melalui persamaan:

$$C_P = \frac{(P_C - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

dimana: P_C adalah tekanan kontur pada silinder sirkular, P_∞

tekanan statis pada free-stream, dan $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ adalah tekanan dinamik pada free-stream. Sedangkan untuk mendapatkan nilai koefisien drag pressure (C_{dp}) diperoleh dengan mengintegrasikan koefisien tekanan (C_p) kontur permukaan silinder.

$$C_{Dp} = \frac{1}{2} \int_a^b C_p(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (2)$$

Dimana $C_p(\theta)$ adalah koefisien tekanan kontur pada posisi θ , dan θ adalah sudut posisi masing-masing pressure tap pada kontur

Integrasi yang digunakan untuk mendapatkan koefisien pressure drag adalah integrasi numerik metode Simpson 1/3. Persamaan umumnya adalah sebagai berikut:

$$\frac{1}{2} \int_a^b y(x) dx = \frac{b-a}{2 \times 3n} \{y_0 + 2(y_2 + \dots + y_{n-2}) + 4(y_1 + \dots + y_{n-1}) + y_n\} \quad (3)$$

Sehingga,

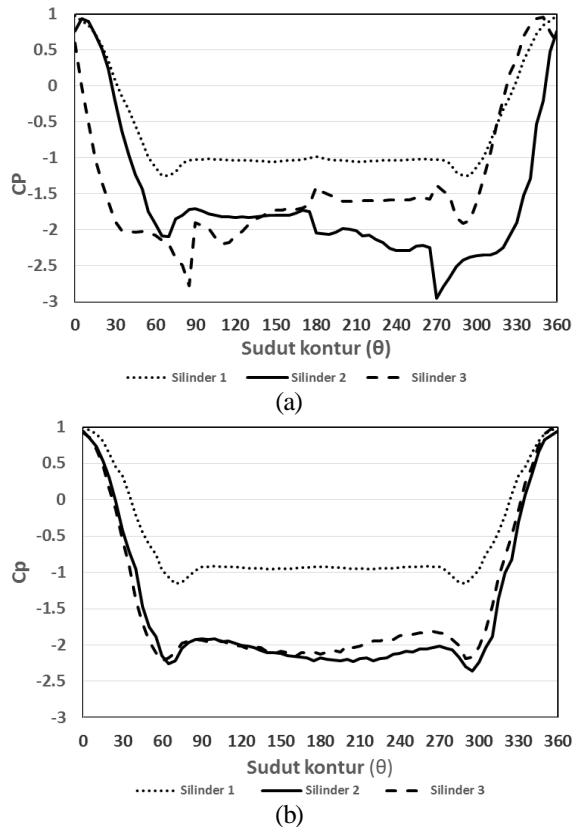
$$C_{Dp} = \frac{b-a}{2 \times 3n} \{y_0 + 2(y_2 + \dots + y_{n-2}) + 4(y_1 + \dots + y_{n-1}) + y_n\} \quad (4)$$

Analisa Distribusi Koefisien Tekanan pada Tiga Silinder Sirkular Konfigurasi Stagger tanpa *bodi pengganggu* pada jarak Transversal T/D 1,5 dan 3

Distribusi koefisien tekanan pada permukaan silinder 1 (*Upstream*), silinder 2 (*Downstream atas*) dan silinder 3 (*Downstream bawah*) seperti pada (Gambar 3) menunjukkan tren grafik yang sangat berbeda untuk variasi jarak transversal T/D 1,5, sedangkan untuk jarak $T/D=3$, C_p cenderung lebih stabil. Untuk silinder 1 titik stagnasinya tepat berada pada sudut 0° . Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik distribusi koefisien tekanan secara ekstrim hingga aliran memiliki kecepatan maksimum yang ditandai dengan menurunnya distribusi koefisien tekanan pada posisi paling rendah -1.252. Pada posisi *upper side*, aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar $65^\circ-70^\circ$, sedangkan pada posisi *lower side*, aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut $290^\circ-295^\circ$. Kemudian aliran mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure* yang ditandai peningkatan tekanan. Pada satu titik, aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga terjadi separasi yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan mulai *steady* pada sudut 90° untuk *upper side* dan 270° untuk *lower side*. Perbedaan dari masing-masing variasi jarak terlihat pada *base pressure*. Nilai *base pressure* terendah pada jarak T/D 1,5 dan nilai tertinggi pada jarak T/D 3.

Distribusi koefisien tekanan pada kontur permukaan silinder 2 (*downstream atas*) dan silinder 3 (*downstream bawah*) terjadi perbedaan yang signifikan antara distribusi koefisien tekanan baik pada posisi *upper side* maupun pada posisi *lower side*. Hal ini disebabkan karena pengaruh efek *bistable* atau dikenal sebagai fenomena *based flow*. **Menurut**

Alam, dkk [2], pada jarak *bistable* distribusi tekanan ditandai dengan lebar wake yang berbeda antara silinder atas dengan silinder bawah. Seperti yang telah diketahui, wake di belakang silinder yang sempit (*narrow wake*) drag yang terjadi lebih besar jika dibandingkan dengan wake yang lebar (*wide wake*) pada silinder lainnya. sehingga terjadi perbedaan titik stagnasi pada kedua silinder tersebut, untuk silinder 2 titik stagnasi berada pada posisi sudut 5° dan silinder 3 titik stagnasi berada pada sudut 350° .



Gambar 3. Grafik distribusi koefisien tekanan (a) T/D 1,5; (b) T/D 3 pada konfigurasi stagger tanpa *bodi* pengganggu

Untuk konfigurasi stagger dengan jarak transversal T/D 3, Distribusi koefisien tekanan pada permukaan silinder 1 (*Upstream*), silinder 2 (*Downstream atas*) dan silinder 3 (*Downstream bawah*) (gambar 3) menunjukkan tren grafik yang hampir sama antara ketiga silinder sirkular tersebut. Distribusi koefisien tekanan yang terjadi pada silinder 1 cenderung menyerupai grafik distribusi tekanan single silinder. Yaitu titik stagnasinya tepat berada pada sudut 0° C_p nya adalah 1.

Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan secara signifikan yang menyebabkan turunnya nilai distribusi koefisien tekanan secara ekstrim sampai pada titik paling rendah. Pada posisi *upper side*, aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 70° - 75° , sedangkan pada posisi *lower side*, aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut 285° - 290° . Kemudian aliran mengalami perlambatan akibat adanya pengaruh *adverse pressure* yang ditandai dengan penurunan kecepatan. Pada satu titik, aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga terjadinya separasi yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan mulai *steady* pada sudut 90° untuk *upper side* dan sudut 270° untuk *lower side*.

Distribusi koefisien tekanan untuk silinder (*downstream*) yaitu silinder 2 dan silinder 3 (Gambar 3) menunjukkan tren

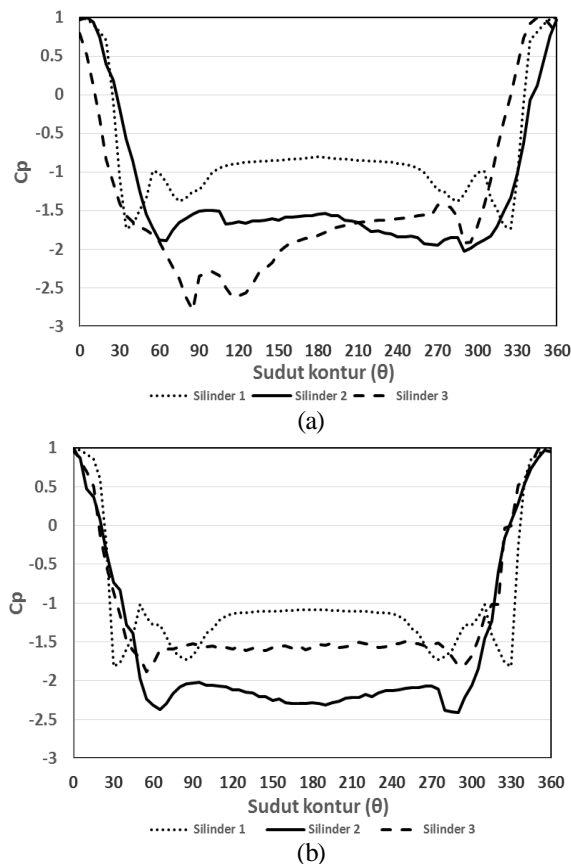
grafik yang hampir menyerupai untuk variasi T/D 3 titik stagnasi tepat berada pada sudut 0° . Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang menyebabkan menurunnya koefisien tekanan secara ekstrem sampai kecepatan maksimum pada *upper side* sekitar sudut 70° untuk silinder 2 dan 60° , sedangkan pada *lower side* kecepatan maksimum aliran terjadi pada sudut 290° baik untuk silinder 2 maupun untuk silinder 3. Kemudian aliran mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure* yang ditandai dengan meningkatnya koefisien tekanan yang menyebabkan aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan yang terjadi sehingga terjadi separasi yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan mulai *steady* pada sudut 75° untuk silinder 2 dan 70° untuk silinder 3 pada posisi *upper side* dan 270° baik untuk silinder 2 maupun untuk silinder 3. Dan pada posisi sudut 180° distribusi koefisien tekanan sedikit menurun karena pengaruh dari meningkatnya kecepatan.

Analisa Distribusi Koefisien Tekanan pada Tiga Silinder Sirkular Konfigurasi Stagger dengan *bodi* pengganggu 30° pada jarak Transversal T/D 1,5 dan 3

Pada bagian ini akan dijelaskan analisa distribusi tekanan pada tiga silinder sirkular tersusun stagger dengan penambahan *bodi* pengganggu didepan silinder 1 (*upstream*) pada posisi 30° pada jarak transversal T/D 1,5 dan 3 seperti yang diplot pada (gambar 4) dibawah ini. Titik stagnasi pada koefisien distribusi tekanan untuk silinder 1 (*upstream*) (gambar 4.3) tepat berada pada sudut 0° dan ini merupakan nilai C_p tertinggi yaitu 1, setelah titik stagnasi aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya C_p sampai pada sudut 35° *upper side* dan sudut 325° *lower side*, hal ini disebabkan karena aliran melalui daerah *favorable* yang berbentuk *diffuser* kemudian C_p nya kembali meningkat sampai pada sudut $\pm 55^\circ$ *upper side* dan sudut 305° *lower side* yang disebabkan oleh adanya penyempitan antara *bodi* Pengganggu dengan silinder sirkular 1 yang menimbulkan *blockage*, akibatnya momentum aliran turun. Kemudian kembali terjadi percepatan sampai pada sudut 75° *upper side* dan sudut 285° *lower side* yang disebabkan oleh momentum aliran yang terseparasi dan adanya pengaruh wake dari *bodi* pengganggu, yang menyebabkan *shear layer* yang terlepas kembali mengalami *re-attachment* pada permukaan silinder 1 yang ditandai dengan adanya *peak*. Kemudian aliran kembali mengikuti kontur permukaan silinder 1 yang ditandai penurunan tekanan sampai terjadinya separasi pada sudut $\pm 110^\circ$ *upper side* dan sudut $\pm 250^\circ$ *lower side*.

Distribusi koefisien tekanan pada silinder 2 (*downstream atas*) dan silinder 3 (*downstream bawah*) untuk jarak transversal T/D 1.5 terjadi perbedaan yang signifikan antara distribusi tekanan baik pada posisi *upper side* maupun pada posisi *lower side*. Hal ini disebabkan karena pengaruh efek *bistable* atau dikenal sebagai fenomena *based flow* seperti yang sudah dijelaskan pada konfigurasi tanpa *bodi* pengganggu diatas. Pengaruh ini menyebabkan terjadinya perbedaan titik stagnasi yang terjadi, untuk silinder 2 titik stagnasi berada pada posisi sudut 5° dan silinder 3 titik stagnasi berada pada sudut 345° . Adanya *peak* pada grafik menandakan bahwa *shear layer* yang terpisah dari silinder 1 mengalami *re-attachment* pada permukaan silinder 3. Selanjutnya koefisien tekanan kembali meningkat perlahan-lahan yang menyebabkan aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan yang terjadi sehingga terjadinya separasi yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan mulai *steady* pada sudut $\pm 135^\circ$ sampai dengan sudut

$\pm 270^\circ$, akan tetapi diantara rentang sudut 135° - 270° , distribusi koefisien tekanan juga sedikit meningkat pelan-pelan hal ini tidak terlepas dari pengaruh efek *bistable* seperti yang sudah dijelaskan diatas.



Gambar 4. Grafik distribusi koefisien tekanan (a) T/D 1,5; (b) T/D 3 pada konfigurasi stagger dengan *bodi* pengganggu 30° .

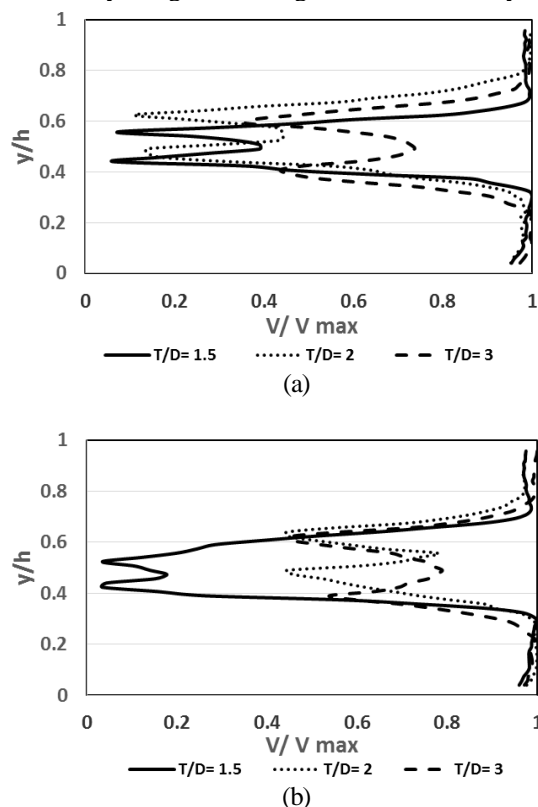
Sedangkan pada jarak T/D 3, titik stagnasi pada koefisien distribusi tekanan untuk silinder 1 (*upstream*) (gambar 4) tepat berada pada sudut 0° dan ini merupakan nilai C_p tertinggi yaitu 1, setelah titik stagnasi aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya C_p sampai pada sudut 35° *upper side* dan sudut 325° *lower side*, hal ini disebabkan karena aliran melalui daerah *favorable* yang berbentuk *diffuser* kemudian C_p nya kembali meningkat sampai pada sudut $\pm 55^\circ$ *upper side* dan sudut 305° yang disebabkan oleh adanya penyempitan antara *bodi* pengganggu dengan silinder sirkular 1 yang menimbulkan *blockage*, akibatnya momentum aliran turun. Kemudian kembali terjadi percepatan sampai pada sudut 80° *upper side* dan sudut 280° *lower side* yang disebabkan oleh momentum aliran yang terpecahkan dan adanya pengaruh wake dari *bodi* pengganggu, yang menyebabkan *shear layer* yang terlepas kembali mengalami *re-attachment* pada permukaan silinder 1 yang ditandai dengan adanya *peak*. Kemudian aliran kembali mengikuti kontur permukaan silinder 1 yang ditandai dengan penurunan tekanan sampai terjadinya separasi pada sudut $\pm 115^\circ$ *upper side* dan sudut $\pm 245^\circ$ *lower side*.

Untuk silinder 2 (*downstream atas*) dan silinder 3 (*downstream bawah*) untuk jarak transversal T/D 4, distribusi koefisien tekanan memiliki kemiripan baik pada posisi *upper side* maupun pada posisi *lower side*. Kesamaan distribusi tekanan diantara dua silinder tersebut disebabkan karena tidak

adanya lagi pengaruh efek *bistable*. Sehingga aliran yang melintasi silinder 2 dan silinder 3 adalah aliran biasa yang hanya dipengaruhi oleh separasi dari silinder 1 (*upstream*). Pengaruh dari wake silinder 1 inilah yang menyebabkan adanya sedikit *peak* pada kedua silinder tersebut.

Profil kecepatan dibelakang tiga silinder sirkular konfigurasi stagger tanpa *bodi* pengganggu dan dengan *bodi* pengganggu 30°

Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa terjadinya perbedaan yang signifikan antara variasi jarak transversal T/D 1,5 dengan jarak transversal T/D 3 seperti terlihat pada (gambar.5a dan 5b). Pada jarak $T/D = 1,5$ terjadinya defisit momentum yang terbesar ditandai dengan nilai U/U_{maks} yang paling rendah dibandingkan dengan jarak $T/D = 3$. Hal ini disebabkan karena aliran yang melintasi silinder 1 (*upstream*) terpecahkan dan kembali mengenai silinder downstream atas dan silinder downstream bawah, dalam hal ini wake dari silinder 1 masih mempengaruhi silinder 2 dan silinder 3. Dan defisit momentum terbesar itu terjadi pada posisi silinder 2 dan silinder 3 sedangkan pada silinder 1 defisit momentumnya lebih kecil. Sedangkan pada jarak $T/D = 3$ defisit momentum yang terjadi lebih kecil, hal ini disebabkan karena aliran yang terpecahkan dan wake dari silinder 1 sudah tidak terlalu besar dalam mempengaruhi silinder 2 dan silinder 3, sehingga defisit momentumnya lebih kecil dan bahkan untuk silinder 1 pada variasi T/D 3 defisit momentumnya sangat kecil dengan Nilai U/U_{maks} nya 0.74



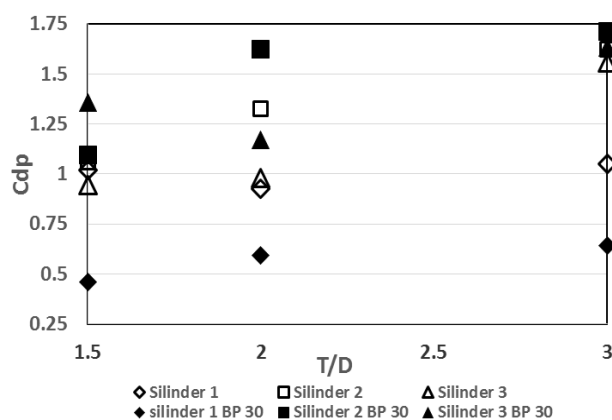
Gambar 5. Grafik profil kecepatan di belakang 3 silinder sirkular konfigurasi stagger (a) Tanpa *bodi* pengganggu; (b) *bodi* pengganggu 30°

Ada perbedaan antara hasil distribusi profil kecepatan pada konfigurasi stagger Tanpa *bodi* pengganggu dengan konfigurasi stagger dengan *bodi* pengganggu 30° seperti terlihat pada (gambar 5a dan 5b), menunjukkan bahwa defisit

momentum yang terjadi untuk jarak $T/D=3$ pada konfigurasi stagger dengan bodi pengganggu 30° jauh lebih kecil dibandingkan tanpa bodi pengganggu, hal ini disebabkan karena aliran yang mengenai *bodi pengganggu* terseparasi dan kembali *re-attachment* ke kontur silinder 1 dan aliran mengalami perlambatan sampai terjadinya separasi, sehingga pengaruh dari separasi dan wake dari silinder 1 lebih kecil dibandingkan dengan Konfigurasi stagger tanpa *bodi pengganggu* untuk jarak $T/D=3$ yang ditandai dengan U/U_{maks} nya lebih besar yaitu 0.79. sedangkan pada jarak T/D 1,5 defisit momentumnya hampir menyerupai pada posisi silinder 2 dan silinder 3 dan hanya pada silinder 1 saja terjadi perbedaan defisit momentumnya.

Analisa Distribusi Koefisien Drag Pressure pada tiga Silinder Sirkular dengan Susunan Stagger

Distribusi koefisien drag (C_{DP}) silinder 1 (*upstream*) maupun silinder 2 (*downstream atas*) dan silinder 3 (*downstream bawah*) baik tanpa *bodi pengganggu* maupun dengan *bodi pengganggu* yang diperoleh dari persamaan 4, dapat dilihat pada (gambar 6) dibawah ini. Untuk jarak $T/D=1,5$, nilai C_{DP} silinder 3 pada konfigurasi stagger tanpa *bodi pengganggu*, memiliki nilai terendah dibandingkan dengan silinder 1 dan silinder 2 seperti ditunjukkan pada (gambar. 6), sedangkan pada jarak $T/D=3$ nilai C_{DP} terendah berada pada silinder 1 yaitu 1,1. Sedangkan untuk silinder 2 distribusi koefisien pressure drag nya memiliki nilai tertinggi untuk semua variasi jarak transversal (T/D) antar silinder dibandingkan dengan silinder 1 dan silinder 3.



Gambar 6. koefisien drag pressure (C_{DP}) pada variasi jarak $T/D = 1,5, 2$ dan 3 dengan dan tanpa *bodi pengganggu*

Untuk distribusi koefisien pressure drag (C_{DP}) pada konfigurasi stagger dengan *bodi pengganggu* 30° ada perbedaan dengan C_{DP} tanpa *bodi pengganggu*, yaitu nilai C_{DP} terendah tetap berada pada silinder 1 untuk semua variasi jarak transversal $T/D= 1,5, 2$ dan 3 , dibandingkan dengan silinder 2 dan silinder 3 seperti ditunjukkan pada (gambar. 6), akan tetapi untuk silinder 2 dan silinder 3 lebih fluktuatif yaitu pada variasi $T/D=2$ nilai C_{DP} untuk silinder 2 jauh lebih rendah dibandingkan dengan nilai C_{DP} pada silinder 1 dan silinder 3, sedangkan pada variasi jarak $T/D=3$ nilai C_{DP} silinder 3 lebih rendah dibandingkan dengan silinder 2.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa-analisa yang telah diuraikan diatas, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut:

1. Terjadi perbedaan C_P yang signifikan antara silinder 2 dengan silinder 3 pada jarak $T/D=1,5$, hal ini disebabkan karena pengaruh *efek bistable* (jarak dekat), sedangkan pada jarak $T/D=3$, distribusi C_P nya lebih stabil.
2. Penggunaan *bodi pengganggu* pada posisi 30° dapat mereduksi koefisien *pressure drag* (C_{DP}) sebesar 55% untuk silinder 1 pada semua variasi jarak T/D , Sedangkan pada silinder 2 dan silinder 3 C_{DP} nya malah meningkat.
3. Pada silinder dengan *bodi pengganggu* 30° transisi aliran lapis batas lebih cepat terjadi sehingga terjadinya penundaan titik separasi, hal inilah yang mereduksi koefisien *pressure drag* (C_{DP})

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Annisa A, A, D. 2013. *Studi eksperimen dan numerik 2d unsteady-rans pengaruh inlet disturbance body terhadap karakteristik aliran melintasi dua silinder sirkular yang tersusun secara tandem pada saluran sempit (blockage ratio 20%)* "studi kasus untuk jarak antar silinder $1,5 \leq l/d \leq 4$ dan sudut pengganggu 30° & 60° ". www.digilib.its.ac.id
- [2] Alam, M. M., H. Sakamoto, M. Moriya. 2003. *Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods*. Journal of Fluids and Structures 18, 347-366.
- [3] Lee, Sang-Joon., Sang-Ik Lee, Cheol-Woo Park. 2004. *Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod*. Fluid Dynamics Research 34,233-250.
- [4] Tsutsui, T., T. Igarashi. 2002. *Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, 527-541.
- [5] Zhang, P.F., J.J. Wang, L.X. Huang. 2006. *Numerical simulation of flow around cylinder with an upstream rod in tandem at low Reynolds numbers*. Applied Ocean Research 28, 183-192.
- [6] Gu, Zhifu., Sun, Tianfeng. 2000. *Clasifications of flow pattern on three circular cylinders in equilateral-triangular arrangements*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89, 553-568
- [7] Tatsuno, M. H, Amamoto., Koji Ishi-i. 1997. *Effect of interference among three equidistantly arranged cylinder in a uniform flow*. Fluid Dynamics Research 22, 297-315.

STUDI EKSPERIMENTAL CO-FIRING BATUBARA DENGAN SEKAM PADI DALAM BUBBLING FLUIDIZED BED COMBUSTOR (BFBC)

Fransisko Pandiangan¹⁾, Tri Agung Rohmat²⁾, I Made Suardjaja³⁾

Fast Track DIKTI – Program Studi S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada¹⁾

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada^{2,3)}

Jl. Grafika No.2 Yogyakarta, 55281, Telp & Fax (+62) 274 521 673^{1,2,3)}

Phone: 085640451057¹⁾

E-mail : siskopandiangan@gmail.com¹⁾

ABSTRAK

One of the potential energy resources is biomass. Biomass can be used as fuel for boiler. Biomass combustion has some problems when used as single fuel such as unstable combustion, high moisture and residence time, high emission of CO and corrosive ash. Therefore biomass is used for co-firing with coal in Bubbling Fluidized Bed Combustor (BFBC). Fluidized bed combustion is a solid fuel combustion technology which has many advantages such as high combustion efficiency, fuel flexibility and also low emission of NO_x. This paper studied on coal co-firing with rice husk in BFBC. The combustion chamber with diameter of 63 cm had two parts: cylindrical shape with height of 180 cm and conical shape with height of 60 cm and smaller diameter of 12.5 cm. The coal was from Kalimantan and the rice husk was as received fuel. The bed material was silica sand of 300 μ m ~ 600 μ m diameter size and the bed height was 25 cm. The co-firing conditions were set by 2 conditions for the same total calorific value. The first experimental condition was set by the constant coal mass flow rate with the rice husk mass flow rate variations. The second experimental condition was set by the constant rice husk mass flow rate with the coal mass flow rate variations. This research studied the combustion characteristics of coal co-firing with rice husk. The effects of the co-firing on combustion characteristics were evaluated. The combustion characteristics were evaluated from the axial temperature profiles and flue gas analysis such as CO and NO. This paper discussed the phenomena of the coal co-firing with rice husk in BFBC and the effects on the temperature and flue gas profiles. For the co-firing with rice husk mass flowrate variations, the result showed that freeboard temperatures increase when the rice husk mass flow rate increased. The CO emissions increase when the rice husk mass flow rate increased and the NO emissions decrease when the rice husk mass flow rate increased. For the co-firing with coal mass flow rate variations, the result shows that bed temperatures increase when the coal mass flow rate increased. The CO emissions decrease when the coal mass flow rate increased and the NO emissions increase when the coal mass flow rate increased.

Key words: Bubbling Fluidized Bed Combustor, Co-firing, Combustion Characteristics

1. PENDAHULUAN

Biomassa adalah salah satu sumber energi potensial. Indonesia memiliki potensi 48,91 GW berdasarkan data Kementerian ESDM [1]. Salah satu biomassa yang berpotensi tinggi adalah sekam padi. Biomassa dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk boiler tapi pembakaran biomassa memiliki beberapa kendala. Kandungan *moisture* menurunkan temperatur pembakaran dan meningkatkan *residence time* sehingga menyebabkan emisi CO menjadi tinggi. Emisi CO juga bisa disebabkan oleh campuran bahan bakar yang kurang baik di dalam ruang bakar [2]. Komposisi abu biomassa relatif lebih korosif karena banyak mengandung Cl, Na dan K [3]. Selain masalah pembakaran, kendala lain adalah energi density yang rendah dan ketersediaan biomassa yang kurang kontinu tergantung dari musim. Oleh karena kendala-kendala tersebut, biomassa dioptimalkan dengan cara co-firing dengan batubara dalam *Bubbling Fluidized Bed Combustor* (BFBC).

Fluidized bed combustion adalah suatu teknologi pembakaran bahan bakar padat yang memiliki beberapa kelebihan antara lain adalah efisiensi pembakaran tinggi, fleksibilitas bahan bakar dan rendah emisi NO_x. Salah satu jenis *fluidized bed* adalah *Bubbling Fluidized Bed Combustor* (BFBC) [4]. Beberapa penelitian mengenai pembakaran biomassa maupun co-firing sudah pernah dilakukan. Pembakaran beberapa biomassa seperti sekam padi, serbuk gergaji dan ampas tebu dalam *conical fluidized bed*

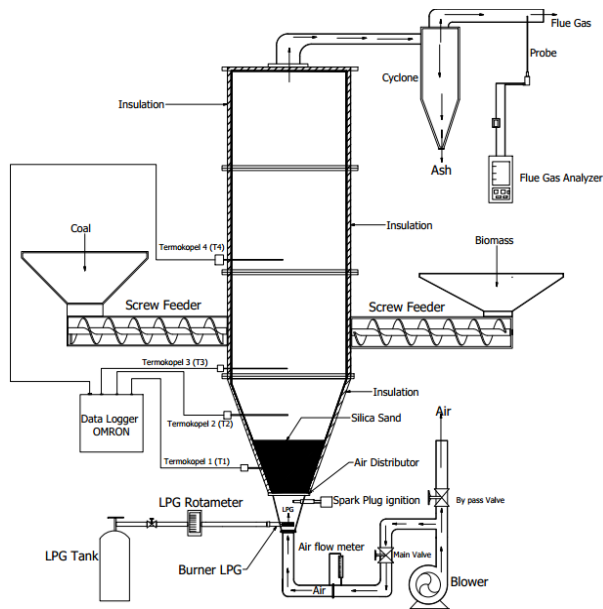
combustor mempelajari temperatur aksial dan profil emisi CO dan NO. Profil CO dan NO dibagi menjadi 2 bagian region yaitu *formation* dan *reduction* [5]. Penelitian berikutnya co-firing ampas tebu as received dengan sekam padi dalam *conical fluidized bed combustor* mempelajari profil temperatur aksial dan profil emisi CO. Efisiensi pembakaran co-firing ampas tebu dengan sekam padi lebih besar dibandingkan single firing ampas tebu dengan emisi yang lebih rendah [6]. Penelitian lainnya mempelajari co-combustion batubara dengan sekam padi dalam *Circulating Fluidized Bed Combustor* (CFBC). Temperatur aksial *steady* pada temperatur 800-900°C. Co-combustion meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi NO_x. Penambahan sekam padi menyebabkan kenaikan emisi CO [8].

Berdasarkan tinjauan pustaka tersebut penelitian – penelitian sebelumnya banyak fokus pada pembakaran biomassa dalam BFBC dan co-firing dalam CFBC. Penelitian ini fokus pada co-firing batubara dengan sekam padi dalam BFBC. Penelitian ini mempelajari karakteristik pembakaran co-firing batubara dengan biomassa dalam BFBC. Karakteristik pembakaran dievaluasi dari profil temperatur aksial dan analisis *flue gas* seperti CO dan NO. Co-firing dilakukan dengan dua cara. Pertama adalah co-firing batubara sebagai bahan bakar utama dan biomassa sebagai bahan bakar tambahan. Co-firing pertama dilakukan dengan memvariasikan laju massa sekam padi pada laju masa batubara konstan. Kedua adalah co-firing sekam padi sebagai bahan bakar utama dan batubara sebagai bahan bakar tambahan. Co-firing

kedua dilakukan dengan memvariasikan laju massa batubara pada laju massa sekam padi konstant. Efek penambahan biomassa maupun batubara terhadap karakteristik pembakaran *co-firing* dipelajari.

2. METODOLOGI

Skema alat penelitian BFBC ditunjukkan pada Gambar 1. Ruang bakar terdiri dari dua bagian yaitu *conical* dan *cylindrical*. *Conical combustor* memiliki diameter besar 63 cm dan diameter kecil 12,5 cm dengan tinggi 60 cm sementara *cylindrical combustor* memiliki diameter 63 cm dan tinggi 180 cm. Ruang diisolasi dengan glass wool setebal 25 mm. Sebuah siklon digunakan untuk menangkap *fly ash* yang terbang bersama gas buang. Sebuah blower dengan daya 20 Hp digunakan untuk menyuplai udara melewati distributor udara Distributor udara tipe *plate* diletakkan di bagian bawah *conical combustor*. Sebuah buner LPG digunakan untuk memanaskan material *bed* sekitar 600°C sampai pembakaran stabil. Batubara dan sekam padi dimasukkan dengan menggunakan *overbed screwfeeder* dengan penggerak motor listrik 3 fase pada ketinggian 70 cm di atas distributor udara.



Gambar 1. Schematic Diagram of the Bubbling Fluidized Bed Combustor (BFBC)

Material *bed* adalah pasir silika dengan ukuran 300µm ~ 600 µm dan ketinggian material *bed* adalah 25 cm dari distributor udara. Batubara yang digunakan adalah batubara Kalimantan dengan ukuran 2 ~ 6 mm. Sekam padi yang digunakan adalah *as received*. Proximate analysis batubara dan sekam padi ditunjukkan pada Tabel 1.

Table 1. Proximate analysis bahan bakar

Bahan bakar	Fixed Carbon (FC)	Volatile Matter (VM)	Moisture (M)	Ash (A)	LHV (kal/g)
Batubara	62,15	28,50	6,00	3,34	6560
Sekam padi	21,08	52,74	3,99	22,94	3277

Kondisi eksperimental dilakukan dengan 2 cara. Pertama adalah *co-firing* dengan variasi laju massa sekam padi pada laju massa batubara konstan (mbb = 6 kg/h). Kedua adalah

co-firing dengan variasi laju massa batubara pada laju massa sekam padi konstant (msp = 7 kg/h). Kondisi eksperimental penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Table 2. Kondisi eksperimental *co-firing*

Co-firing batubara dengan variasi laju massa udara							
No	mbb (kg/h)	Mass fraction (%)	msp (kg/h)	M udara (kg/h)	Cvbb (kal/g)	Cvsp (kal/g)	Total Laju Kalor (kkal/h)
1	6	0	0	48;	6560	3277	39365
2	6	40	2,4	52,8;	6560	3277	47230
3	6	50	3	57,6;	6560	3277	49196
4	6	60	3,6	62,4;	6560	3277	51162
5	6	70	4,2	67,2	6560	3277	53128
Co-firing sekam padi dengan variasi laju massa batubara							
1	3	4,9	7	48;	6560	3277	42621
2	3,5	50	7	52,8;	6560	3277	45902
3	4	57,1	7	57,6;	6560	3277	49182
4	4,5	64,3	7	62,; 67,2	6560	3277	52463

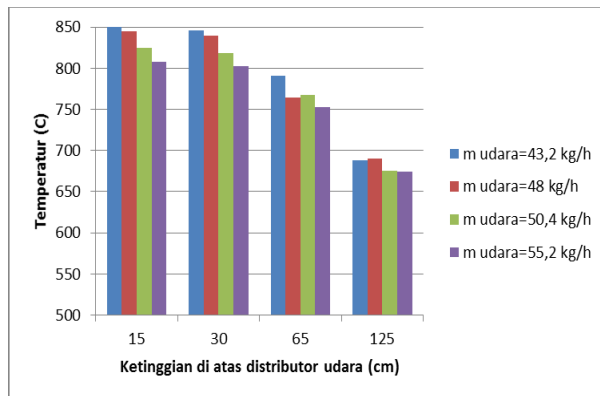
Prosedur penelitian dilakukan dengan melakukan *preheating* material *bed* menggunakan *burner* LPG. Batubara dimasukkan pada temperature 450 °C. Biomassa dimasukkan ketika temperatur *bed* mencapai 500°C dan LPG mati pada temperatur 600°C. Pencatatan data dilakukan pada saat pembakaran sudah *steady*. Temperatur diukur dengan menggunakan 4 termokopel tipe pada ketinggian 15 cm, 30 cm, 65 cm, and 125 cm dari distributor udara. Temperatur radial diukur untuk setiap jarak radial 50 mm dari tengah menuju dinding ruang bakar. Data temperatur direkam menggunakan *data logger* OMRON ZR-RX45 dengan sampling rate 100 ms. Temperatur aksial dihitung dengan menggunakan metode *area weighted average*. Komposisi flue gas seperti CO dan NO diukur dengan menggunakan *Portable Combustion Analyzer* Bacharach di bagian saluran *exhaust*. Profil temperatur aksial dan emisi *flue gas* dievaluasi untuk masing-masing kondisi *co-firing*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

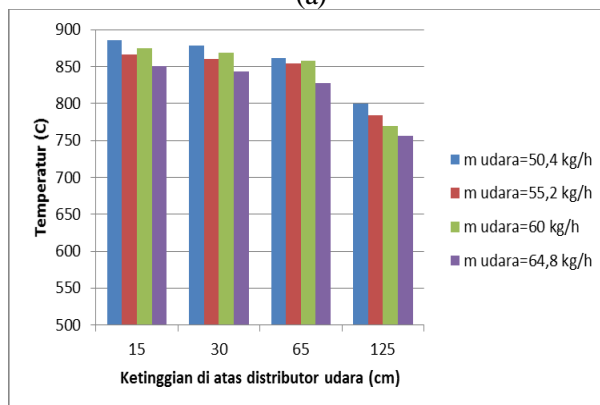
Co-firing batubara dengan variasi laju massa sekam padi

a. Profil temperatur aksial

Temperatur maksimum adalah temperatur *bed* (ketinggian 15 cm di atas distributor udara) karena pembakaran batubara terjadi di *bed region* (15 ~30 cm) di atas distributor udara sementara pembakaran sekam padi terjadi di *atas bed region* (ketinggian 30 ~ 65 cm di atas distributor udara). Nilai kalor batubara relatif lebih besar dibandingkan sekam padi sehingga transfer kalor hasil pembakaran di dalam *bed* akan menjadi lebih besar daripada di *freeboard*. Temperatur aksial relatif *uniform* pada ketinggian 15 ~ 30 cm di atas distributor udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, Gambar 2 dan Gambar 3a untuk semua kondisi *co-firing* maupun *single firing*. Hal ini terjadi karena daerah pada ketinggian 15 ~ 30 cm di atas distributor udara adalah zona *bubbling bed* dimana konsentrasi material *bed* terdistribusi merata.

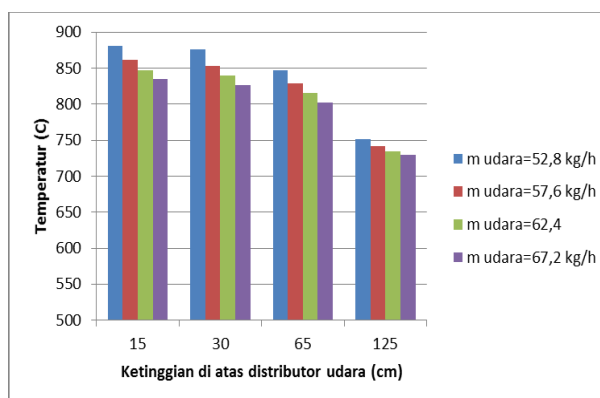


(a)

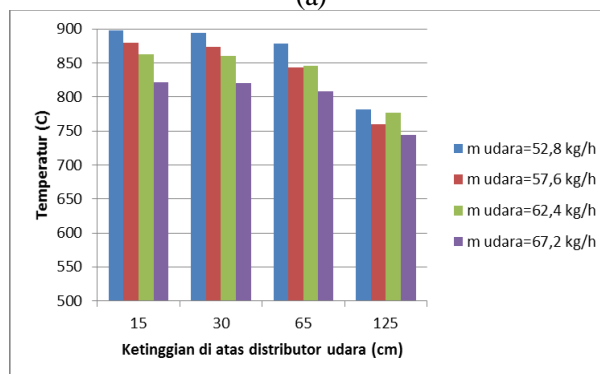


(b)

Gambar 1. Profil temperatur aksial (a) *single firing* mbb = 6 kg/h; msp = 0, (b) *co-firing* mbb = 6 kg/h; msp = 2,4 kg/h

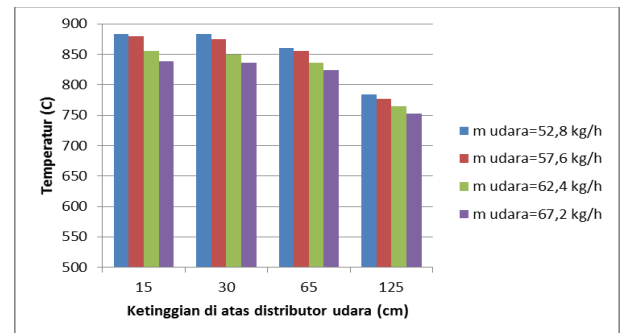


(a)

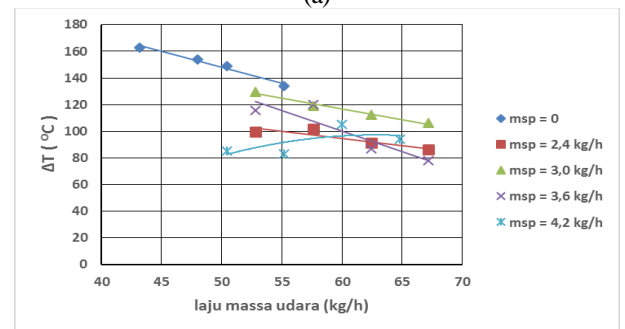


(b)

Gambar 2. Profil temperatur aksial *co-firing* mbb = 6kg/h dengan (a) msp = 3, (b) msp = 3,6 kg/h



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Profil temperatur aksial *co-firing* mbb = 6 kg/h; msp = 4,2 kg/h, (b) Perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur *freeboard* pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara

Perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur aksial pada ketinggian 65 cm di atas distributor udara untuk kondisi *single firing* batubara lebih besar dibandingkan kondisi *co-firing*. Hal ini disebabkan oleh penurunan konsentrasi material *bed* pada ketinggian 65 cm di atas distributor udara. Namun pada kondisi *co-firing*, sekam padi terbakar di atas *bed* region (30 ~ 60 cm di atas distributor udara) sehingga transfer kalor hasil pembakaran sekam padi banyak terjadi di daerah ini. Hal ini menyebabkan temperatur aksial pada ketinggian 65 cm di atas distributor udara akan menjadi lebih tinggi.

Temperatur aksial pada ketinggian 65 ~ 125 cm di atas distributor udara naik ketika laju massa sekam padi dinaikkan dari 0 – 4,2 kg/h seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, 2 dan 3a. Hal ini terjadi karena kenaikan transfer kalor hasil pembakaran. Sekam padi banyak terbakar di daerah *freeboard* sehingga transfer kalor akan semakin besar ketika laju massa sekam padi bertambah. Perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur aksial pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara turun ketika laju massa udara dinaikkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3b. Hal ini terjadi karena adanya pergeseran *splash zone*. Area pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara adalah area *splash zone*. *Splash zone* akan bergeser ke daerah *freeboard* yang lebih tinggi sehingga konsentrasi material *bed* pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara semakin besar. Hal ini menyebabkan transfer kalor dari material *bed* semakin besar.

b. Emisi CO dan NO

Emisi CO akan naik ketika laju massa udara dinaikkan hingga mencapai nilai maksimum. Emisi CO akan turun ketika laju massa udara dinaikkan lebih lanjut seperti

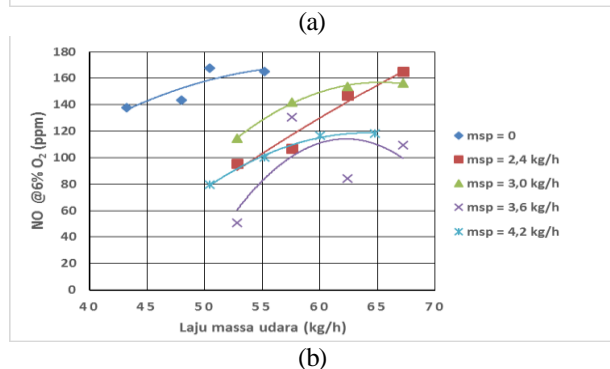
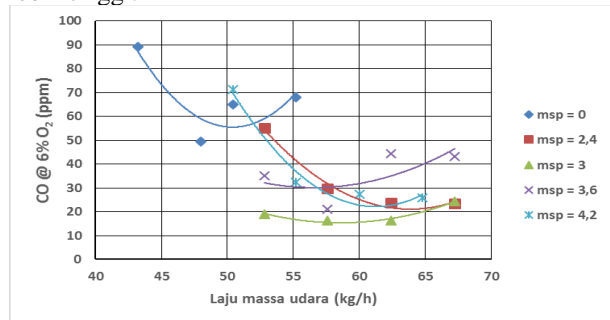
yang ditunjukkan pada Gambar 4a. Emisi CO turun ketika laju massa udara dinaikkan karena kebutuhan oksigen terpenuhi serta campuran bahan bakar dan udara lebih baik. Hal ini membuat proses pembakaran menjadi lebih baik. Namun emisi CO akan kembali naik ketika laju masa udara dinaikkan lebih lanjut. Hal ini disebabkan banyaknya partikel sekam padi yang tidak terbakar sempurna. Laju massa udara yang tinggi membuat sekam padi banyak terangkat di *freeboard* dan terbakar di *freeboard* karena densitas sekam padi relatif rendah. Temperatur di *freeboard* relatif rendah dan hal ini menyebabkan proses pembakaran menjadi kurang baik sehingga emisi CO semakin bertambah.

Emisi CO akan semakin besar ketika laju massa sekam padi dinaikkan dari 2,4 kg/h sampai 4,2 kg/h pada laju massa udara yang relatif rendah (50 ~ 57 kg/h). Hal ini bisa disebabkan proses pembakaran kurang baik karena kekurangan oksigen. Namun pada laju massa udara yang relatif lebih tinggi (57 kg/h – 67 kg/h), emisi CO pada laju massa sekam padi sebesar 4,2 kg/h akan cenderung lebih rendah dibandingkan pada laju massa sekam padi 3,6 kg/h seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4a. Hal ini bisa terjadi karena laju massa sekam padi yang tinggi menyebabkan kebutuhan oksigen semakin besar sehingga pada laju massa udara yang relatif tinggi kebutuhan oksigen terpenuhi dan juga campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih baik. Hal ini membuat proses pembakaran menjadi lebih baik sehingga pembentukan CO semakin sedikit. Kenaikan laju massa sekam padi menyebabkan kenaikan emisi CO pada laju massa udara yang relatif rendah karena kekurangan oksigen dan campuran bahan bakar yang kurang baik. Hal ini berbeda ketika laju massa udara relatif tinggi, kenaikan laju massa sekam padi yang cukup besar akan menurunkan emisi CO karena kebutuhan oksigen yang tercukupi serta campuran bahan bakar dan udara lebih baik. Hal ini membuat proses pembakaran menjadi lebih baik sehingga pembentukan CO menjadi lebih sedikit.

Karakteristik NO relatif sama untuk semua kondisi *co-firing* maupun *single firing*. Emisi NO semakin meningkat saat laju massa udara dinaikkan dan mencapai nilai suatu maksimum pada kondisi laju massa udara tertentu namun NO akan turun ketika laju massa udara dinaikkan lagi. Hal ini bisa terjadi karena NO yang terbentuk adalah NO prompt. NO prompt mencapai nilai maksimum pada kondisi temperatur tinggi dan kaya oksigen. Temperatur pembakaran akan semakin turun ketika laju massa udara dinaikkan. NO akan naik ketika laju massa udara dinaikkan dan mencapai nilai maksimum pada suatu kondisi tertentu dimana laju massa udara cukup tinggi dan temperatur pembakaran masih relatif tinggi. Ketika laju massa udara terus dinaikkan, emisi NO akan berkurang karena temperatur pembakaran yang semakin rendah meskipun kaya oksigen.

Penambahan laju massa sekam padi menurunkan emisi NO untuk laju massa udara yang sama seperti yang ditunjukkan pada 4b. Emisi NO relatif turun ketika laju massa sekam padi dinaikkan dari 0 sampai 4,2 kg/h untuk laju massa udara yang sama. Kenaikan laju massa sekam padi menyebabkan nilai karbon (C) meningkat. Hal ini menyebabkan kebutuhan oksigen semakin meningkat sehingga oksigen sisa yang bereaksi dengan nitrogen menjadi lebih sedikit. Reaksi pembentukan CO maupun CO₂ lebih cepat dibandingkan pembentukan NO oleh karena itu oksigen akan lebih cepat bereaksi dengan C

dibandingkan dengan N. Sementara oksigen sisa yang tidak bereaksi dengan C akan bereaksi dengan nitrogen (N) dan membentuk NO. Hal ini menyebabkan emisi NO akan turun karena konsentrasi oksigen yang lebih rendah meskipun temperatur pembakaran yang dihasilkan relatif lebih tinggi.

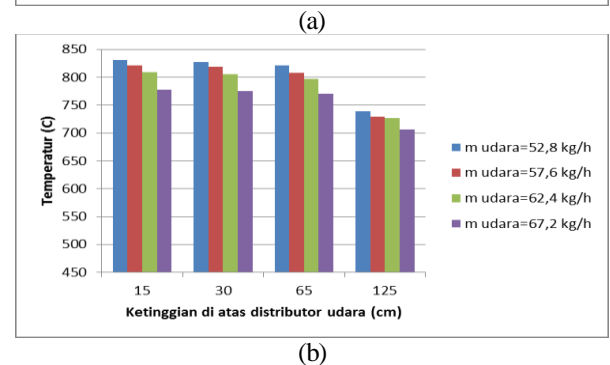
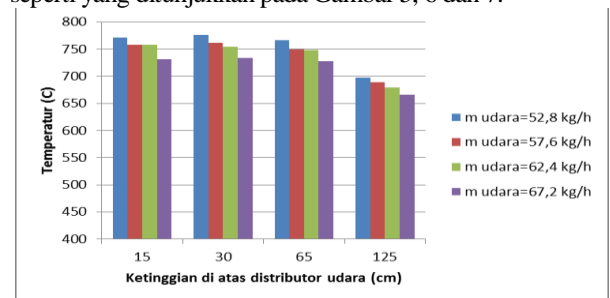


Gambar 4. Karakteristik emisi *co-firing* batubara dengan variasi laju massa sekam padi (a) CO @ 6% O₂, (b) NO @ 6% O₂

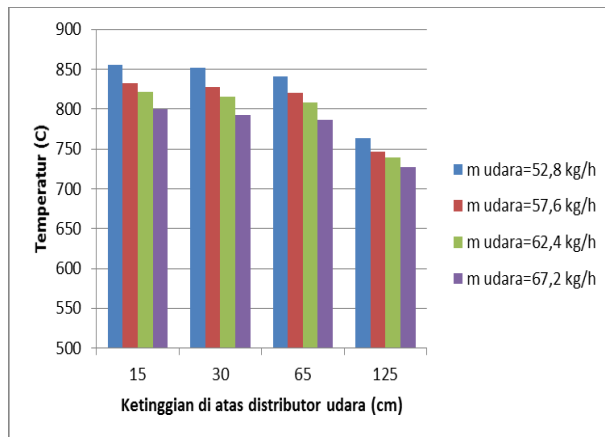
Co-firing sekam padi dengan variasi laju massa batubara

a. Profil temperatur aksial

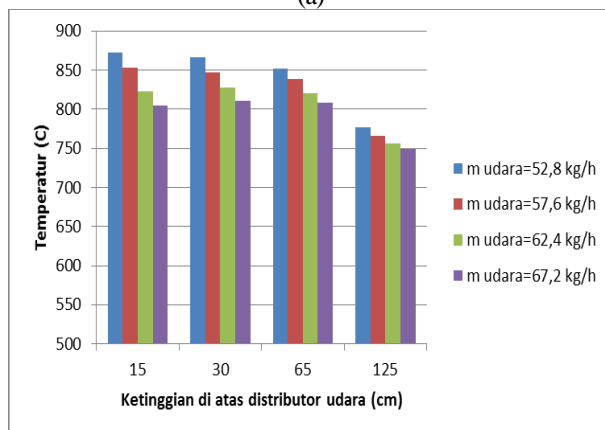
Temperatur aksial relatif *uniform* pada ketinggian 15 ~ 30 cm di atas distributor udara untuk semua kondisi *co-firing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, 6 dan 7.



Gambar 5. Profil temperatur aksial *co-firing* dengan (a) mbb = 3 kg/h; msp = 7 kg/h, (b) mbb = 3,5 kg/h; msp = 7 kg/h



(a)

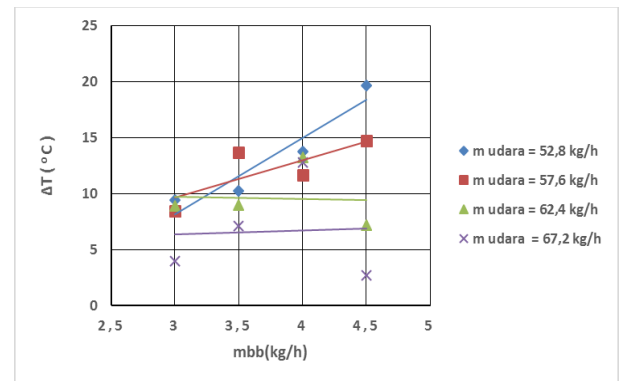


(b)

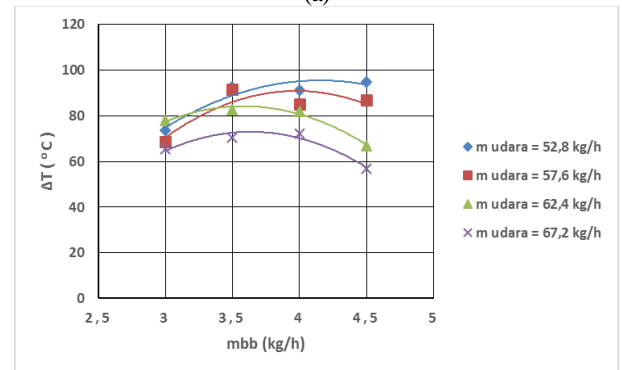
Gambar 6. Profil temperatur aksial co-firing dengan (a) $mbb = 4 \text{ kg/h}$; $m_{\text{sp}} = 7 \text{ kg/h}$, (b) $mbb = 4,5 \text{ kg/h}$; $m_{\text{sp}} = 7 \text{ kg/h}$

Hal ini terjadi karena area pada ketinggian 15 ~ 30 cm di atas distributor udara adalah zona *bubbling bed*. Konsentrasi material *bed* pada zona *bubbling bed* terdistribusi merata sehingga transfer kalor dari material bed relatif sama. Penambahan laju massa batubara tidak mempengaruhi temperatur aksial pada ketinggian 15 ~ 30 cm di atas distributor udara. Penambahan laju massa batubara akan menaikkan temperatur *bed* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, 6 dan 7. Hal ini disebabkan oleh transfer kalor hasil pembakaran batubara.

Penambahan laju massa batubara menaikkan perbedaan temperatur bed terhadap temperatur freeboard pada ketinggian 65 cm di atas distributor udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6a. Hal ini disebabkan kenaikan temperatur *bed* karena transfer kalor hasil pembakaran di dalam *bed* semakin besar. Batubara terbakar di dalam *bed region* sementara sekam padi banyak terbakar di atas *bed region*. Laju massa sekam padi konstan sehingga transfer kalor hasil pembakaran sekam padi akan relatif sama. Hal ini menyebabkan perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur aksial pada ketinggian 65 cm di atas distributor udara akan semakin besar. Perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur *freeboard* (ketinggian 65 ~ 125 cm di atas distributor udara) juga akan turun ketika laju massa udara dinaikkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Laju massa udara yang semakin tinggi menyebabkan sekam padi mudah terangkat karena densitas sekam padi yang relatif rendah. Hal ini menyebabkan sekam padi lebih banyak terbakar di area *freeboard* yang lebih tinggi sehingga temperatur aksial pada ketinggian 65 cm akan semakin tinggi.



(a)



(b)

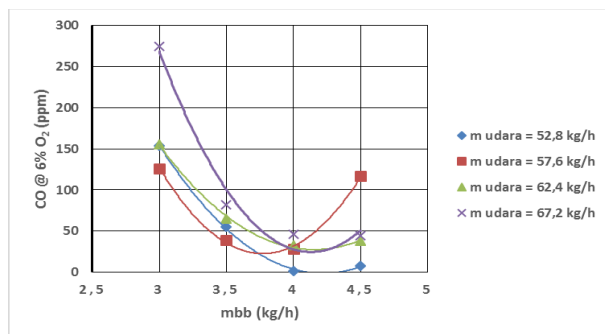
Gambar 6. Perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur *freeboard* pada ketinggian (a) 65 cm di atas distributor udara, (b) 125 cm di atas distributor udara

Perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur aksial pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara naik ketika laju massa batubara dinaikkan hingga mencapai nilai maksimum. Namun penambahan laju massa batubara lebih lanjut menyebabkan penurunan perbedaan temperatur. Temperatur *bed* akan semakin besar ketika laju massa batubara dinaikkan karena kalor hasil pembakaran batubara semakin besar. Pembakaran batubara paling banyak terjadi di dalam *bed region* dan sebagian kecil terjadi di atas *bed region*. Namun ketika laju massa batubara semakin dinaikkan, partikel batubara yang terbakar di atas *bed region* semakin banyak karena terdorong oleh udara. Hal ini menyebabkan transfer kalor di bagian *freeboard* semakin besar. Kenaikan laju massa udara juga menurunkan perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur aksial pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara. Area pada ketinggian 125 cm di atas distributor udara adalah area *splash zone* dimana konsentrasi material *bed* sangat rendah. Pergeseran area *splash zone* terjadi ketika laju massa udara dinaikkan. *Splash zone* bergeser ke area *freeboard* yang lebih tinggi sehingga konsentrasi material bed pada ketinggian 125 cm di atas distributor meningkat. Hal ini menyebabkan temperatur aksial semakin naik karena transfer kalor dari material *bed* di daerah tersebut semakin naik.

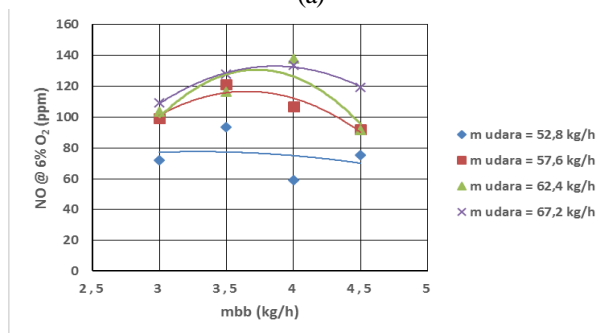
b. Emisi CO dan NO

Hubungan pengaruh laju massa batubara terhadap emisi CO ditunjukkan pada Gambar 6a. Emisi CO akan turun ketika laju massa batubara dinaikkan hingga mencapai nilai minimum pada suatu laju massa batubara tertentu dan kembali naik saat laju massa batubara

dinaikkan lebih lanjut. Emisi CO akan turun ketika laju massa batubara dinaikkan ($m_{bb} = 3 \text{ kg/h} - 4 \text{ kg/h}$) dan kembali naik ketika laju massa batubara lebih dinaikkan lebih lanjut ($m_{bb} = 4,5 \text{ kg/h}$) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6a. Kenaikan laju massa batubara meningkatkan transfer kalor hasil pembakaran. Temperatur pembakaran batubara menjadi lebih tinggi sehingga menyebabkan batubara dan sekam padi lebih mudah terbakar. Laju reaksi pembakaran menjadi lebih cepat sehingga pembentukan emisi CO menurun. Namun ketika laju massa batubara dinaikkan lebih lanjut lagi, bahan bakar akan kekurangan oksigen serta campuran bahan bakar dan udara menjadi kurang baik. Hal ini membuat proses pembakaran menjadi kurang baik sehingga pembentukan CO akan meningkat.



(a)



(b)

Gambar 7. Karakteristik emisi co-firing sekam padi dengan variasi laju massa batubara (a) CO @6% O₂, (b) NO @6%O₂

Pengaruh laju massa batubara terhadap emisi NO ditunjukkan pada Gambar 6b. Emisi NO akan meningkat ketika laju massa batubara dinaikkan hingga mencapai nilai maksimum pada laju massa batubara tertentu. Namun ketika laju massa batubara dinaikkan lagi emisi NO akan turun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6b. Ketika laju massa batubara dinaikkan pada laju massa udara yang sama, temperatur pembakaran akan meningkat sehingga NO akan lebih banyak terbentuk. Namun ketika laju massa batubara semakin ditingkatkan lagi NO semakin turun. Hal ini disebabkan oleh konsentrasi oksigen yang rendah. Oksigen (O) akan bereaksi dengan carbon (C) dan membentuk CO dan atau CO₂. Kenaikan laju massa batubara menyebabkan oksigen yang bereaksi dengan C akan lebih banyak sehingga oksigen sisa yang bereaksi dengan nitrogen akan lebih sedikit. Hal ini menyebabkan emisi NO akan berkurang.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa:

1. Co-firing batubara dengan variasi laju massa sekam padi

- a. Penambahan laju massa sekam padi menaikkan temperatur *bed* dan temperatur *freeboard*. Penambahan laju massa sekam padi menurunkan perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur *freeboard*.
 - b. Penambahan laju massa sekam padi menaikkan emisi CO untuk laju massa udara yang relatif rendah. Namun emisi CO turun untuk laju massa udara tinggi.
 - c. Penambahan laju massa sekam padi menurunkan emisi NO
2. Co-firing sekam padi dengan variasi laju massa batubara
 - a. Penambahan laju massa batubara menaikkan temperatur *bed* tetapi menurunkan temperatur *freeboard*. Penambahan laju massa batubara meningkatkan perbedaan temperatur *bed* terhadap temperatur *freeboard*.
 - b. Penambahan laju massa batubara menaikkan emisi CO hingga mencapai nilai minimum pada suatu laju massa tertentu. Penambahan laju massa batubara lebih lanjut menaikkan emisi CO.
 - c. Penambahan laju massa batubara menaikkan emisi NO hingga mencapai nilai maksimum pada suatu laju massa tertentu. Penambahan laju massa batubara lebih lanjut menyebabkan penurunan emisi NO.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementrian ESDM., 2006. Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006 - 2025, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, Jakarta.
- [2] Loo,V.S., & Koppejan, J., 2008, The Handbook of Biomassa Combustion and Co-firing, Earthscan, UK.
- [3] Tumuluru, J.S., Sokhansaj, S., Wright, C.T., Boardman R.D., Yancey, N.A., 2011. A Review on Biomass Classification and Composition, Co-firing Issues and Pretreatment Methods, ASABE Annual International Meeting, Louisville.
- [4] Basu, P., 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Bed, Halifax:Taylor and Francis Group LLC.
- [5] Permchat, W., Kuprianov, V.I., 2004, Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized bed combustor firing various biomas fuels, Bioresource Technology 92 (2004) 83-91
- [6] Jannvijitsakul, K., Kuprianov, V.I., Permchart, W., 2004. Co-firing of Rice Husk and Bagasse in a Conical Fluidized-bed Commbustor, The Joint International Conference "Sustainable Energy and Environment (SEE)".Thailand
- [7] Prompubess, C., Mekasut, L., Piumsombooun, P., Kuchontara, P., 2007. Co-combustion of Coal and Biomass in Circulating Fluidized Bed Combustor, Korean J.Chem., 24(6), 989-995

KARAKTERISASI UNJUK KERJA PLANT GASIFIKASI BATUBARA TIPE UPDRAFT DENGAN VARIASI EQUIVALENCE RATIO

Muhammad Trifiananto¹⁾, Bambang Sudarmanta²⁾

Prodi Magister Teknik Bidang Rekayasa Konversi Energi Institut Teknologi Sepuluh Nopember^{1,2)}
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Kampus Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia^{1,2)}

Phone: (031)5946230, Fax: (031)5922941^{1,2)}

E-mail : trifiananto@yahoo.com¹⁾, sudarmanta@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Semakin hari harga bahan bakar minyak semakin tinggi. Pemerintah mencanangkan penggunaan energi alternatif dan diversifikasi bahan bakar untuk mengurangi beban APBN. Diversifikasi bahan bakar salah satunya adalah batubara yang cadangannya masih banyak. Gasifikasi dalam prosesnya terjadi perubahan bahan bakar yaitu dari bahan bakar padat (batubara) menjadi gas flammable (CO , CH_4 , H_2) secara termokimia. Dengan teknologi gasifikasi dihasilkan gas yang cukup bersih dikarenakan adanya proses cleaning setelah gas keluar untuk mengurangi kandungan abu, sulfur, dan tar yang terkandung dalam batubara. Penelitian menggunakan gasifikasi tipe updraft dengan bahan feeding batubara, secara eksperimental. Penelitian dilakukan di perusahaan Gending di Sidoarjo Jawa Timur, menggunakan sistem batch, artinya 1 kali pemasukan batubara dari awal sampai batubara habis sebesar 80 kg batubara sub-bituminus. Equivalence Ratio (ER) dilakukan 6 variasi yaitu: 0,22; 0,25; 0,28; 0,31; 0,34; 0,36 Data-data yang dicatat berupa: temperatur di dalam reaktor, in batubara, waktu operasi gasifikasi, debit syngas, debit udara masuk, kandungan syngas, dan visualisasi nyala api. Hasil yang didapatkan dari proses gasifikasi menunjukkan bahwa semakin tinggi Equivalence Ratio (ER) maka heating value syngas mengalami penurunan. LHV pada ER 0,28 sebesar 5319,455 KJ/m³ dan η cold gas nya sebesar 79,26489866 %

Kata kunci: gasifikasi batubara, updraft, equivalence ratio, syngas.

1. PENDAHULUAN

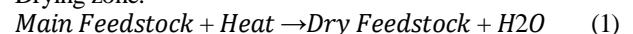
Ketersediaan sumber energi dan adanya teknologi yang dapat mengubah sumber energi menjadi bentuk yang bermanfaat bagi masyarakat, merupakan salah satu faktor pemicu pertumbuhan perekonomian dunia. Semakin hari harga bahan bakar minyak semakin tinggi. Karena kenaikan bahan bakar minyak orang beralih ke bahan bakar alternatif dan batubara. Batubara merupakan salah satu hasil tambang yang termasuk salah satu bahan bakar fosil. Pemerintah mencanangkan penggunaan energi alternatif dan diversifikasi bahan bakar untuk mengurangi beban APBN. Diversifikasi bahan bakar salah satunya adalah batubara yang cadangannya masih banyak Berdasarkan data dari BP Statistical Review of World Energy 2013 cadangan terbukti batu bara indonesia untuk jenis anthracite dan bituminus sebesar 1520 juta ton dan untuk jenis subbituminous dan lignite sebesar 4009 juta ton. sedangkan pada tingkat dunia cadangan batubara sebesar 404762 juta ton untuk jenis anthracite dan bituminus, untuk jenis Subbituminous dan lignite sebesar 456176 juta ton[1].

Batubara memiliki tiga metode konversi secara thermochemical, yaitu pirolisis, gasifikasi dan pembakaran seperti Gambar 1. Perbedaan jenis konversi tersebut terletak pada banyaknya udara (oksigen) yang dikonsumsi saat proses konversi berlangsung. Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO , CH_4 , dan H_2) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas. Keseluruhan proses gasifikasi terjadi di dalam reaktor gasifikasi yang dikenal dengan nama *gasifier*. Di dalam *gasifier* inilah terjadi suatu proses pemanasan sampai temperatur reaksi tertentu dan selanjutnya bahan bakar tersebut melalui proses pembakaran dengan bereaksi terhadap oksigen untuk kemudian dihasilkan gas mampu bakar dan sisa hasil pembakaran lainnya. Dalam proses gasifikasi terdapat berbagai macam jenis *gasifier* yang digunakan, tipe *gasifier* secara garis besar yaitu fixed bed, entrained flow dan

fluidized bed, perbedaan diantara ketiganya adalah dalam hal bagaimana bahan bakar (batubara) dan oxidizer masuk ke reaktor [2].

Dalam penelitian ini kami menggunakan *gasifier* tipe fixed bed updraft. *Gasifier* tipe updraft adalah salah satu yang paling sederhana dan tertua dari semua desain. *Gasifiers* tipe updraft memiliki kelebihan yaitu bisa menggunakan bahan bakar yang memiliki kandungan ash (hingga 15%) dan high moisture content (hingga 50%), sedangkan kelemahan dari *gasifier* tipe updraft adalah menghasilkan tar dalam jumlah yang tinggi (50–100 g/Nm³) [3]. Pada tipe ini, *gasifying agent* (udara, oksigen, atau uap) desemburkan ke atas, sementara bahan bakar bergerak ke bawah, dan dengan demikian gas dan padatan dalam arah yang berlawanan. Gas produk keluar dari bagian atas *gasifier*. Media gasifikasi (*gasifying agent*) memasuki reaktor melalui grate atau distributor, di mana ia bertemu dengan abu panas. Abu turun melalui grate yang sering dibuat bergerak (berputar atau reciprocating). *Gasifier* tipe updraft memiliki 4 (empat) zona yaitu zona drying, pyrolysis, gasification, dan oxidation seperti pada Gambar 2. Reaksi kimia yang terjadi di *gasifier* tipe updraft adalah:

Drying zone:



Pyrolysis Zone

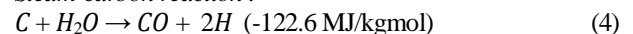


Gasification (reduction)

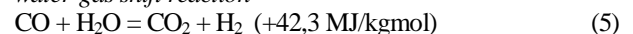
Boudouard reaction



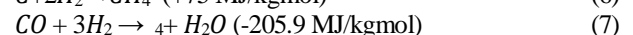
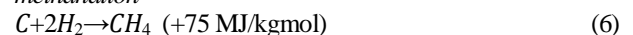
Steam-carbon reaction :



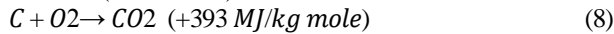
water-gas shift reaction



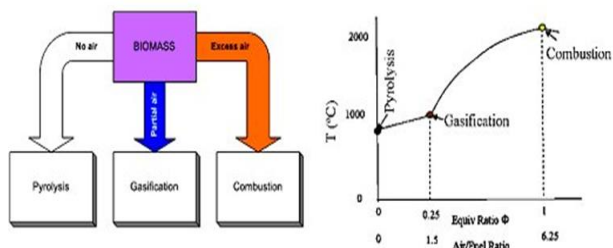
methanation



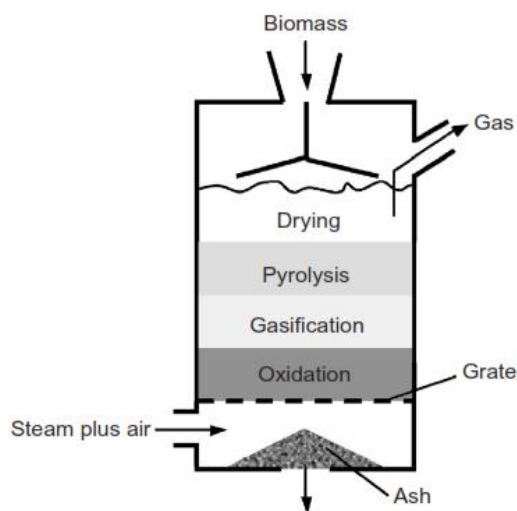
Oksidasi (combustion)



Telah banyak penelitian yang dilakukan oleh peneliti terdahulu tentang pengaruh variasi equivalence ratio pada gasifikasi. Feiqiang Guo dkk [4] melakukan penelitian gasifikasi dengan bahan bakar biomasa *corn stalk* dengan ER 0,18-0,37 (equivalence ratio) pada gasifier tipe downdraft dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada ER 0,25-0,27, dihasilkan gas produk dalam kondisi terbaik dimana memiliki LHV sekitar 5400 kJ/m³ dan cold gas efficiency 65%. Meningkatnya LHV dikarenakan meningkatnya kandungan H₂ dan CO. Wei Chen dkk [5] melakukan penelitian dengan gasifier tipe updraft dengan ER 0,23;0,27;0,31;0,37 dengan menggunakan bahan bakar mesquite (*Prosopis glandulosa*) dan redberry juniper (*Juniperus pinchotii*) hasilnya HHV berkisar antara 3500 kJ/Nm³ - 3900 kJ/Nm³ pada juniper dan antara 2400 kJ/m³ - 3500 kJ/Nm³ pada mesquite saat ER turun dari 0,37 ke 0,23. Dan produksi syngas menghasilkan 2,4 - 1,44 Nm³/kg biomassa juniper dan 2,4-1,37 Nm³/kg biomassa mesquite saat ER ER turun dari 0,37 ke 0,23. Jika Nitrogen dihilangkan dalam peranannya sebagai gasifying agent maka HHV dari CH₄ saat ER 0,37 meningkat sebesar 26% pada mesquite dan 28% pada juniper.



Gambar 1. metode konversi secara thermochemica



Gambar 2. Zona zona pada gasifier Updraft

2. METODOLOGI

Properti batubara

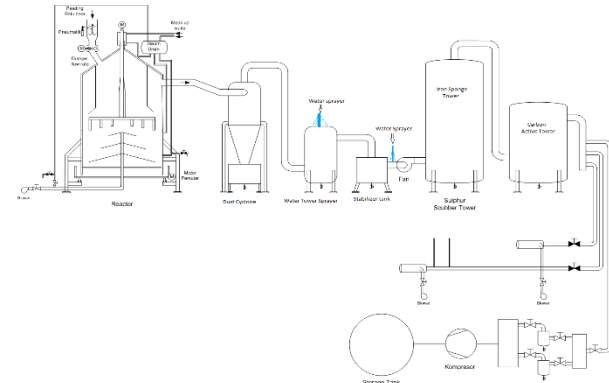
Batubara yang digunakan dalam penelitian ini adalah batubara tipe sub-bituminus dengan dengan ukuran 2-4 cm. Properti batubara penting untuk menentukan AFR_{stoich} yang nantinya digunakan untuk menentukan ER.

Tabel 1. Analisa proximate dan ultimate batubara sub-bituminus

Proximate %				Ultimate %					LHV
Mois- ture	Fly ash	Abu	Fixed Carbon	C	H	N	O	S	
8,67	38,84	3,12	49,39	69,16	5,14	0,14	25,38	0,18	5437,8 kkal/kg

Fasilitas pengujian gasifikasi

Fasilitas gasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah gasifier tipe fixed bed updraft milik perusahaan Gending di Sidoarjo Jawa Timur.



Gambar 3. sketsa diagram fasilitas dan alat ukur pengujian



Gambar 4. fasilitas gasifikasi

Fasilitas gasifikasi terdiri dari 2 bagian utama yaitu reaktor dan cleaning system. Reaktor yang digunakan adalah tipe updraft dengan dimensi tinggi 3,7 meter dan diameter dalam 2,8 meter. Reaktor dilindungi oleh bata api untuk mengurangi panas yang hilang. Pemasukan udara dari blower ke reaktor melalui grate berbentuk piramida. *Cleaning system* terdiri atas *cyclone*, *water tower sprayer*, *stabilizer tank* berisi air, *iron sponge tower*, dan *carbon active tower*.

Dalam penelitian ini dipasang alat ukur yang berfungsi untuk melengkapi data-data yang dibutuhkan. Thermocouple yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 3 buah yaitu T1 yang terletak 50 cm dari dasar reaktor, T2 yang terletak pada bagian paling atas dari reaktor memiliki panjang thermocouple 2 meter. Dan T3 merupakan thermocouple yang dipasang pada sisi burner untuk mengetahui temperatur pembakaran dari syngas.

Untuk mengukur debit dari gasifying agent (udara) yang dihembuskan blower dipasang manometer U. Manometer U juga dipasang pada pipa burner untuk mengetahui besar debit syngas yang dihasilkan dari proses gasifikasi.

Prosedur pengambilan data

Pengambilan data dilakukan saat reaktor sudah mengalami 2 kali feeding awal untuk pemanasan awal. Setiap kali feeding batubara yang di masukkan ke dalam reaktor sebanyak 80 kg. Untuk setiap kali feeding acuannya adalah suhu di T1 (thermocouple 1) sebesar 975°C. Waktu konsumsi batubara dihitung sejak awal feeding hingga temperatur T1 mencapai 975°C.

Suhu di T1, T2, dan T3 dicatat setiap 10 menit sekali. Perbedaan ketinggian manometer U diamati tiap 10 menit sekali. Untuk memvariasikan equivalence ratio maka kita memvariasikan putaran blower sehingga debit udara yang di hembuskan oleh blower ke dalam reaktor bervariasi pula. Putaran blower divariasikan sebanyak 6 variasi.

Sample Syngas dan pengukuran

Sample gas diambil dengan menggunakan plastic gas sample bag seperti pada Gambar 5. Dalam penelitian ini diambil 1 sample dari equivalence ratio 0,28. Sample gas diambil pada saat 30 menit setelah feeding dan diambil pada pipa burner. Jadi syngas yang dimasukkan sample bag telah melalui proses cleaning.



Gambar 5. Plastic Sample bag

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh equivalence ratio terhadap distribusi temperatur

Definisi *equivalence ratio* (ER) adalah rasio antara AFR aktual dibanding AFR stoikiometri berdasarkan data pada *daf* (*dry ash free*) basis [3] dihitung menggunakan persamaan (10). ER merupakan salah satu parameter penting dalam proses gasifikasi karena ER berdampak kualitas dan kuantitas pada syngas yang diproduksi. Dampak dari ER seperti komposisi syngas, heating value, dan kandungan tar. Perubahan ER dapat dilakukan dengan perubahan feeding rate udara ke dalam reaktor, sedangkan feeding rate batubara dijaga konstan sebesar 80 kg.

$$ER = \frac{\left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} (daf) \right)_{aktual}}{\left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} (daf) \right)_{stoich}} \quad (10)$$

Sedangkan $\left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} (daf) \right)_{stoich}$ merupakan jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran sempurna yang dirumuskan:

$$C_xH_yO_z + \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right) (O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + \frac{\beta}{2}H_2O + 3.76 \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right) N_2 \quad (11)$$

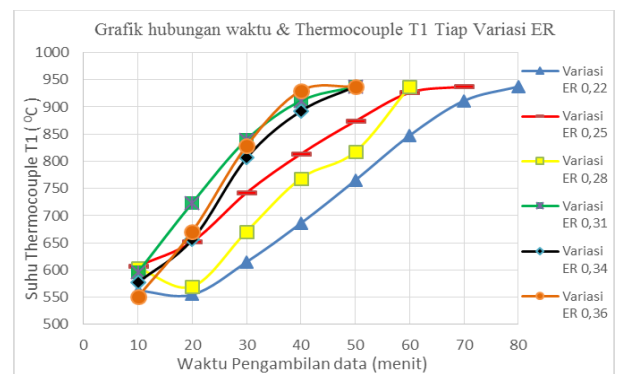
$$A/F_{stoich} = 4.76 \cdot \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right) \cdot \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (12)$$

Dimana : Mw air = molecular weight air (28,85)

Mw fuel = molecular weight fuel (99,68)

Dari hasil perhitungan berdasarkan data maka AFR_{stoich} yaitu sebesar 8,610993.

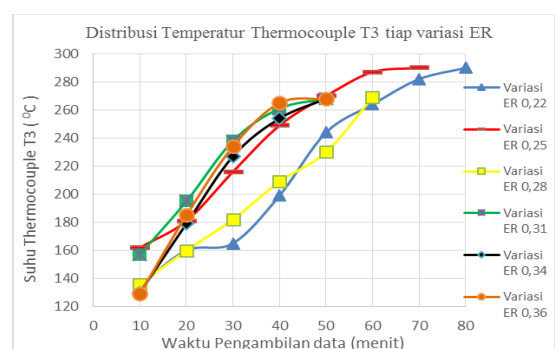
Variasi equivalence ratio dalam penelitian ini adalah 0,22 ; 0,25; 0,28; 0,31; 0,34; 0,36.



Gambar 6. Grafik hubungan Waktu dan suhu di T1

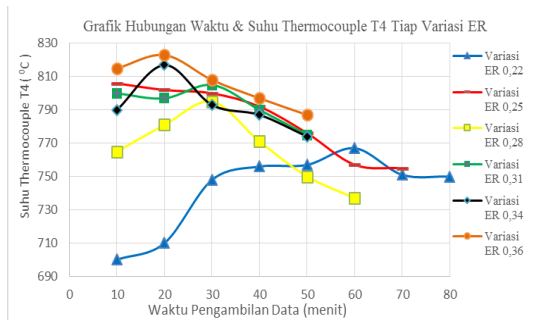
Gambar 6 merupakan grafik hubungan antara waktu dan suhu thermocouple T1 yang terletak 50 cm dari bawah. Thermocouple yang dipasang pada T1 merupakan thermocouple yang terletak pada zona oksidasi (combustion) dimana proses ini menghasilkan panas (*reaksi eksoterm*). Proses ini dipengaruhi distribusi oksigen yang di hembuskan oleh blower tiup. Karena adanya oksigen inilah, terjadi reaksi eksoterm yang menghasilkan panas, yang dibutuhkan dalam keseluruhan proses gasifikasi ini.

Dari gambar 6 terlihat bahwa pada ER 0,22 kenaikan temperatur pada daerah zona oksidasi paling rendah dibandingkan variasi lainnya. Hal ini disebabkan oleh sedikitnya suplay udara yang masuk ke dalam reaktor sehingga pembakarannya cenderung mendekati sempurna.



Gambar 7. Grafik hubungan waktu & suhu di T2

Gambar 7 menunjukkan perubahan suhu thermocouple T2 yang terpasang pada bagian atas reaktor dengan panjang ke bawah 2 meter. Dari grafik suhu thermocouple T2 menunjukkan bahwa pada jarak 2 meter dari atas reaktor suhu tidak terlalu tinggi yaitu dibawah 300°C sehingga dapat disimpulkan bahwa pada jarak 2 meter dari reaktor masuk ke dalam zona drying. Dimana zona drying berfungsi untuk mengurangi kadar air (moisture) yang terkandung di dalam batubara



Gambar 8. Grafik hubungan waktu & suhu di T3

Dari Gambar 8 tampak bahwa variasi ER 0,36 menghasilkan pencatatan temperatur yang relatif tinggi dibandingkan dengan variasi *equivalence ratio* lainnya. Hal ini akibat meningkatnya kandungan *flammable* gas saat ER semakin tinggi.

Komposisi Syngas Dan η Cold Gas

Komposisi syngas dengan *equivalence ratio* 0,28 di Lemigas menunjukkan bahwa komposisi Nitrogen sebesar 45,698; komposisi karbondioksida (CO_2) sebesar 6,608%, karbon monoksida (CO) sebesar 28,248 %, Hidrogen sebesar 16,459% ,Etana 0,201%, propana sebesar 0,1490%, N-butana sebesar 0,0148%. Sedangkan LHV dari syngas dengan pengujian pada *equivalence ratio* 0,28 sebesar 5319,455 KJ/m^3 . Dari data hasil pengujian komposisi syngas menunjukkan bahwa LHV dari ER 0,28 cukup baik yaitu sebesar 5319,455 KJ/m^3 dikarenakan untuk gasifying agent berupa udara rentang LHV nya yaitu antara 4000-5600 KJ/m^3 [6].

Evaluasi efisiensi cold gas pada proses gasifikasi diperlukan untuk mengetahui pengaruh variasi ER terhadap tingkat konversi energi pada keseluruhan sistem gasifikasi . Oleh karena itu *sample* komposisi syngas diambil pada daerah setelah cleaning system. Rumus η Cold Gas ditunjukkan pada persamaan (13)

$$\eta_{cg} = \frac{LHV_g f_g}{LHV_f f_f} \quad (13)$$

Efisiensi cold gas pada ER 0,28 sebesar 79,26489866%

Visualisasi warna api



Gambar 9. Visualisasi warna api pembakaran syngas ER 0,22

Warna api pada ER 0,22 cenderung bewarna didominasi kuning. Hal ini menunjukkan bahwa temperaturnya rendah di bawah 1000°C . Hal ini sesuai dengan Gambar 8 yang menunjukkan bahwa temperatur tertinggi dari pembakaran syngas adalah sebesar 767°C .



Gambar 10. Visualisasi warna api pada ER 0,28

Dari Gambar 11 tampak dari sumber api memiliki warna yang menunjukkan warna ke biruan walaupun tetap dominan warna kuning. Hal ini menunjukkan bahwa pada syngas hasil gasifikasi dengan ER 0,28 memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan ER 0,22. Dimana pada ER 0,28 memiliki temperatur pembakaran syngas tertinggi sebesar 795°C .



Gambar 11. Visualisasi warna api pada ER 0,36

Pada visualisasi api dengan ER 0,36 terlihat bahwa warna api semakin mendekati warna ke biruan dibandingkan dengan ER 0,28 dan 0,22. Hal ini sesuai dengan grafik temperatur pada T3 dimana temperatur tertinggi dari pembakaran syngas dengan ER 0,36 adalah 823°C .

4. KESIMPULAN

- Semakin tinggi ER maka semakin tinggi pula temperatur yang ditunjukkan pada zona oksidasi karena pembakaran mendekati sempurna
- Komposisi syngas dengan *equivalence ratio* 0,28 di Lemigas menunjukkan bahwa komposisi Nitrogen sebesar 45,698; komposisi karbondioksida (CO_2) sebesar 6,608%, karbon monoksida (CO) sebesar 28,248%, Hidrogen sebesar 16,459% ,Etana 0,201%, propana sebesar 0,1490%, N-butana sebesar 0,0148%
- Efisiensi cold gas pada ER 0,28 sebesar 79,26489866%
- LHV pada ER 0,28 sebesar 5319,455 KJ/m^3



5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dudley Bob, "BP Statistical Review of World Energy June 2013", British Petroleum, Inggris, Juni 2013.
- [2] Basu, Prabir, Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction Practical Design and Theory, 2nd edition, Elsevier, San Diego, USA, 2013.
- [3] S. Chopra and A. Jain. "A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass". Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Invited Overview No. 5. Vol. IX. April, 2007.
- [4] Guo Feiqiang, Dong Yuping, dan Dong Lei, "Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study", Sciencedirect, International Journal Of Hydrogen Energy, No.39, Tahun 2014, hal. 5625-5633.
- [5] Chen Wei, Annamalai Kalyan, dkk, "Updraft fixed Bed Gasification Of Mesquite And Juniper Wood Samples", Sciencedirect, Journal Energy no 41, Tahun 2012, hal 454-461.
- [6] Hasler, P., and Th. Nussbaumer (1999). Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. Journal of Biomass and Bioenergy 16, 385-395

SEPARASI ALIRAN MELINTASI “BUMP” DENGAN RADIUS KELENGKUNGAN YANG BESAR

Sutardi¹⁾ dan Guntur Muda A. A.

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri
ITS Surabaya Indonesia 60111,

¹⁾ Email: sutardi@me.its.ac.id

ABSTRAK

Interaksi antara aliran fluida dengan permukaan padat selalu menghasilkan lapisan tipis di dekat dinding yang disebut dengan *boundary layer* (lapis batas). Didalam lapis batas yang ketebalannya sangat kecil dibandingkan dengan dimensi aliran secara global, terjadi tegangan gesek (gesekan) akibat aksi dari viskositas fluida. Bila tegangan gesek ini berkombinasi dengan gradien tekanan balik, atau *adverse pressure gradient*, aliran *boundary layer* cenderung untuk mengalami separasi. Bila separasi terjadi, maka timbullah kerugian aliran yang berlipat ganda, yaitu kerugian akibat gesekan dan kerugian akibat separasi aliran. Separasi aliran melintasi bump dapat ditunda dengan penambahan ketirusan pada pertemuan kontur bump dengan kontur permukaan dimana bump tersebut terpasang. Studi kali ini difokuskan pada evaluasi pengaruh penambahan ketirusan pada bump terhadap kemungkinan terjadinya penundaan separasi pada permukaan bump. Studi ini dilakukan secara eksperimen dan numerik. Studi eksperimen dilakukan dengan menggunakan subsonic wind tunnel siklus terbuka. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai didalam tunnel ini sebesar sekitar 20 m/detik dengan intensitas turbulensi sekitar 0.8%. Pengujian dilakukan pada kecepatan freestream sebesar 15.5 m/s yang bersesuaian dengan bilangan Reynolds berdasar tinggi bump sebesar kurang lebih 26,000. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan menggunakan total pressure tube. Tekanan di sepanjang permukaan bump dan pelat datar diukur menggunakan pressure tap yang dihubungkan dengan manometer cairan (*liquid manometer*). Perangkat lunak Fluent 6.3.26 digunakan untuk mensimulasikan aliran di sekitar bump. Model turbulen yang digunakan adalah $k-\omega$ shear-stress transport (SST). Hasil studi menunjukkan bahwa separasi aliran dapat sedikit tertunda ke belakang akibat penambahan ketirusan pada bump. Selain itu, koefisien drag (C_D) dari bump sedikit berkurang dibandingkan dengan bump tanpa ketirusan sebesar ~ 17%, yang nilainya hampir bersesuaian dari hasil simulasi numerik yaitu sekitar 20%. Selain dievaluasi mengenai drag, didalam studi ini juga dievaluasi mengenai sifat-sifat lapisan batas lainnya yang meliputi profil kecepatan dan ketebalan lapisan batas (δ).

Kata kunci: *boundary layer, bump, wind tunnel, separasi aliran, koefisien drag.*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan aliran lapis batas (*boundary layer*) diatas permukaan padat (*solid surface*) sangat dipengaruhi oleh nilai gradien tekanan (*pressure gradient*) yang ada. Gradien tekanan yang terjadi didalam aliran tersebut secara umum dikelompokkan menjadi tiga: gradien tekanan nol (*zero pressure gradient*), gradien tekanan negatif (sering disebut sebagai *favorable pressure gradient*), dan gradien tekanan positif (sering disebut sebagai *adverse pressure gradient*). Studi tentang aliran lapis batas (*boundary layer*) untuk pelat datar telah banyak dilakukan, baik secara numerik [1][2][3], maupun eksperimen [4][5][6]. Aliran lapis batas untuk kasus gradien tekanan nol dapat digunakan untuk memprediksi karakteristik perkembangan lapis batas pada lambung kapal, misalnya, dimana perubahan tekanan dapat dikatakan relatif kecil. Perkembangan lapis batas yang mengalami perubahan tekanan lebih banyak aplikasinya, seperti aliran lapis batas pada permukaan silinder dan elips, dan perkembangan lapis batas untuk aliran didalam nozzle dan difuser. Perkembangan lapis batas yang mengalami gradien tekanan positif lebih menarik para peneliti karena adanya kemungkinan lapis batas terpisah dari permukaan (*flow separation*). Salah satu kajian perkembangan lapis batas yang mengalami gradien tekanan positif ialah yang telah dilakukan oleh Coles [7]. Contoh lain aliran lapis batas yang mengalami kenaikan tekanan atau gradien tekanan positif ialah aliran lapis batas yang berkembang diatas permukaan bump [8][9][10]. Karena sangat banyak kasus aliran lapis batas yang mengalami perubahan tekanan, maka studi kali ini difokuskan pada studi

aliran lapis batas yang berkembang diatas permukaan lengkung (bump). Kelengkungan bump dibuat cukup besar untuk menghindari terjadinya separasi aliran yang terlalu awal. Bump yang dievaluasi ialah yang memiliki penambahan ketirusan pada sisi upstream dan downstream dan bump yang tidak dimodifikasi dengan ketirusan. Parameter yang dikaji meliputi separasi aliran, gaya drag, profil kecepatan, dan perkembangan lapis batas.

2. METODOLOGI

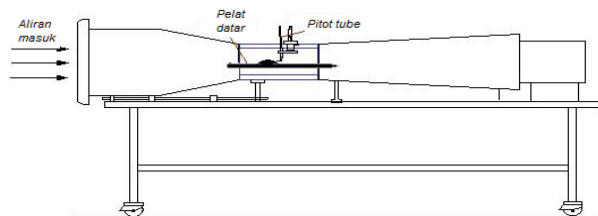
Studi dilakukan secara eksperimen dan numerik. Studi eksperimen dilakukan menggunakan wind tunnel berkecepatan rendah dimana kecepatan maksimum yang dapat dibangkitkan sebesar 20 m/det dengan intensitas turbulensi sekitar 0.8% [11]. Penampang uji berbentuk oktagonal dengan tinggi dan lebar maksimum masing-masing sekitar 30 cm, dengan panjang *test section* sebesar 45 cm. Pengujian dilakukan pada kecepatan *freestream* sebesar 15.5 m/s yang bersesuaian dengan bilangan Reynolds berdasar tinggi bump sebesar kurang lebih 26,000. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan menggunakan total pressure tube. Tekanan di sepanjang permukaan bump dan pelat datar diukur menggunakan pressure tap yang dihubungkan dengan manometer cairan (*liquid manometer*) dengan *specific gravity* (SG) = 0.82. Sudut kemiringan manometer dibuat sebesar 15° untuk memperbesar ketelitian pembacaan perbedaan ketinggian muka cairan pengukur tekanan. Total pressure tube (Preston tube) dapat digerakkan secara vertikal dengan bantuan mikrometer. Secara skematik, diagram



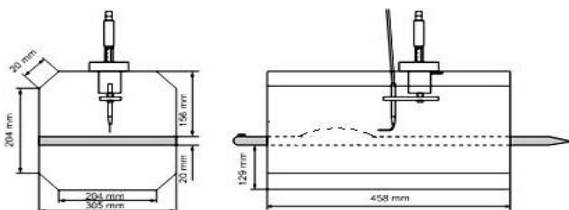
peralatan eksperimen dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2. Sementara itu, model uji (gambar 3) terdiri atas pelat datar yang dilengkapi dengan bump, baik tanpa ketirusan (Gambar 3a), maupun dengan ketirusan (gambar 3b). Dimensi dari model uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi dari model uji

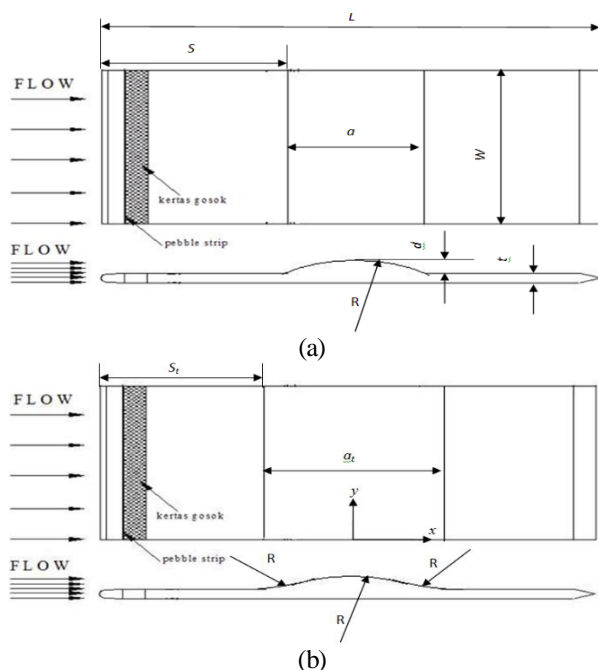
Parameter	Ukuran (mm)
Panjang plat (L)	691
Lebar bump tanpa ketirusan (a)	191
Lebar bump dengan ketirusan (a_t)	275
Lebar plat (W)	310
Ketinggian bump (d)	25.6
Tebal plat (t)	19
Jari-jari bump (R)	191
Panjang plat sebelum bump tanpa ketirusan (S)	230
Panjang plat sebelum bump dengan ketirusan (S_t)	208



Gambar 1. Subsonic Open Circuit Wind Tunnel.



Gambar 2. Penempatan model (benda uji) didalam wind tunnel test section.



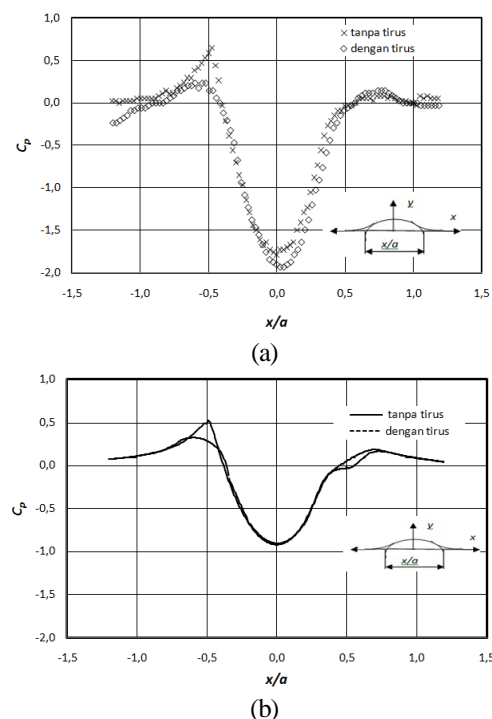
Gambar 3. Plat datar dengan bump (a) tanpa ketirusan (b) dengan ketirusan

3. HASIL DAN ANALISA

Koefisien Tekanan (C_p)

Gambar 4a menunjukkan distribusi tekanan pada permukaan bump tanpa dan dengan ketirusan dari hasil eksperimen. Distribusi tekanan ini dinyatakan dalam bentuk bilangan tanpa dimensi yaitu koefisien tekanan (*pressure coefficient*, C_p). Pada sisi upstream, pengaruh penempatan ketirusan cukup signifikan terhadap distribusi C_p , yaitu yang ditunjukkan dengan penurunan nilai C_p maksimum untuk bump dengan ketirusan. Nilai C_p maksimum yang lebih tinggi ($\sim 0,7$) untuk bump tanpa ketirusan pada lokasi $x/a = -0,5$ menandakan adanya proses perlambatan yang kuat di sisi upstream untuk kasus bump tanpa ketirusan dibandingkan dengan bump dengan ketirusan. Selanjutnya, proses percepatan dan perlambatan aliran pada permukaan bump dengan dan tanpa dengan ketirusan pada permukaan bump berjalan hampir serupa. Disisi downstream dari bump, distribusi tekanan untuk bump dengan dan tanpa dengan ketirusan menunjukkan keserupaan yang baik walaupun nilai C_p untuk bump dengan ketirusan sedikit lebih tinggi daripada C_p untuk bump tanpa ketirusan ($\sim 7\%$). Secara kualitatif, distribusi tekanan untuk bump dengan ketirusan akan menghasilkan gaya drag akibat tekanan lebih rendah daripada yang terjadi pada bump tanpa ketirusan. Hal ini akan diuraikan kemudian dalam analisa gaya drag.

Gambar 4b menunjukkan distribusi tekanan pada permukaan bump tanpa dan dengan ketirusan dari hasil simulasi numerik. Secara kualitatif, hasil simulasi numerik menunjukkan keserupaan yang sangat baik dengan hasil eksperimen. Nilai tertinggi dari C_p terjadi pada lokasi yang serupa, yaitu pada $x/a = -0,5$, walaupun dengan nilai C_p yang lebih rendah daripada hasil eksperimen. Perbedaan yang agak signifikan ialah nilai tekanan minimum yang terjadi pada puncak bump.



Gambar 4. Distribusi koefisien tekanan untuk bump tanpa ketirusan dan dengan ketirusan (a) Hasil eksperimen (b) Hasil simulasi numerik.

Profil Kecepatan

Gambar 5a menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran hasil eksperimen pada sisi upstream dan downstream dari bump tanpa ketirusan sedangkan gambar 5b menunjukkan distribusi profil kecepatan seperti pada Gambar 5a tetapi untuk bump dengan ketirusan. Pada sisi upstream, profil kecepatan untuk bump tanpa dan dengan ketirusan menunjukkan kesamaan yang baik, demikian pula profil kecepatan yang berada pada permukaan bump ($x/a = 0,0$). Perbedaan antara profil kecepatan pada bump dengan ketirusan dan pada bump tanpa dengan ketirusan terlihat pada sisi downstream dari bump. Untuk bump tanpa ketirusan, profil kecepatan menunjukkan adanya daerah terseparasi, sementara untuk bump dengan ketirusan, tidak terlihat dengan jelas adanya daerah terseparasi. Daerah terseparasi pada sisi downstream dari bump tanpa ketirusan ditunjukkan oleh profil kecepatan yang bernilai nol di daerah dekat dinding (perhatikan profil kecepatan pada $x/a=0,5$ dan $x/a=0,55$). Walaupun profil kecepatan di daerah downstream dari bump tanpa ketirusan menunjukkan adanya gejala separasi aliran, letak titik separasi yang tepat sulit untuk ditentukan.

Untuk mengevaluasi letak titik separasi pada permukaan bump, maka digunakanlah distribusi profil kecepatan pada permukaan bump yang diperoleh dari simulasi numerik. Gambar 6a menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran hasil simulasi numerik pada permukaan bump tanpa ketirusan sedangkan gambar 6b menunjukkan distribusi profil kecepatan seperti pada Gambar 6a tetapi untuk bump dengan ketirusan. Berdasarkan gambar 6a, titik separasi aliran terjadi pada permukaan bump tanpa ketirusan pada posisi $x/a \approx 0,34$, sedangkan untuk bump dengan ketirusan, titik separasi aliran terjadi pada posisi $x/a \approx 0,39$ (Tabel 2). Dengan demikian dapat diharapkan bahwa luasan daerah separasi aliran untuk bump dengan ketirusan akan lebih sempit dibandingkan dengan daerah separasi untuk bump tanpa ketirusan.

Sesudah terseparasi dari permukaan bump, aliran *re-attached* pada dinding datar di sisi downstream dari bump. Lokasi titik *re-attachement* ini dapat diperkirakan berdasarkan bentuk profil kecepatan yang terjadi pada sisi downstream tersebut. Berdasarkan hasil eksperimen, titik *re-attachement* berada pada lokasi sekitar $x/a=0,6$ untuk bump tanpa ketirusan. Namun demikian, lokasi titik *re-attachement* ini sulit diidentifikasi secara eksperimen untuk kasus bump dengan ketirusan. Dari hasil simulasi numerik, lokasi titik *re-attachement* ini berada pada $x/a=0,65$ untuk bump tanpa ketirusan, dan pada $x/a = 0,52$ untuk bump dengan ketirusan. Tabel 3 memberikan ringkasan lokasi-lokasi titik *re-attachement* dari hasil eksperimen dan numerik untuk kasus bump dengan dan tanpa dengan ketirusan.

Tabel 2. Lokasi titik separasi.

	Lokasi titik separasi (x/a)	
	Eksperimen	Numerik
Tanpa ketirusan	*	0.34
Dengan ketirusan	*	0.39

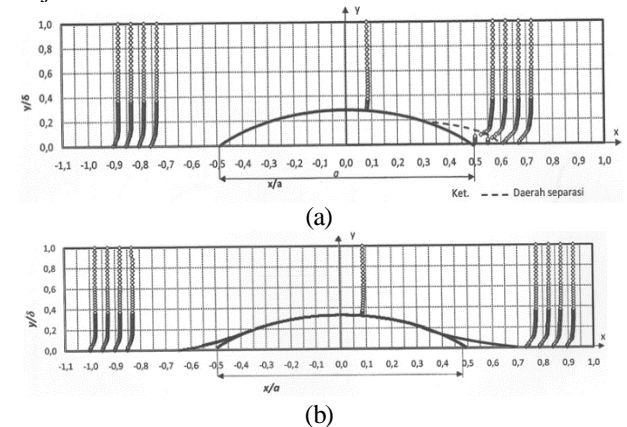
Catatan: * : titik separasi tidak teridentifikasi

Tabel 3. Lokasi titik *reattachment*.

	Lokasi titik <i>reattachment</i> (x/a)	
	Eksperimen	Numerik
Tanpa ketirusan	0.60	0.65
Dengan ketirusan	*	0.52

Catatan: * : titik *reattachment* tidak teridentifikasi

Untuk memperjelas fenomena aliran terseparasi (*separated flow*) dan aliran menempel kembali (*re-attached flow*), maka digunakan visualisasi *particle pathline* dari hasil simulasi numerik di sekitar downstream bump seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7a terlihat bahwa daerah terseparasi atau luasan vorteks di belakang bump tanpa ketirusan lebih luas daripada luasan vorteks di belakang bump dengan ketirusan (Gambar 7b). Telah diketahui bahwa luasan daerah terseparasi atau yang juga dikenal dengan daerah *wake* berpengaruh sangat signifikan terhadap gaya drag total yang terjadi.



Gambar 5. Distribusi profil kecepatan aliran hasil eksperimen pada sisi upstream dan downstream dari bump (a) Tanpa ketirusan (b) Dengan ketirusan

Gaya Drag

Gaya drag total yang terjadi pada permukaan pelat datar dan pada permukaan bump dikontrol oleh gaya drag akibat distribusi tekanan dan gaya drag akibat gaya viskos yang bekerja pada permukaan. Secara eksperimen, gaya drag total ini dihitung berdasarkan perubahan momentum aliran dari sisi upstream dari bump ke sisi *downstream* dari bump, sedangkan gaya drag tekanan diperoleh dengan cara mengintegrasikan distribusi tekanan pada seluruh permukaan yang dievaluasi (permukaan pelat datar dan permukaan bump). Gaya drag akibat viskos dihitung berdasarkan selisih antara gaya drag total dengan gaya drag akibat tekanan. Sementara itu, gaya-gaya drag dari hasil simulasi numerik diperoleh berdasarkan distribusi tekanan pada permukaan dan distribusi tegangan gesek pada dinding pada seluruh domain yang dianalisa. Tabel 4 menunjukkan drag tekanan, drag gesek viskos, dan drag total pada permukaan bump, baik secara eksperimen maupun numerik.

Tabel 4. Koefisien Drag (C_D) yang terjadi pada bump

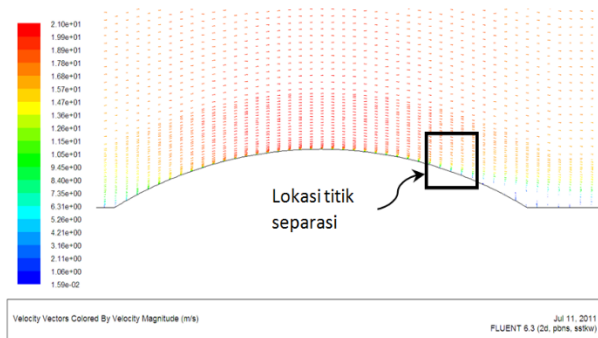
	Koefisien drag (C_D)					
	Eksperimen			Numerik		
	CD_p	CD_f	CD_t	CD_p	CD_f	CD_t
Tanpa ketirusan	0.459	0.323	0.782	0.580	0.234	0.814
Dengan ketirusan	0.421	0.230	0.651	0.435	0.213	0.648
Penurunan $C_{D,t}$	17%			20 %		

Catatan: CD_p = drag tekanan, CD_f = drag gesek viskos, CD_t = drag total.

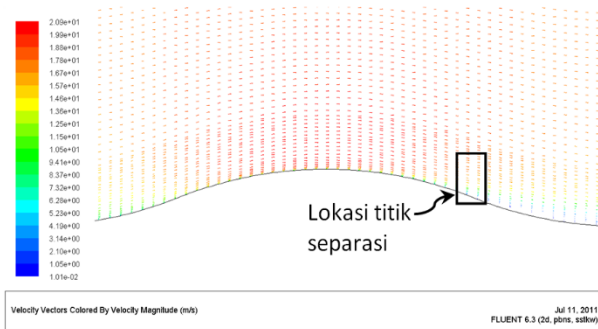
Perkembangan Ketebalan Lapis Batas

Gambar 8a menunjukkan perkembangan lapis batas di sisi upstream bump dari hasil simulasi numerik, baik untuk bump

dengan ketirusan maupun bump tanpa ketirusan. Terlihat dari gambar bahwa ketirusan tidak berpengaruh terhadap perkembangan lapis batas pada sisi upstream dari bump. Hal ini merupakan sebuah kewajaran karena tingkat gradien tekanan yang tidak terlalu kuat. Sementara itu, gambar 8b menunjukkan perkembangan lapis batas di sisi downstream bump dari hasil simulasi numerik, baik untuk bump dengan ketirusan maupun bump tanpa ketirusan. Dengan penambahan ketirusan, boundary layer pada sisi downstream berkembang dengan *slope* negatif yang lebih kuat dibandingkan perkembangan boundary layer akibat bump tanpa ketirusan. Hal ini dikarenakan faktor ketirusan memberikan keleluasaan aliran untuk beradaptasi dengan kontur permukaan lebih mudah daripada bump tanpa ketirusan.



(a)



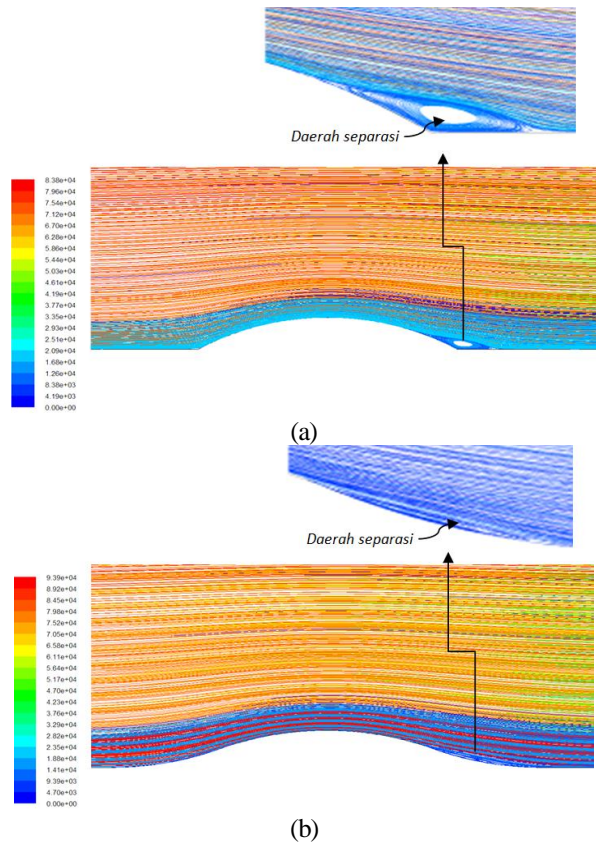
(b)

Gambar 6. Distribusi profil kecepatan aliran hasil simulasi pada permukaan bump (a) Tanpa ketirusan (b) Dengan ketirusan

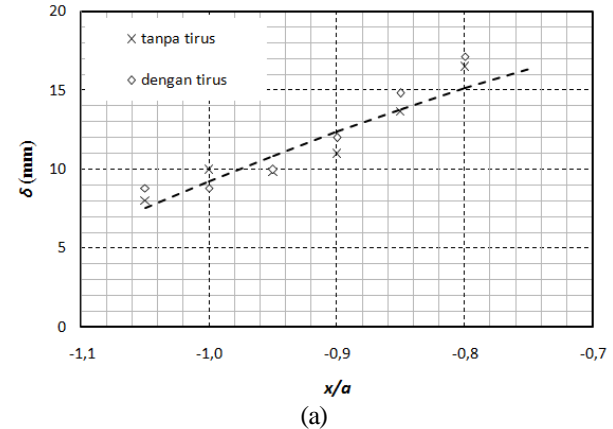
4. KESIMPULAN

Berdasarkan studi yang telah dilakukan terhadap aliran lapis batas yang melintasi permukaan bump dengan radius kelengkungan yang besar, beberapa kesimpulan dapat dirumuskan sebagai berikut:

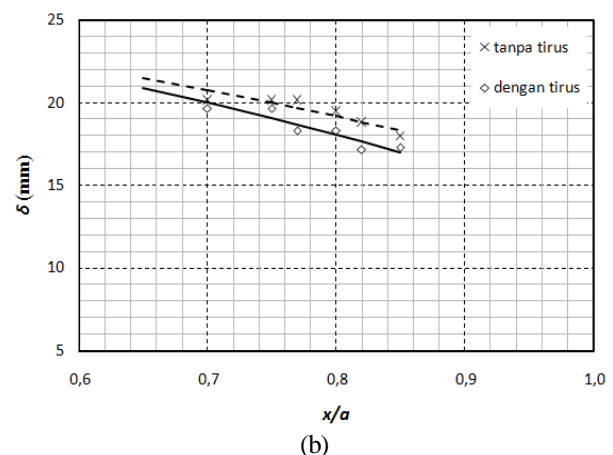
- Separasi aliran lapis batas sedikit tertunda ke belakang akibat penambahan ketirusan pada bump.
- Koefisien drag (C_D) dari bump dengan ketirusan lebih kecil dari pada bump tanpa ketirusan. C_D bump dengan ketirusan sebesar $\sim 17\%$ lebih kecil daripada bump tanpa ketirusan (hasil eksperimen) dan 20% lebih kecil daripada bump tanpa ketirusan (berdasar simulasi numerik).
- Berdasar hasil eksperimen, letak titik *re-attachment* di sisi downstream dari bump sulit ditentukan.
- Pada sisi *downstream* dari bump, perkembangan ketebalan lapisan batas (δ) dipengaruhi oleh ketirusan, sedangkan pada sisi *upstream* dari bump, perkembangan lapis batas relatif tidak terpengaruh oleh adanya ketirusan pada bump.



Gambar 7. Particle pathline aliran fluida di sekitar bump (a) Tanpa ketirusan (b) Dengan ketirusan



(a)



(b)

Gambar 8. Perkembangan lapis batas di sisi upstream (a) dan downstream (b) bump dari hasil simulasi numerik



5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Spalart, P. R., "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $Re_\theta = 1410$ ", *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, 1988, pp. 61-98.
- [2] Robinson, S. K., "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, 1991, pp. 601-639.
- [3] Qiang Li, Philipp Schlatter, Luca Brandt, & Henningson, D.S., "DNS of a Spatially Developing Turbulent Boundary Layer with Passive Scalar Transport", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 30, 2009, pp. 916-929.
- [4] Klebanoff, P. S., "Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer with Zero Pressure Gradient", *NACA Rep.* 1247, 1955.
- [5] Purtell, L. P., Klebanoff, P. S., & Buckley, F. T., "Turbulent Boundary Layer at Low Reynolds Number", *Phys. Fluids*, Vol. 24(5), 1981, pp. 802-811.
- [6] Ching, C.Y., Djenidi, L., & Antonia, R.A., "Low-Reynolds-Number Effects in a Turbulent Boundary Layer", *Experiments in Fluids*, Vol. 19, 1995, pp. 61-68.
- [7] Coles, D., "The Law of The Wake in the Turbulent Boundary Layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 1, 1956, pp. 191-226.
- [8] Webster, D. R., Degraaff, D. B., & Eaton, J. K., "Turbulence Characteristics of a Boundary Layer over a Two-Dimensional Bump", *J. Fluid Mech.*, Vol. 320, 1996, pp. 53-69.
- [9] Kim, J. & Sung, H. J., "Wall Pressure Fluctuations in a Turbulent Boundary Layer over a Bump", Korea Advanced Institute of Science and Technology, Republic of Korea, 2006.
- [10] Nurul, F., "Studi Eksperimental Pengaruh Inlet Disturbance terhadap Karakteristik Boundary Layer dan Gejala Separasi pada Pelat Lengkung", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, 2000.
- [11] Astu P. & Herman S., "Oil Streak Visualization of Fluid Flow over Single D-Type Cylinder", *World Journal of Mechanics*, Vol. 2, 2012, pp. 197-202.
- [12] Guntur, A.A., "Studi Eksperimen dan Numerik tentang Aliran Boundary Layer melintasi "Bump" dengan Radius Kelengkungan yang Besar", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, 2011.



RANCANG BANGUN VISKOMETER DIGITAL

Ridwan¹, Ridha Iskandar²

* Lab. Mekanika Fluida, Teknik Mesin FTI Universitas Gunadarma

Email: ridwan@staff.gunadarma.ac.id

** Lab. Elektronika dan Komputer FIKTI Universitas Gunadarma

Jalan Margonda Raya No. 100 Depok Jawa Barat 16424

ABSTRAK

Kekentalan (viskositas) suatu fluida/cairan sangat penting untuk diketahui karena merupakan sifat dasar dan mempengaruhi karakteristik dan performa fluida tersebut saat digunakan. Alat ukur kekentalan (viscometer) keberadaannya sangat dibutuhkan baik dari segi kuantitas maupun kualitas serta keakuratan pengukuran yang dihasilkan. Salah satu jenis viskometer yang umum digunakan saat ini adalah viskometer bola jatuh (falling ball viscometer), karena bentuknya sederhana dan dapat digunakan untuk mengukur viskositas berbagai jenis cairan. Viskometer bola jatuh yang ada saat ini masih manual sehingga kurang akurat. Pada penelitian ini dirancang, dibuat dan diujicoba suatu viskometer metode bola jatuh otomatis, pada tahap perancangan digunakan software CAD Solidworks. Viskometer ini terdiri dari bola baja dengan diameter 18 mm, dijatuhkan pada fluida uji yang berada didalam tabung akrilik transparan yang dipasang vertikal. Digunakan tiga variasi fluida uji yakni Pelumas SAE 30, SAE 40, dan SAE 50. Viskometer ini dilengkapi dengan mikrokontroler AT mega328 dan dua buah sensor photo diode yang dipasang dengan jarak 750 mm antara sensor 1 dan sensor 2, kedua sensor tersebut masing-masing dihubungkan dengan timer untuk merekam waktu yang dibutuhkan oleh bola baja dari posisi 1 ke posisi 2. kecepatan bola, massa jenis bola, dan massa jenis fluida uji, adalah variable utama yang menentukan viskositas fluida uji. Data yang didapatkan diolah, dan dianalisa, selanjutnya dibandingkan dengan data standard (tersedia). Data viskositas ditampilkan pada display LCD 16x2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa viskositas ketiga jenis fluida uji, bersesuaian dan sangat mendekati Referensi/standard viskositas tersebut dengan simpangan rata-rata 4,65%.

Kata kunci: fluida, tabung, viskometer.

1. PENDAHULUAN

Kekentalan (viskositas) suatu fluida/zat cair sangat penting diketahui karena merupakan sifat dasar dan mempengaruhi karakteristik dan performa fluida tersebut saat digunakan. Alat ukur kekentalan (viskometer) sangat dibutuhkan untuk keperluan industri dan dunia pendidikan/laboratorium. Kebutuhan alat ukur kekentalan di dalam Negeri baik kuantitas maupun kualitasnya sangat luas, misalnya pada industri pertambangan, industri kimia, makanan, keperluan laboratorium, dan lembaga penelitian/riset. Viskometer yang ada saat ini umumnya masih dioperasikan secara manual sehingga kurang akurat, juga keterbatasan variasi fluida/cairan yang dapat diukur dengan baik dan akurat. Viskometer digital yang didesain ini menggunakan metode bola jatuh. Alat ini diharapkan dapat menghasilkan suatu alat ukur viskositas yang lebih akurat dan dapat mengukur variasi cairan yang lebih banyak, dibanding viskometer yang ada saat ini utamanya viskometer pipa kapiler yang banyak memiliki keterbatasan.

Viskositas fluida menyatakan besarnya gesekan yang dialami oleh suatu fluida saat mengalir atau saat dilalui benda padat. Makin besar viskositas suatu fluida, makin sulit suatu fluida mengalir dan makin sulit suatu benda padat bergerak di dalam fluida tersebut [1,2]. Dengan kata lain viskositas suatu fluida baik cair maupun gas adalah ukuran ketahanan fluida tersebut terhadap tegangan geser antar molekul fluida dan juga interaksi molekul fluida dan permukaan benda padat maupun dinding dimana fluida tersebut mengalir. Hukum viskositas pada fluida Newtonian menyatakan bahwa laju aliran dikalikan dengan viskositas berbanding lurus terhadap tegangan geser. Untuk fluida non Newtonian dan fluida memiliki viskositas tinggi serta fluida yang mengandung zat padat seperti lumpur viskometer jenis pipa kapiler tidak cocok

digunakan, dapat menyebabkan tersumbatnya alat tersebut. Permasalahan lain pada penggunaan viskometer adalah akibat kesalahan pengambilan data dan alat ukur, utamanya bila pengambilan data dilakukan secara manual [3,4].

Pada dasarnya viskositas disebabkan karena kohesi dan pertukaran momentum molekuler diantara lapisan layer fluida pada saat fluida tersebut mengalir. Viskositas fluida ini dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya temperatur, konsentrasi larutan, dll. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk, yakni viskositas dinamik dan viskositas kinematik :[4]. Viskositas dinamik adalah perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besar nilai viskositas dinamik tergantung tegangan geser dan laju geserannya. Viskositas dinamik sering juga disebut viskositas mutlak. Dalam satuan standar Internasional (SI) mks satuan Viskositas Dinamik adalah Pascal.detik atau (kg/m.s) dalam sistem cgs disebut Poise (g/cm.s). Viskositas kinematik adalah perbandingan viskositas dinamik terhadap density atau massa jenis dari fluida tersebut. Dalam satuan SI viskositas kinematik adalah (m²/det), dan biasa juga ditulis dalam Stokes (cm²/s). [3,6].

Viskositas suatu fluida adalah sifat yang menunjukkan besar dan kecilnya tahanan dalam fluida terhadap gesekan. Fluida yang mempunyai viskositas rendah, misalnya air mempunyai tahanan dalam terhadap gesekan yang lebih kecil dibandingkan dengan fluida yang mempunyai viskositas yang lebih besar. Viskositas suatu cairan dipengaruhi oleh gaya tarik menarik antar molekul di dalam cairan tersebut. Semakin kuat gaya tarik menarik antara molekul tersebut, maka semakin sulit suatu molekul bergerak satu sama lainnya sehingga viskositasnya bertambah. Ukuran molekul yang besar memiliki gaya tarik antar molekul yang kuat, sehingga molekul ini akan memiliki nilai viskositas yang tinggi [6,7].

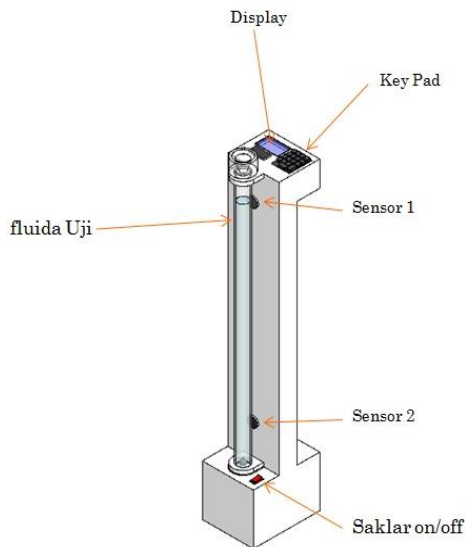
Salah satu cara atau metode untuk mengukur viskositas adalah dengan metode bola jatuh. Metode ini

menggunakan sebuah bola pejal yang dijatuhkan pada sebuah tabung yang berisi fluida yang akan diukur kekentalannya, waktu tempuh bola dicatat dari satu titik ke titik yang lain. Metode ini merupakan penerapan Hukum Stokes, Hukum Archimedes serta prinsip gaya Gravitasi benda pada fluida yang memiliki kekentalan (viskos) [8,9].

2. METODOLOGI

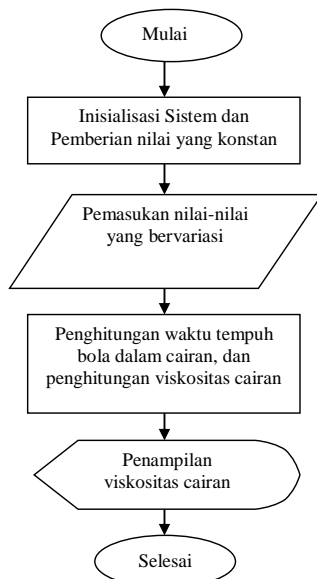
Mekanisme penelitian meliputi pembuatan alat berupa hardware dan software, hardware meliputi tabung pipa acrylic, rangka, bola logam, *sensor*, *timer*, *keypad*, *display*, dan tombol/saklar.

Berikut ini adalah desain Viskometer metode bola Jatuh yang telah dibuat dan diujicoba sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Viskometer metode Bola jatuh

Setelah pembuatan alat (*hardware*) rampung, dan semua komponen dapat berfungsi dengan baik, proses selanjutnya adalah pengambilan dan pengolahan data secara otomatis. Proses pengambilan data, pengolahan dan menampilkan data alurnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir proses perhitungan dan display

Proses pengambilan, pengolahan data sampai tahap display hasil (viskositas), adalah sebagai berikut: pertama-tama yaitu dimulai dengan inisialisasi sistem pada tahap ini pertama-tama dimasukkan variabel atau nilai konstanta yakni: konstanta percepatan gravitasi dan jarak antara kedua sensor. Tahap berikutnya adalah pemasukan nilai-nilai yang bervariasi yakni massa, dan diameter bola, serta massa jenis fluida uji. Selanjutnya penghitungan waktu tempuh bola, kecepatan bola, selanjutnya penghitungan viskositas pelumas (fluida uji). Berikut ini adalah penurunan Persamaan untuk menghitung viskositas fluida uji.

Bola pejal yang dimasukkan/ dijatuhkan ke dalam fluida viskos (cairan kental), terdapat tiga gaya bersamaan yang bekerja pada cairan dan bola tersebut yakni [1]:

Pertama Gaya Stokes (F_s), gaya yang timbul akibat gesekan antara molekul fluida (cairan uji) dengan permukaan bola. F_s adalah:

$$F_s = 6\mu \pi r V \quad (1)$$

Kedua Gaya Apung (F_a), gaya yang timbul akibat adanya massa fluida yang dipindahkan oleh bola, sebagaimana dirumuskan oleh Archimedes sebagai berikut:

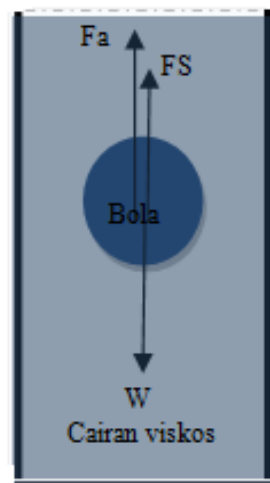
$$F_s = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_f g \quad (2)$$

Ketiga Gaya berat (W), disebabkan oleh tarikan gravitasi bumi,

$$W = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_B g \quad (3)$$

Reaksi ketiga gaya tersebut dapat dilihat pada Gambar (3). Saat bola mencapai kecepatan akhir konstan v , terjadi keseimbangan ketiga gaya tersebut adalah sebagai berikut:

$$F_s + F_a = W = mg$$



Gambar 3. Gaya-gaya pada Bola di dalam fluida

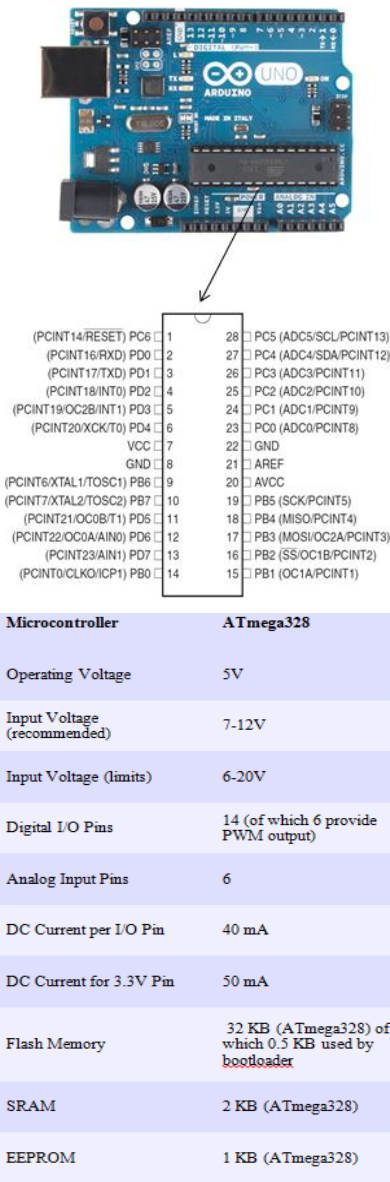
Substitusi persamaan (1), (2) dan (3), diperoleh persamaan (4). Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung viskositas ketiga jenis pelumas yang diuji yakni SAE 30, SAE 40 dan SAE 50, sebagaimana persamaan berikut:

$$\mu = \frac{2(\rho_B - \rho_F)gR^2}{9V} \quad (4)$$

Dengan:

μ adalah viskositas dinamik fluida (Pa. s), ρ_B adalah massa jenis Bola (kg/m^3), ρ_F adalah massa jenis pelumas yang diuji (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (konstanta = $9,81 \text{ m/s}^2$), serta V merupakan kecepatan terminal bola uji (m/s).

Gambar 4 adalah Mikrokontroler dan Modul Arduino Uno R3 yang digunakan untuk dapat mengeksekusi dan menampilkan hasil eksekusi program pada layar LCD.



Gambar 4. Mikrokontroler dan Modul Arduino Uno R3

Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida FTI Universitas Gunadarma.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data ketiga jenis pelumas yakni: SAE 30, SAE 40 dan SAE 50. Pada tabung pipa acrylic diameter 50 mm, dengan tinggi pipa 1100 mm, jarak antara sensor satu dan sensor dua 900 mm.

Tabel 1. Hasil pengujian dan Pengolahan Data (40 °C)

Jenis Pelumas	Referensi (cSt)	Hasil Disain (cSt)	Simpangan (%)
SAE-30	103,60	98,71	4,72
SAE-40	146,70	139,84	4,67
SAE-50	238,91	228,01	4,56

Pada Tabel 1. Terlihat hasil pengujian dengan sampel pelumas Mesran SAE 30 pada suhu 40°C diperoleh nilai rata-rata viskositas 98,71 Centi stokes (cSt), berdasarkan referensi yang dikeluarkan produsen (Pertamina), pada suhu yang

sama yakni 40°C viskositas pelumas 103,60 cSt. Hasil viskositas antara hasil pengujian viskometer yang dibuat terdapat simpangan sebesar 4,72 % dibanding dengan hasil Refrensi/standard resmi yang dikeluarkan oleh produsen pelumas tersebut, hal ini dapat disebabkan adanya ketidak sempurnaan untuk mengontrol temperatur konstan 40 °C, selama pengujian berlangsung. Selain itu juga hal ini dapat disebabkan oleh sensitivitas sensor terhadap perubahan suhu pelumas yang diuji. Serta kondisi pelumas saat diadakan pengujian.

Hasil pengujian dengan sampel pelumas Mesran SAE 40 pada suhu 40°C diperoleh nilai rata-rata viskositas 139,84 Centi stokes (cSt), berdasarkan referensi yang dikeluarkan produsen, pada suhu yang sama yakni 40°C viskositas pelumas 146,70 cSt terdapat simpangan sebesar 4,62% antara hasil pengujian pada viskometer yang dibuat dengan hasil Refrensi yang dikeluarkan oleh produsen pelumas tersebut, terlihat ada perbaikan hasil dilihat dari simpangan sebesar 0,05% dibanding dengan simpangan untuk SAE 30. Penambahan SAE yang berarti kekentalan juga meningkat sehingga sensitivitas antara sensor dan bola uji sedikit ada perbaikan, keakuratan pembacaan sensor sangat mempengaruhi record waktu bola antara sensor 1 dan sensor 2 yang juga berdampak pada nilai kecepatan yang terbaca dan berdampak pada hasil viskositas yang terukur.

Hasil pengujian dengan sampel pelumas Mesran SAE 50 pada suhu 40°C diperoleh nilai rata-rata viskositas 228,01 cSt, berdasarkan referensi yang dikeluarkan produsen, pada suhu yang sama yakni 40°C viskositas pelumas 238,91 cSt terdapat simpangan sebesar 4,56% antara hasil pengujian pada viskometer yang dibuat dengan hasil Refrensi/standard yang ada, terlihat ada perbaikan hasil dilihat dari simpangan bila dibandingkan dengan simpangan untuk SAE 30 dan SAE 40 Masing –masing 0,16% dan 0, 11%. Dengan bertambahnya kekentalan Pelumas yang diuji untuk pengujian memberikan hasil yang lebih mendekati nilai referensi . Dari ketiga sampel yang diuji simpangan terbaik sebesar 4,56%.

4. KESIMPULAN

Telah didesain dan berhasil dibuat suatu viskometer metode bola jatuh digital dengan menggunakan Mikrokontroler ATmega328, modul Arduino Uno R3, dan sensor photo diode. Hasil pengukuran dapat ditampilkan secara otomatis secara digital pada display layar LCD 16 x 2. Viskometer yang dibuat mampu mengukur viskositas ketiga jenis pelumas yang diuji yaitu SAE 30, SAE 40 dan SAE 50, dan hasilnya bersesuaian dengan standard/Referensi Pelumas tersebut dengan nilai Penyimpangan masing-masing 4,72 %, 4,67 % dan 4,56 %.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arif, S., dan Eko S, "Aplikasi Sensor Fotodiode pada Viskometer Metode bola jatuh Berbantuan Komputer", Jurnal Sains Mipa, Vol. 13 No. 3. Desember 2007. Hal. 251-256.
- [2] Mujiman. (2008). Simulasi pengukuran Nilai Viskositas Oli. Telkomnika. Vol.6, No. 1 Hal, 49-56.
- [3] Briescoe, B.J. Luckhan P.F. (1992). An Assesment of a Rolling Ball viscometer for Non-Newtonian Fluids. Vol. 66, pp. 153-162
- [4] Tri M., Ardian SP, Neran, "Desain Viskometer tekomputerisasi", Jurnal sains dan teknologi Kimia., Vol. 4 No. 2, Oktober 2012, Hal 169-173



- [5] Munson, B.R, Donal F.Young. (2003), Fundamentals of Fluids Mechanics. John Wiley and Son, INC.
- [6] Elerg.G.2007, Viscosity, 3 Mei 2013. <http://hypertext-book.com/pysics/matter/viscosity>
- [7] Teguh, F, Sukiswo, Rancang Bangun Alat Uji Kelayakan Pelumas Kendaraan Bermotor. UPJ 2 Vol. 1 2013, Hal. 30-34
- [8] Leblanc.G.E and Secco,R.A.(1995)"High Pressure Stokes "Viscometri Review of Scientific Instruments".Vol. 66. pp. 5015 – 5018
- [9] Petjo G dan Ridwan. (2010). Kajian Viskometer Tabung. Final Report. FTI- Gunadarma.

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH *INLET DISTURBANCE BODY* TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI SILINDER Sirkular YANG TERSUSUN SECARA *STAGGERED* DALAM SALURAN SEMPIT BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR

Sofia Benyakart¹⁾, Wawan Aries Widodo²⁾

Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh November^{1,2)}

Keputih Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia^{1,2)}

Phone: 083866491255

E-mail : sofia11@mhs.me.its.ac.id¹⁾, wawanaries@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Banyak cara yang telah dilakukan untuk mengurangi gaya drag, antara lain adalah dengan pemberian silinder pengganggu pada bagian depan silinder sirkular utama. Tujuan penelitian ini dimaksudkan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi. Ketika aliran melintasi susunan silinder sirkular maka akan terjadi separasi pada titik tertentu. Bila titik separasi bisa ditunda maka gaya drag yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan bodi pengganggu di depan silinder sirkular utama yang disusun secara *staggered* pada saluran sempit berpenampang bujur sangkar. Dalam penelitian ini, analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variable apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran melintasi silinder sirkular yang tersusun secara *staggered* dengan bodi pengganggu pada sisi upper dan sisi lower di depan silinder utama. Bilangan Reynolds Re_{Dh} (hidraulic diameter base) = $1,21 \times 10^4$ sampai $1,56 \times 10^5$ dan Re_{Dh} $1,56 \times 10^5$ digunakan untuk menganalisa C_p dan C_D . Variasi jarak antara silinder utama dalam model ini adalah $L/D = 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.5$. Bodi pengganggu ($d = 4$ mm) diletakkan di depan silinder sirkular utama yang tersusun secara *staggered* ($D = 25$ mm) dalam saluran sempit. Posisi sudut optimum *tripping rod* untuk mengurangi gaya drag adalah $\theta = 30^\circ$ dan $\theta = 60^\circ$ dengan $\delta = 0.4$ mm. Hasil eksperimen diperoleh adalah karakteristik aliran berupa *pressure drop*, koefisien tekanan (C_p), profil kecepatan (*wake*) di belakang bodi dan koefisien drag total (CD_t). Dari data tersebut dapat terlihat pengaruh bodi pengganggu (*IDB*) pada sudut θ 30° dan 60° .

Kata kunci: Silinder sirkular, silinder *staggered*, Reynolds Number, *bluff body*.

1. PENDAHULUAN

Aliran melintasi *bluff body* seperti silinder akan mengalami *drag force* yang merugikan karena aliran akan mudah terseparasi. Karena itu banyak penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi *drag force* yang terdapat pada *bluff body*, yaitu diantaranya adalah dengan memberikan pengganggu pada silinder utama dengan jarak tertentu. Solusi terhadap aliran melintasi *bluff body* menjadi masalah yang menantang dalam mekanika fluida. Dalam beberapa aplikasi dunia teknik, *bluff body* ditempatkan di dalam saluran dengan berbagai pengaturan, misal penempatan sebuah silinder dengan diameter kecil sebagai pengontrol aliran sebelum melewati silinder utama. Hal tersebut biasanya dilakukan untuk mengurangi atau mereduksi gaya yang diakibatkan fluida melintasi *bluff body* dan dapat mereduksi nilai *pressure drop* dengan efektif. Saat ini, studi *bluff body* adalah bagian penting dalam aplikasi teknik terutama pada dinamika fluida dan aplikasi aerodinamis untuk memperoleh efisiensi yang lebih baik. Penelitian tentang usaha untuk menurunkan gaya hambat telah dilakukan oleh Md. Mahbub Alam [1] Penelitian yang dilakukan pada silinder tunggal dan dua silinder sirkular dengan menggunakan *tripping rods* untuk mereduksi gaya fluida yang terjadi pada silinder. Penelitian ini menunjukkan posisi sudut optimum *tripping rods* untuk mengurangi gaya drag adalah 30° dengan $\delta = 0.4$ mm dan diameter 5 mm. Pada posisi sudut dari *tripping rods* ini, C_D , C_{DF} dan C_{LF} telah berkurang menjadi 67%, 61% dan 87% dan satu aliran sebagai aliran *reattachment* ($\alpha = 20-40$, pattern A) dimana *boundary layers* yang separasi dari *tripping rods* akan *reattached* pada permukaan silinder belakang *tripping rods*, dan akhirnya terjadi separasi *laminar* di permukaan silinder. Dalam jarak α ini, gaya fluida yang terjadi pada silinder dapat

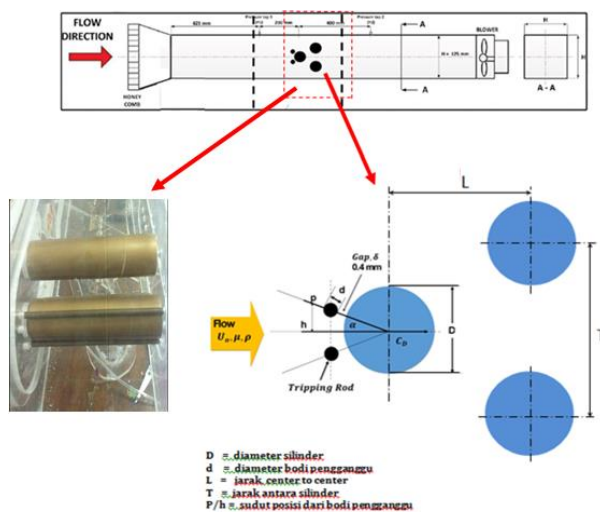
direduksi secara signifikan. Md. Mahbub Alam[1] menemukan aliran *bistable* dalam range $T/D = 0,10 \sim 1,50$ dan $0,10 \sim 1,0$ untuk silinder polos dan silinder dengan *tripping rods*. Penggunaan *tripping rods* signifikan mengurangi gaya hambat yang bertindak pada silinder. Sebuah sifat *bistable* dari aliran pada silinder tunggal muncul ketika *tripping rods* yang ada diposisi pada sudut $41^\circ-44^\circ$. Jarak kritis di mana aliran *bistable* muncul ditemukan pada rasio jarak 3,0 dan 2,6 untuk silinder polos dan silinder *tripping rods*, *Gap* dipertahankan pada 0,4 mm. Penurunan rata-rata C_D untuk $T/D > 1$ adalah sekitar 70%. Namun, pengurangan C_D di $T/D = 0.10$ sangat kecil. Hasil dari D. Sumner et. al [2] untuk konfigurasi jarak *staggered*, $P/D = 1,125$ dan 1,25, Gaya aerodinamis rata-rata pada kedua silinder *upstream* dan *downstream* bervariasi secara signifikan dengan sudut datang. Di luar zona resirkulasi Reynolds stress lebih kecil dibandingkan dengan konvektif dan *adverse pressure gradient*.

D. Sumner et. al [3] Penelitian yang dilakukan pada silinder sirkular *side by side* dengan dua dan tiga silinder sirkular diameter (D) yang sama pada jarak rasio (*centre-to-centre*) $T/D = 1,0$ sampai 6,0, dan Reynolds number dari $Re = 500$ sampai 3000. Untuk konfigurasi dua silinder ada tiga pola aliran yaitu pada jarak T/D yang kecil, *intermediate* dan yang besar. Untuk tiga silinder pada jarak T/D kecil. Menemukan aliran *bistable* dalam jarak T/D yang kecil. Karena pada penelitian ini digunakan saluran sempit sebagai *test section*, dengan tidak melupakan dimensi benda yang akan diujikan (*bluff body*) yang juga membawa pengaruh terhadap aliran fluida, maka faktor koreksi kecepatan ini didapatkan dari Weidman dan Bell. [4] yang telah meneliti pengaruh rasio dimensi *bluff body* dengan luasan saluran terhadap kecepatan fluida dan koefisien hambatan yang terjadi. Pengaruh ini kita kenal sebagai *blockage effect*. Adanya *blockage effect* ini

menjadikan kecepatan *free stream* lebih cepat (pada titik dimana rasio *blockage* maksimum) dari pada kecepatan *real*-nya karena adanya penyempitan area yang dapat dilalui fluida.

2. METODOLOGI

Berikut adalah sketma dari penelitian yang akan dilakukan. Dari Gambar 1 ditunjukkan letak benda uji yang disusun secara *staggered* dengan batang pengganggu berupa silinder yang permukaannya polos yang terpasang pada sisi *upper* dan *lower* di posisi silinder utama. Batang pengganggu akan ditempatkan pada $\alpha=30^\circ$ dan 60° , terhadap *upstream* silinder sirkular utama dengan jarak konstan gap ($\delta=0.4$ mm), dengan jarak antar silinder sirkular secara *staggered* (L/D) dalam sebuah terowongan angin dengan ukuran 125 mm×125 mm dan panjang 1,800 mm.



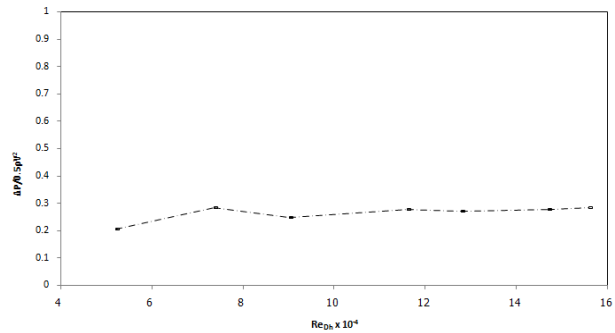
Gambar 1. Skematik Silinder Sirkular konfigurasi staggered dengan Penambahan Bodi Pengganggu silinder sirkular

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa silinder sirkular dengan diameter (D) = 25 m.m dan panjang (L) = 125 m.m. Bodi pengganggu yang diletakkan di posisi depan silinder utama adalah dengan diameter (d) = 4 m.m yang di letakkan pada jarak $\alpha = 30^\circ$ dan 60° . Pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan *Reynolds number* Re_{Dh} (hydraulic diameter base) dan rasio jarak antara silinder *upstream* dan *downstream* pada konfigurasi *staggered* (L/D). *Reynolds number* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 52100×10^4 , 73700×10^4 , 90200×10^4 , 128000×10^4 , 147000×10^4 , 156000×10^4 untuk menganalisa *pressure drop* dan Re_{Dh} 156000×10^4 digunakan untuk menganalisa C_p dan C_D . Variasi L/D yang digunakan adalah $L/D = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$, dan 3.5.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pressure Drop Saluran Kosong

Pada Gambar 2 ditunjukkan *pressure drop* fungsi *Reynolds number* (berbasis diameter hidrolis) yang digunakan pada Re_{Dh} 5.21×10^4 sampai dengan 1.56×10^5 . Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa dengan angka nilai *Reynolds* yang semakin meningkat maka nilai *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin meningkat.



Gambar 2. Grafik *pressure drop* terhadap *Reynolds number* pada konfigurasi: saluran kosong

Artinya, kenaikan *pressure drop* tersebut diakibatkan karena kecepatan yang semakin meningkat. Bila kecepatan meningkat maka akan menaikkan *headloss*, yang berarti juga akan meningkatkan *pressure drop*. Fenomena ini sesuai dengan persamaan berikut (1), (2) dan (3)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_{lt} \quad (1)$$

Sedangkan H_{lt} dirumuskan sebagai berikut

$$H_{lt} = h_{lt} + h_{lm} \quad (2)$$

Sehingga persamaan menjadi,

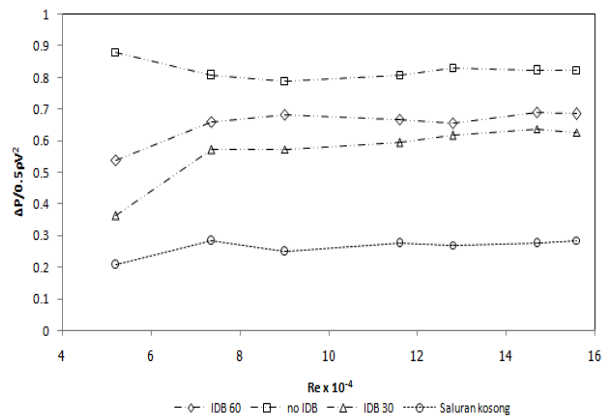
$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \left[f \cdot \frac{L}{D} + K \right] \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

Pressure drop terjadi pada saluran kosong karena pengaruh koefisien gesek yang terjadi sepanjang saluran atau adanya *headloss* mayor. Bila dalam saluran tersebut ditambahkan benda uji seperti silinder sirkular yang konfigurasi *staggered* maka *headloss* yang terjadi adalah *headloss total*. Akibat aliran fluida menjadi lebih terhambat ketika melewati saluran, sehingga *headloss* pada saluran kosong lebih rendah dibandingkan dengan saluran ada benda uji.

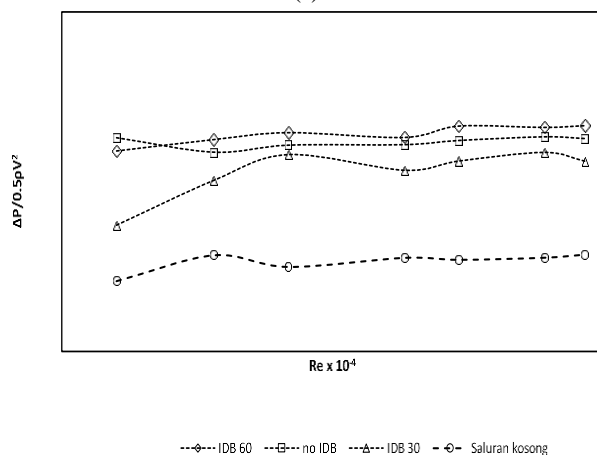
Pressure drop Saluran dengan Tiga silinder Konfigurasi Staggered dan Bodi Pengganggu pada L/D 1.0 (a) dan L/D 3.5(b)

Pada Gambar 3(a) terlihat bahwa nilai *pressure drop* tanpa IDB merupakan nilai *pressure drop* tertinggi dibandingkan dengan nilai *pressure drop* pada saluran dengan IDB 30° dan IDB 60° . Sedangkan nilai *pressure drop* pada konfigurasi dengan IDB 30° mempunyai nilai terendah. Karena titik separasi lebih tertunda ke belakang silinder utama, maka hasil daerah *wake* dibelakang silinder sirkular pada konfigurasi *staggered* dengan IDB 30° lebih sempit. Dengan kecilnya *wake* yang terbentuk maka gaya *drag* yang dihasilkan akan semakin kecil dan *pressure drop* yang terjadi juga kecil. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi dengan IDB 30° lebih efektif dalam mengurangi nilai *pressure drop* pada nilai *Reynolds Number* tertentu. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa menggunakan bodi pengganggu mampu untuk menurunkan *pressure drop* pada eksperimen ini.

Pada gambar 3(b) dapat dilihat bahwa nilai *pressure drop* pada konfigurasi tanpa IDB, IDB 30° dan IDB 60° dengan jarak L/D 3.5 lebih rendah dari pada jarak L/D 1.0. Karena pada jarak L/D semakin mendekati maka *blockage* yang terjadi juga akan semakin besar. Bila *blockage* semakin besar maka *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin besar dengan angka *Reynolds* yang sama. Dari hal yang disebutkan diatas maka sangatlah jelas bahwa *pressure drop* dipengaruhi oleh jarak L/D , *Reynolds number*, dan *blockage* yang terjadi.



(a)

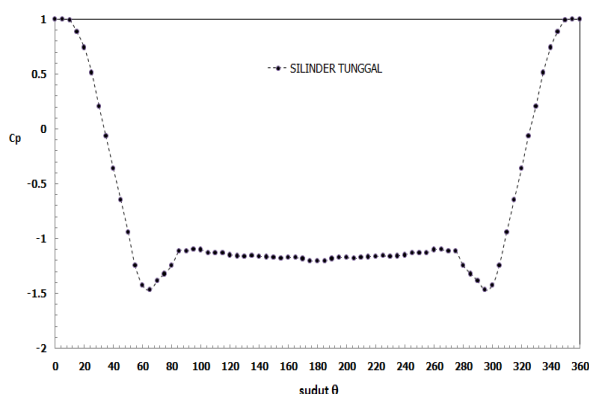


(b)

Gambar 3 Grafik *pressure drop* terhadap *Reynolds number* pada konfigurasi : L/D 1.0 (a) dan 3.5 (b)

Distribusi Koefisien Tekanan

Berikut akan ditampilkan koefisien tekanan (C_p) pada Re_{Dh} $1,56 \times 10^5$. Gambar 4 menunjukan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada silinder sirkular tunggal tanpa diberi *disturbance* body, pada gambar tersebut terlihat bahwa titik stagnasi terjadi di pada sudut 0° yaitu menghasilkan C_p dengan nilai 1. Kemudian aliran fluida mengalami percepatan hingga sampai kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai tekanan minimum ($C_{p\min}$) pada sudut $\theta \pm 65^\circ$ (*upper side*) dan $\theta \pm 295^\circ$ (*lower side*), karena aliran melalui daerah *favorable pressure gradient* dimana terjadi penyempitan *streamtube*.

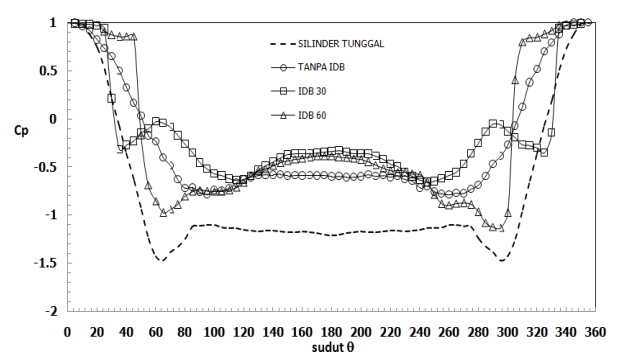


Gambar 4. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder sirkular tunggal

Setelah melewati titik tekanan minimum, aliran fluida mengalami perlambatan. Keadaan ini terus berlanjut hingga momentum aliran fluida tidak mampu lagi melawan *adverse pressure gradient* yang semakin positif hingga terjadi *massive separation* pada pada $\theta = \pm 85^\circ$ (*upper side*) dan $\theta = \pm 276^\circ$ (*lower-side*) dengan nilai $C_{pb} = -1.2$. Setelah titik separasi *massive* tekanan aliran akan menjadi konstan.

Distribusi Koefisien Tekanan Tiga Silinder Konfigurasi Staggered pada L/D 1.0 dan L/D 3.5

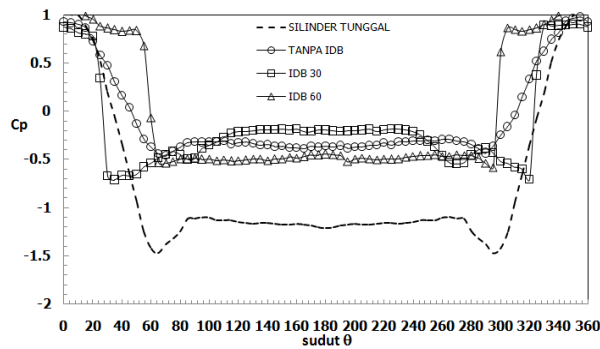
Pada Gambar 5 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan konfigurasi staggered yang terjadi pada jarak L/D 1.0 dan L/D 3.5, diambil pada Re_{Dh} 1.56×10^5 . Dari gambar 4.4(a) menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada jarak L/D 1.0 terdapat dibandingkan pada silinder tunggal, silinder sirkular tersusun secara *staggered* tanpa IDB, IDB 30° dan IDB 60° .



Gambar 5. Grafik distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi staggered: L/D 1.0

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa penggunaan tambah IDB 30° pada silinder 1 untuk titik stagnasi terjadi pada sudut 0° yaitu menghasilkan C_p dengan nilai 1. Setelah dari titik stagnasi, aliran mengalami percepatan. Setelah aliran fluida melewati celah antara body *disturbance* (IDB) dengan silinder *upstream* dan juga aliran melintasi body *disturbance*. Aliran mengalami separasi mendapat momentum dari aliran *free-stream* yang cukup kuat sehingga *shear layer* yang terlepas dari body *disturbance* kembali *re-attach* pada kontur silinder *upstream* yang ditandai dengan *peak*. Fenomena inilah yang disebut dengan *bubble separation*. Separasi *bubble* ini terjadi pada sudut $\pm 60^\circ$ (*upper-side*) dan $\pm 290^\circ$ (*lower-side*) dan aliran kembali terjadi percepatan ditandai dengan nilai $C_{p\min}$ pada sudut $\pm 110^\circ$ (*upper-side*) dan $\pm 250^\circ$ (*lower-side*). Kemudian aliran mengalami perlambatan pada sudut $\pm 120^\circ$ (*upper-side*) dan sudut $\pm 240^\circ$ (*lower-side*) karena boundary layer aliran turbulen lebih mampu untuk bertahan terhadap *adverse pressure gradient* yang sangat negative, akibatnya letak titik separasi akan lebih tertunda kebelakang silinder utama. Aliran terseparasi pada sudut $\pm 150^\circ$ (*upper-side*) dan sudut $\pm 210^\circ$ (*lower-side*), karena momentum aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang semakin positif Akibatnya *wake* yang terbentuk lebih sempit. Dengan kecilnya *wake* yang terbentuk maka gaya *drag* yang terjadi juga akan semakin kecil. Kemudian pada penggunaan tambah IDB 60° masih terjadi separasi *Bubble* dibagian silinder *upstream*. Karena *shear layer* yang terlepas dari body *disturbance* mengalami *re-attach* pada kontur silinder utama dan juga adanya pengaruh dari silinder *downstream* yang semakin mendekat.

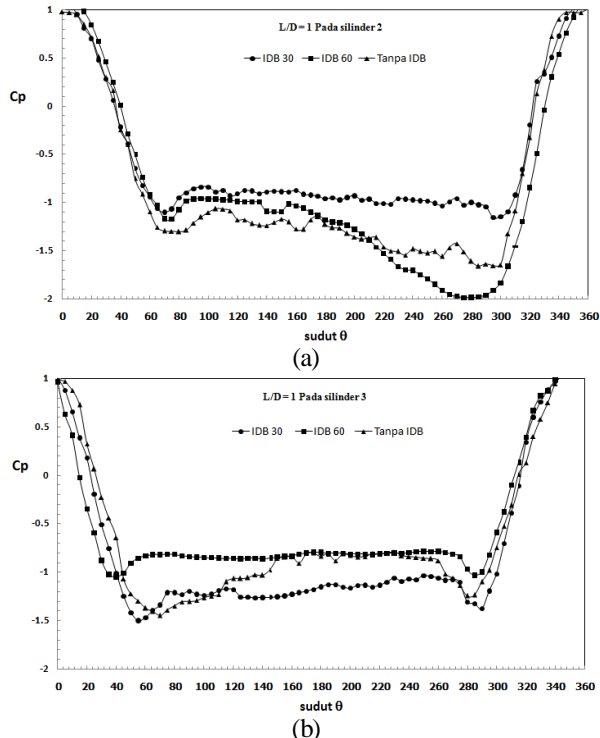
Berikut adalah Gambar 6 Grafik distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi staggered: L/D 3.5



Gambar 6. Grafik distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi staggered : L/D 3.5

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa penggunaan IDB 60⁰ aliran fluida langsung terseparasi. Karena *shear layer* yang terlepas dari silinder *disturbance* tidak mengalami *re-attach* pada kontur silinder *upstream*. Akibatnya *shear layer* tersebut terdefleksi kesisi luar silinder. Hal ini menjadikan bahwa aliran akan terseparasi lebih awal, maka *wake* yang dihasilkan dari penggunaan IDB 60⁰ lebih besar dibandingkan dengan silinder sirkular tunggal, tanpa IDB dan penggunaan IDB 30⁰. Hal ini menunjukkan bahwa semakin jauh jarak antara silinder *upstream* dan *downstream*, pengaruh dari silinder *downstream* semakin berkurang. Jadi bisa disimpulkan bahwa penggunaan IDB 30⁰ lebih efektif untuk mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada eksperimen ini.

Berikut adalah Gambar 7 Grafik distribusi koefisien tekanan pada silinder 2 dan silinder 3 dengan konfigurasi $L/D = 1$ dan 3.5.



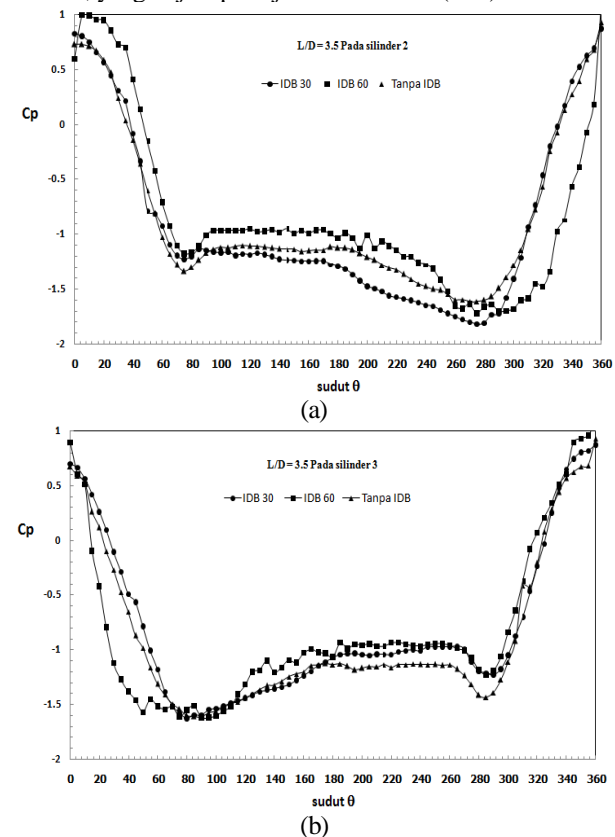
Gambar 7. grafik distribusi koefisien tekanan dengan konfigurasi $L/D = 1$ dengan silinder 2(a) dan 3(b).

Dari Gambar 7(a) dan (b) dapat dilihat bahwa titik stagnasi terjadi pada sudut 0 yaitu menghasilkan C_p dengan nilai 1. Untuk titik separasi variasi jarak L/D dan $C_{p \min}$ yang dapat dilihat pada Table 1.

Tabel 1. Sudut separasi dan $C_p \min$ pada susunan silinder 2 dan 3 dengan konfigurasi *staggered* pada jarak $L/D = 1.0$: Tanpa IDB, IDB 30⁰ dan IDB 60⁰

Silinder 2	Upper side		Lower side	
	Separasi	$C_{p \min}$	Separasi	$C_{p \min}$
Tanpa IDB	105°	75°	270°	285°
IDB 30	90°	70°	289°	298°
IDB 60	105°	75°	270°	285°
Silinder 3	Separasi	$C_{p \min}$	Separasi	$C_{p \min}$
	Separasi	$C_{p \min}$	Separasi	$C_{p \min}$
Tanpa IDB	85°	70°	265°	280°
IDB 30	75°	55°	278°	290°
IDB 60	55°	40°	270°	285°

Pada Gambar 8(a) dan (b) dapat dilihat bahwa lebar *wake* pada silinder *downstream* (silinder 2 dan 3) tidak sama pada sisi atas dan sisi bawah. Hal ini menunjukkan bahwa pada jarak $L/D = 1.0$ masih berada di daerah *bistable* atau dikenalkan sebagai fenomena *biased flow*. Akibat lebar *wake* dibelakang silinder *downstream* akan berbeda antara sisi atas dan sisi bawah. Hal tersebut sesuai dengan penelitian Mahbub Alam [1] dan Sumner, D. et al., [3] tentang fenomena *biased flow* dengan berbeda lebar *wake* di belakang silinder, yang terjadi pada jarak transversal (T/D) kecil.



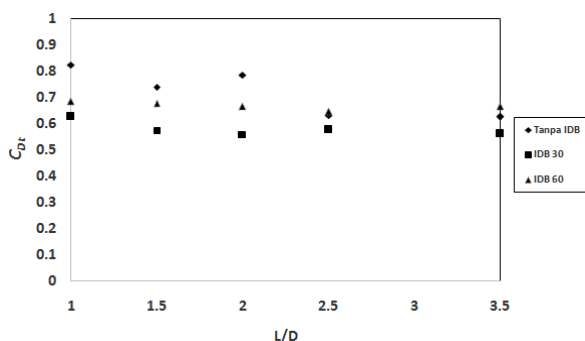
Gambar 8. Grafik distribusi koefisien tekanan dengan konfigurasi $L/D = 3.5$ pada silinder 2(c) dan 3(d).

Dari Gambar 8(a) dan (b) dapat dilihat bahwa titik setagnasi terjadi pada sudut 0 yaitu menghasilkan C_p bukan dengan nilai=1, karena adanya pengaruh *wake* dari silinder *upstream*. Pada tabel 2 dapat dilihat bahwa pada silinder 2 dan silinder 3 titik separasi tidak sama pada sisi atas dan sisi bawah, akibatnya lebar *wake* pada silinder *downstream* berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa pada jarak $L/D=3.5$ masih berada di daerah *bistable* dengan berbeda lebar *wake* di belakang silinder, yang terjadi pada jarak transversal (T/D) kecil.

Tabel 2. Sudut separasi dan $C_{p\min}$ pada susunan silinder 2 dan 3 dengan konfigurasi *staggered* pada jarak $L/D = 3.5$: Tanpa IDB, IDB 30° dan IDB 60°

Silinder 2	Upper side		Lower side	
	Separasi	$C_{p\min}$	Separasi	$C_{p\min}$
Tanpa IDB	90°	75°	250°	275°
IDB 30	85°	75°	250°	275°
IDB 60	90°	75°	180°	240°
Silinder 3	Separasi	$C_{p\min}$	Separasi	$C_{p\min}$
Tanpa IDB	85°	80°	260°	285°
IDB 30	90°	80°	270°	290°
IDB 60	125°	75°	180°	285°

Dari gambar yang ditunjukkan pada Gambar 9 maka bisa dilihat bahwa nilai koefisien *drag total* yang tertinggi terjadi pada konfigurasi *staggered* IDB 60° dan yang terendah terjadi pada konfigurasi *staggered* IDB 30° . Hal ini bisa disimpulkan bahwa penambahan IDB 30° di depan silinder yang tersusun secara *staggered* sangat efektif untuk mengurangi koefisien *drag total* yang terjadi pada semua variasi jarak L/D dalam eksperimen ini.



Gambar 9. koefisien drag total C_{DT}

4. KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dalam penelitian ini adalah:

1. Semakin meningkat *Reynolds Number* maka *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin meningkat, karena dipengaruhi oleh kecepatan. Bila kecepatan meningkat maka akan menaikkan *headloss* yang terjadi. Untuk saluran kosong, *headloss* yang terjadi hanyalah *headloss* karena saluran saja. Bila koefisien gesek besar maka *pressure drop* yang terjadi juga semakin besar. Dari hal disebutkan maka sangatlah jelas bahwa *pressure drop* dipengaruhi oleh *Reynolds number*, dan *blockage* yang terjadi.
2. Penggunaan IDB 60° *shear layer* langsung terseparasi. Karena *shear layer* terlepas dari silinder bodi *disturbance* tidak mengalami *re-attach* kembali pada kontur silinder *upstream*. Akibatnya *shear layer* tersebut terdefleksi kesisi luar silinder. Hal ini menjadikan bahwa aliran akan terseparasi lebih awal maka *wake* yang dihasilkan lebih besar.
3. Pada silinder *downstream* dengan jarak (*center to center*) 2D menjadi fenomena *biased flow* yang menakibat lebar *wake* dibelakang silinder *downstream* berbeda antara silinder atas dan silinder bawah.
4. Pada konfigurasi dengan IDB 30° lebih efektif dalam mengurangi *pressure drop* dan gaya *drag*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alam, Md. Mahbub, Sakamoto, H., dan Moriya M., "Reduction of Fluid Forces Acting On A Single Circular Cylinder and Two Circular Cylinders by Using Tripping Rods", Journal of Fluids and Structures, Vol. 18, 20 July 2003, hal. 347-366.
- [2] Sumner, D. et al., 2000, 2005. *Two staggered circular cylinders of equal diameter in cross-flow*.
- [3] Sumner, D. et al., 1997-1998. *Fluid Behaviour of Side-by-Side Circular Cylinders In Steady Cross-Flow*.
- [4] Weidman, P.D., Tesis: *Wake Transition and Blockage Effect on Cylinder base Pressure*, California Institute of Technology, Pasadena, 1968

PERSAMAAN RUGI TEKANAN FLUIDA NANO Al_2O_3 -AIR PADA PROSES PENDINGINAN DALAM PIPA

Sudarmadji¹⁾, Sudjito Soeparman²⁾, Slamet Wahyudi³⁾, Nurkholis Hamidi⁴⁾

Politeknik Negeri Malang¹⁾

Jl. Soekarno Hatta No.9 Po. BOX 04 Malang 65141- Indonesia.

Jurusan Teknik Mesin^{1,2,3,4)}

Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

Jl. Mayjend. Haryono No 167, Malang 65145- Indonesia

E-mail: sudmaji@yahoo.co.id1), sudjitospn@yahoo.com2), slametw72@yahoo.com3), hamidy@ub.ac.id4)

ABSTRAK

Dengan meningkatnya fluks kalor pada berbagai aplikasi teknologi dan kecenderungan peralatan yang semakin kecil maka panas yang dihasilkan meningkat tajam dan akan menjadi problem bila tidak ditangani dengan benar. Maka pendinginan menjadi sangat penting, seperti pembangkit listrik, air conditioning (AC), transportasi, pusat listrik tenaga nuklir dimana panas dihasilkan menjadi masalah utama. Berbagai macam cara digunakan untuk meningkatkan proses perpindahan panas/pendinginan, diantaranya yang terbaru adalah penambahan partikel padat kedalam fluida (fluida nano). Penambahan partikel padat membawa dampak terhadap peningkatan rugi tekanan akibat meningkatnya viskositas fluida dan hal menjadi masalah pada penggunaan fluida nano. Dalam makalah ini dilakukan percobaan rugi tekanan pada pipa aliran laminar menggunakan fluida nano Al_2O_3 -air dengan konsentrasi volume sebesar 0,15%, 0,25% dan 0,5%. Percobaan menggunakan alat penukar kalor pipa ganda aliran berlawanan arah. Viskositas, densitas dan rugi tekanan fluida nano diukur menggunakan Ostwald Viscometer, Picnometer dan Omega Pressure Transducer. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan sedikit partikel Al_2O_3 kedalam air murni meningkatkan rugi tekanan dan besarnya sebanding dengan prosentase volume partikel dan bilangan Reynold. Persamaan rugi tekanan air murni tidak dapat digunakan untuk memprediksi rugi tekanan pada konsentrasi volume yang tinggi (0,5%). Dengan demikian, dalam penelitian ini mengembangkan persamaan faktor gesekan baru untuk proses pendinginan pada aliran laminar. Penyimpangan maksimum pada persamaan baru dengan hasil percobaan dalam rentang -11,2% dan +17%.

Kata kunci: Fluida nano, aliran laminar, pendinginan, partikel alumina

1. PENDAHULUAN

Dengan meningkatnya fluks kalor pada berbagai aplikasi teknologi dan adanya kecenderungan peralatan yang semakin kecil maka panas yang dihasilkan meningkat tajam, diperlukan proses pendinginan dengan kinerja yang tinggi. Pendinginan memegang peranan penting dalam segala bidang, seperti pembangkit listrik, air conditioning (AC), transportasi, pusat listrik tenaga nuklir, dimana panas dihasilkan menjadi masalah utama. Peningkatan proses perpindahan panas/pendinginan yang efisien menjadi sangat penting sehingga dapat mengurangi dimensi peralatan, meningkatkan kapasitas pendinginan dan mengurangi biaya operasional.

Ada beberapa metode untuk meningkatkan perpindahan konveksi, diantaranya adalah menambah luas permukaan konveksi, meningkatkan laju aliran fluida dan merubah permukaan dengan cara membuat celah. Tetapi fluida pendingin seperti air, oli dan ethylene glycol dengan konduktifitas panas sangat rendah merupakan penghambat utama dalam proses peningkatan perpindahan panas sehingga menghalangi perbaikan efisiensi energi. Salah satu cara untuk meningkatkan laju perpindahan panas adalah dengan meningkatkan konduktifitas panas fluida tersebut.

Diawali oleh Maxwell [1] menambahkan partikel padat ukuran milimeter kedalam cairan dalam upaya untuk memperbaiki properti fluida. Fluida dengan partikel ukuran milimeter tersebut memiliki beberapa kekurangan, antara lain erosi pada komponen akibat abrasi oleh partikel, pengumpulan partikel menyebabkan penyumbatan dan rugi tekanan yang sangat besar.

Dengan kemajuan teknologi material yang dapat dicapai saat ini, telah dimungkinkan pembuatan partikel berukuran nanometer (<100nm) yang ditambahkan kedalam fluida dasar (*base fluid*) sehingga membentuk fluida baru yang disebut dengan fluida nano (*nanofluid*) [2], yang dapat mengatasi permasalahan diatas. Ciri penting fluida nano adalah, perilaku partikel seperti molekul air karena ukurannya sangat kecil dan memungkinkan digunakan pada saluran yang kecil (*micro channels*). Fluida nano sebagai fluida pemindah panas baru menunjukkan keunggulan terhadap fluida dasar pembentuknya. Jenis partikel yang telah digunakan antara lain: oksida, karbida, metal semikonduktor dan carbon nanotube, sedangkan jenis fluida yang digunakan adalah: air, ethylene glycol, oil dan refrigerant sebagai fluida dasar.

Keberadaan partikel didalam fluida meningkatkan konduktifitas panas dan konsekuensinya juga meningkatkan perpindahan panas konveksi, seperti studi tentang konduktifitas panas fluida nano yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti [3]-[5]. Berbagai macam mekanisme dan model telah dilakukan untuk menjelaskan peningkatan konduktifitas panas fluida nano dengan menggunakan berbagai asumsi, diantaranya adalah lapisan molekul fluida pada partikel padat [6]-[8], adanya gerak Brown [9]-[10] dan nano konveksi akibat gerak partikel dalam fluida dengan mempertimbangkan ukuran partikel dan temperatur [11]-[12].

Studi tentang perpindahan panas dan rugi tekanan fluida nano relatif sedikit dibandingkan dengan studi tentang konduktifitas panas fluida nano. Studi yang telah dilakukan oleh Wend dan Ding [13] melaporkan bahwa perpindahan panas meningkat dengan penambahan partikel Al_2O_3 kedalam air murni pada pipa tembaga untuk aliran laminar,

bilangan Nusslet meningkat sebesar 47% pada konsentrasi volume 1,6%. Percobaan yang dilakukan oleh Harris dkk. [14] juga menggunakan partikel Al_2O_3 -air pada pipa dengan kondisi temperatur dinding konstan pada proses pemanasan, didapatkan bahwa dengan penambahan partikel pada konsentrasi volume 2.5% meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi sebesar 40%. Percobaan yang dilakukan oleh Yang dkk.[15] menggunakan fluida nano dari partikel praphite dan air pada alat penukar kalor untuk aliran laminar juga menghasilkan peningkatan koefisien perpindahan panas yang sebanding dengan bilangan Reynold dan konsentrasi volume partikel.

Duangthongsuk dkk. [16] mempelajari perpindahan konveksi paksa dan perilaku aliran fluida nano TiO_2 -air pada konsentrasi volume 0,25%. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan fluida nano meningkatkan rugi tekanan yang sangat besar. Sedangkan Vajjha dkk.[17] melakukan percobaan perpindahan panas konveksi dan rugi tekanan untuk aliran turbulen menggunakan oksida alumina, oksida tembaga dan oksida silica sebagai bahan partikel dan campuran 60% ethylene glycol dan 40% air sebagai fluida dasar. Hasil percobaan menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas konveksi meningkat sebesar 81,74% untuk prosentase volume partikel alumina 10%, dan rugi tekanan meningkat sebesar 4,7 kali dari fluida dasar pada bilangan Reynold 6700.

Sebuah studi eksperimen yang dilakukan oleh Suresh dkk.[18] tentang perpindahan konveksi dan rugi tekanan pada aliran laminar untuk daerah berkembang penuh dengan kondisi fluks kalor konstan pada pipa menggunakan fluida nano campuran Al_2O_3 -Cu/air. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan maksimum bilangan Nusselt sebesar 14,56% pada bilangan Reynold 1730. Sedangkan Heyhat dkk. [19] juga menyelidiki hal sama, perbedaannya pada partikel yang digunakan yaitu Al_2O_3 -air dan jenis aliran laminar pada kondisi temperatur dinding konstan. Hasilnya menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas fluida nano meningkat sebesar 32% dibandingkan dengan fluida air pada prosentase volume 2%. Peningkatan koefisien perpindahan panas lebih besar dibandingkan dengan peningkatan konduktifitas panas fluida nano pada prosentase volume yang sama. Adapun, rugi tekanan maksimum sebesar 5,7 kali lebih tinggi dari rugi tekanan air murni pada pada konsentrasi volume 2% untuk bilangan Reynold 360.

Tang dkk. [20] menyelidiki rugi tekanan menggunakan fluida nano TiO_2 /air pada pipa lurus pada aliran laminar dan turbulen pada temperatur berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa, penggunaan fluida nano TiO_2 /air meningkatkan rugi tekanan, tetapi rugi tekanan turun dengan kenaikan temperatur. Ratio peningkatan rugi tekanan pada aliran turbulen lebih rendah dibandingkan aliran laminar.

Penelitian tentang rugi tekanan pada proses pendinginan belum banyak dilakukan para peneliti, terutama pada daerah aliran berkembang penuh. Tujuan dari penelitian ini adalah menyelidiki efek dari proses pendinginan terhadap rugi tekanan menggunakan fluida nano Al_2O_3 -air pada penukar kalor pipa ganda aliran laminar. Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan fluida baru dengan koefisien perpindahan panas maksimal dengan kerugian tekanan yang minimal.

2. METODOLOGI

Pembuatan fluida nano Al_2O_3 -air

Dalam percobaan ini, menggunakan partikel $\gamma-Al_2O_3$ diameter rata-rata 20-50 nm dari Zhejiang Ultrafine

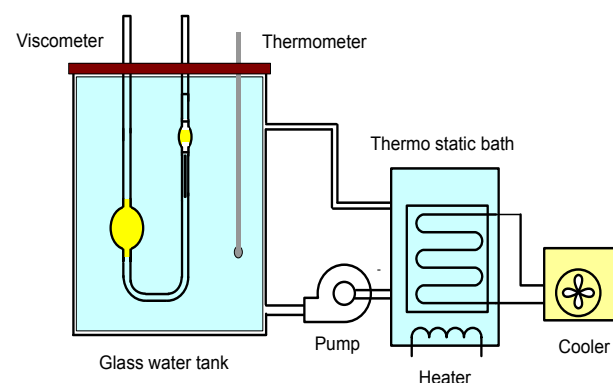
Powder&Chemical Co, Ltd China. Fluida nano dibuat dengan menambahkan partikel Al_2O_3 dengan konsentrasi volume masing-masing 0,15%, 0,25% dan 0,5% kedalam fluida dasar yaitu air murni (*deionized water*). Untuk mendapatkan fluida nano yang homogen, pH air murni diatur dengan menggunakan *hydrochloric acid* (HCl) dan *sodium hydroxide* (NaOH) bertujuan untuk menghindari efek dari *iso-electric point* alumina yaitu pada pH 9 [21]. Fluida nano Al_2O_3 - diaduk dengan menggunakan *magnetic stirring* dengan penambahan sedikit surfaktan sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS).

Pengukuran viskositas dan densitas

Viskositas fluida nano diukur menggunakan Viscometer kapiler (Ostwald viscometer), seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Terdiri dari tangki air yang terbuat dari gelas dan thermometer. Viskometer direndam dalam tangki yang berisi air yang berfungsi menjaga temperatur pengukuran konstan. Air di pompa dari *thermostatic bath* ke bagian bawah tangki dan bersirkulasi melalui pipa bagian atas tangki. *Thermostatic bath* berfungsi mengatur temperatur air masuk kedalam tangki tetap konstan. Posisi viscometer ditopang oleh tripod khusus untuk menjaga agar pada posisi viscometer tegak lurus. Nilai viskositas dinamik ditentukan dengan persamaan (1), yaitu:

$$\mu = \rho c t \quad (1)$$

Dimana ρ adalah densitas fluida nano, c konstanta viscometer dan t waktu yang dibutuhkan fluida nano jatuh dari posisi titik a ke titik b . Sedangkan densitas diukur menggunakan Picnometer.



Gambar 1. Instalasi percobaan pengukuran viskositas fluida nano

Perhitungan rugi tekanan

Perhitungan faktor gesekan, rugi tekanan, densitas, kecepatan dan ukuran pipa untuk aliran laminar pada pipa menggunakan persamaan (2), yaitu:

$$\Delta P = f \frac{L}{d} \frac{U^2}{2} \rho \quad (2)$$

Dan faktor gesekan fluida air murni untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

Dimana Re adalah bilangan Reynold besarnya adalah:

$$Re = \frac{U d \rho}{\mu} \quad (4)$$

Dimana f adalah faktor gesekan, d adalah diameter dalam pipa, L adalah panjang pipa, U adalah kecepatan fluida, ρ adalah densitas dan μ adalah viskositas dinamik. Re menyatakan kondisi aliran, untuk aliran laminar $Re < 2300$.

3. EXPERIMENT DAN ANALISA DATA

Peralatan percobaan

Peralatan percobaan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3, terdiri dari dua aliran fluida tertutup (loop), yaitu aliran fluida dingin dan aliran fluida panas (fluida nano) dan unit pemanas, unit pendingin dan unit alat ukur temperatur dan rugi tekanan. Aliran tertutup terdiri dari tangki reservoir, pompa, katub untuk pengaturan aliran fluida. Alat uji menggunakan alat penukar kalor pipa ganda aliran berlawanan arah. Pipa bagian dalam terbuat dari pipa tembaga panjang 1,10 m dan diameter dalam 4,9 mm tebal 1 mm, sedangkan pipa bagian luar terbuat dari bahan stainless steel diameter dalam 38,5 mm dan tebal 3 mm. Pada pipa bagian luar dibungkus dengan bahan Aeroflex sepanjang pipa dengan tebal 2 cm untuk menjaga kehilangan kalor. Untuk menjamin semua data pada daerah aliran berkembang penuh (*fully developed flow*), terdapat *calming section* panjang 30 cm untuk menghindari pengaruh aliran pada daerah sisi masuk, menurut Incopera dkk. [22] perbandingan antara panjang dengan diameter pipa lebih besar dari 100 ($L/d \gg 100$).

Fluida dingin mengalir pada annulus bagian luar pipa dan fluida nano mengalir pada pipa bagian dalam sebagai fluida panas dan pada sisi masuk dijaga temperatur tetap konstan sebesar 40°C. Dua buah thermokopel type K dipasang pada daerah sisi masuk dan sisi keluar pada fluida dingin dan dua buah thermokopel dipasang pada fluida panas. Empat buah thermokopel type K ditanam pada permukaan pipa tembaga dengan posisi berbeda untuk mengukur temperatur permukaan pipa.

Sebuah *differential pressure transducer* type PX 409-005DWU5V dari Omega digunakan untuk mengukur beda tekanan sepanjang pipa. Tangki pendingin daya 2,2 kW dengan thermostat digital type (DEI-104F Taiwan) digunakan untuk mengatur fluida dingin agar temperatur tetap konstan sesuai dengan diinginkan. Identik dengan tangki pendingin, pemanas listrik 1,5 kW dengan kontrol PID (OMRON E5CWL) dipasang pada fluida panas untuk menjaga temperatur konstan. Laju aliran fluida nano dan fluida dingin diatur menggunakan katub bypass dan katub pengatur dan diukur menggunakan Dakota rotameter (6B4100-01B DAKOTA ACRYLIC). Untuk menjaga fluida yang berada dalam pipa tembaga selalu penuh dipasang sebuah *raiser* pada bagian sisi keluar aliran setinggi 50 cm.

Selama percobaan, temperatur pada sisi masuk dan sisi keluar fluida panas dan fluida dingin serta temperatur pada dinding pipa pada semua posisi di rekam menggunakan personal computer (PC) melalui *Thermocouple Data Acquisition Module* (OMEGA TC-08).

Analisa ketika pastian percobaan (*uncertainty analysis*)

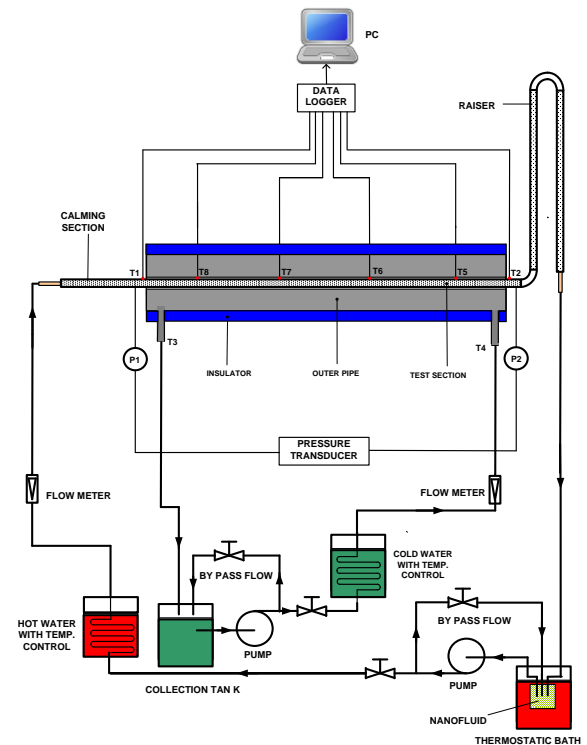
Ketidak pastian percobaan rugi tekanan didapatkan dari penyimpangan pengukuran masing-masing parameter, diantaranya adalah: densitas (ρ), viskositas (μ), flow rate (V), rugi tekanan (P), berat (W) dan temperatur (T).

Ketidak pastian percobaan menurut Moffat [23] dinyatakan dengan:

$$u_m = \pm \left[\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \mu}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Bila ketelitian pengukuran masing-masing parameter adalah 0,1 gr pada pengukuran densitas, 1% pada pengukuran viskositas, 2% pengukuran debit, 2% pengukuran rugi tekanan, 0,1g pada pengukuran berat partikel dan $\pm 0,5^\circ\text{C}$

pada pengukuran temperatur. Maka ketidak pastian percobaan adalah $\pm 6,0\%$.



Gambar 2. Instalasi percobaan

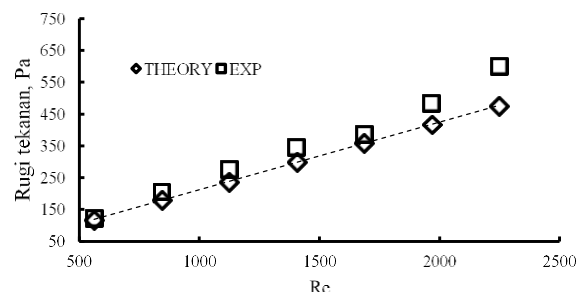
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi peralatan percobaan

Untuk memvalidasi peralatan percobaan, pada tahap awal dilakukan percobaan untuk menentukan rugi tekanan menggunakan fluida air murni, kemudian dibandingkan dengan teori Hagen-Poiseuille untuk aliran laminar, yaitu:

$$\Delta P = \frac{32\mu L U}{d^2} \quad (6)$$

Seperti yang diperlihatkan pada gambar 3, rugi tekanan menggunakan air murni pada temperature 40°C sebagai fungsi dari bilangan Reynold. Terlihat bahwa, ada kesesuaian antara hasil percobaan dengan teori untuk aliran laminar.



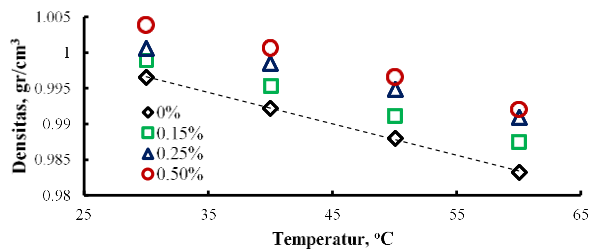
Gambar 3. Komparasi rugi tekanan antara teori dengan hasil percobaan

Densitas dan viskositas fluida nano

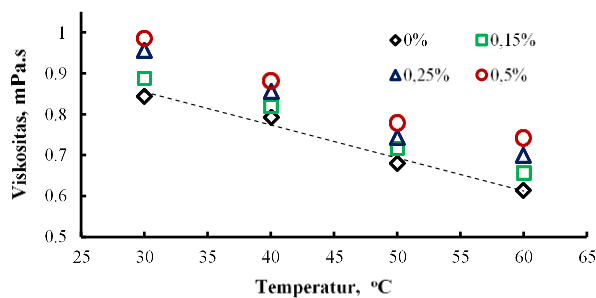
Gambar 4 menunjukkan hasil pengukuran densitas fluida nano Al_2O_3 -air pada temperatur berbeda. Peningkatan konsentrasi volume partikel juga meningkatkan densitas

fluida nano Al_2O_3 -air secara linear, sedangkan kenaikan temperatur menurunkan densitas fluida nano. Densitas air murni pada temperatur 30°C hampir sama dengan densitas fluida nano pada temperatur 55°C pada konsentrasi volume 0,5% yaitu sebesar 996 kg/m^3 . Hasil ini sesuai dengan persamaan yang dihasilkan oleh Pak dkk. [24].

Sedangkan gambar 5 menunjukkan pengaruh partikel Al_2O_3 terhadap perubahan viskositas fluida nano pada temperatur berbeda. Peningkatan temperatur akan menurunkan viskositas fluida nano, sedangkan peningkatan konsentrasi volume partikel meningkatkan viskositas fluida nano. Seperti terlihat pada gambar, viskositas fluida nano Al_2O_3 -air dengan surfaktan SDBS ketergantung terhadap temperatur sangat tinggi. Hasil percobaan sesuai dengan teori dari literatur [25].



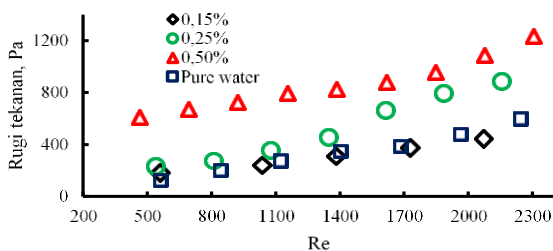
Gambar 4. Densitas fluida nano fungsi dari temperature



Gambar 5. Viskositas fluida nano

Rugi tekanan fluida nano

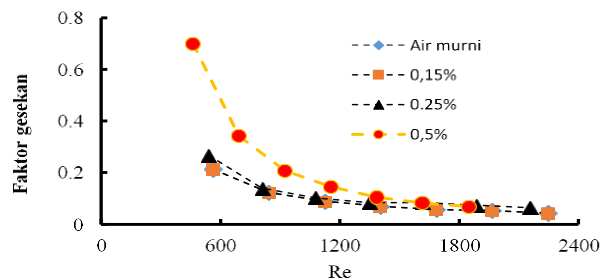
Gambar 6 menunjukkan rugi tekanan fluida nano Al_2O_3 -air hasil pengukuran pada bilangan Reynold berbeda. Penambahan partikel Al_2O_3 pada fluida dasar meningkatkan rugi tekanan dan besarnya sebanding dengan konsentrasi volume partikel. Pada bilangan Reynold 1000 pada konsentrasi volume 0,5%, rugi tekanan fluida nano Al_2O_3 -air sebesar 750 Pa lebih tinggi 2,5 kali dari rugi tekanan air murni. Adapun rugi tekanan fluida nano Al_2O_3 -air pada konsentrasi 0,15% dan 0,25% peningkatannya tidak signifikan.



Gambar 6. Rugi tekanan pada fluida nano pada bilangan Reynold berbeda

Sedangkan gambar 7 menunjukkan faktor gesekan fluida nano Al_2O_3 -air yang didapatkan dari persamaan (3)

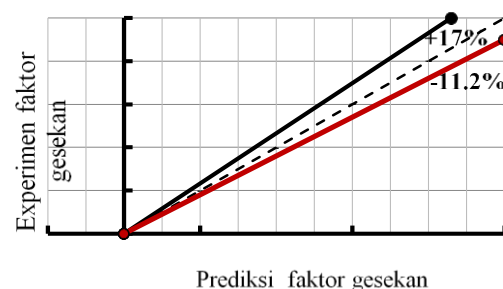
merupakan fungsi dari bilangan Reynold dan prosentase volume partikel. Terlihat, bahwa, faktor gesekan fluida nano meningkat sebanding dengan penambahan prosentase volume partikel. Sebagai contoh, pada prosentase volume partikel 0,5% peningkatan faktor gesekan sangat signifikan dibanding dengan faktor gesekan pada prosentase volume partikel 0,15% dan 0,25%. Ini berarti, bahwa dengan menggunakan fluida nano Al_2O_3 -air pada prosentase volume tinggi menimbulkan kerugian tekanan yang sangat besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (6) dan gambar (6), dimana peningkatan viskositas fluida nano sebanding dengan prosentase volume partikel dan peningkatan viskositas juga menimbulkan rugi tekanan yang besar. Peningkatan viskositas fluida nano disebabkan oleh peningkatan prosentase volume dan partikel dalam air mudah menggumpal akibat antar partikel saling menempel sehingga diameter hydraulic menjadi besar yang menjadikan viskositas meningkat. Alasan lain adalah akibat migrasi partikel dari pusat sumbu menuju dinding pipa, akibat efek thermophoresis yaitu Bergeraknya partikel dalam fluida dari temperatur tinggi menuju temperatur yang lebih rendah, sehingga distribusi partikel arah radial bervariasi. Pada proses pendinginan dimana temperatur dinding pipa lebih rendah dari temperatur fluida pada pusat sumbu, efek ini menyebabkan viskositas fluida nano pada dinding lebih tinggi. Selain itu viskositas fluida berbanding terbalik dengan temperatur, pada temperatur lebih rendah nilai viskositas fluida lebih tinggi dibandingkan dengan viskositas fluida pada temperatur tinggi.



Gambar 7. Faktor gesekan fluida nano pada prosentase volume partikel berbeda

Pada prosentase volume yang rendah yaitu 0,15% dan 0,25% faktor gesekan fluida nano hampir sama dengan faktor gesekan air murni dan persamaan (3) dapat digunakan untuk menghitung faktor gesekan fluida nano pada prosentase volume 0,15% dan 0,25%. Sedangkan persamaan (3) tidak dapat dipakai untuk menghitung faktor gesekan fluida nano pada prosentase 0,5%. Untuk menentukan rumus faktor gesekan pada prosentase partikel yang tinggi (0,5%) digunakan metode *curve fitting* kwadrat terkecil dengan model pada persamaan (7).

$$f = CRe^m \quad (7)$$



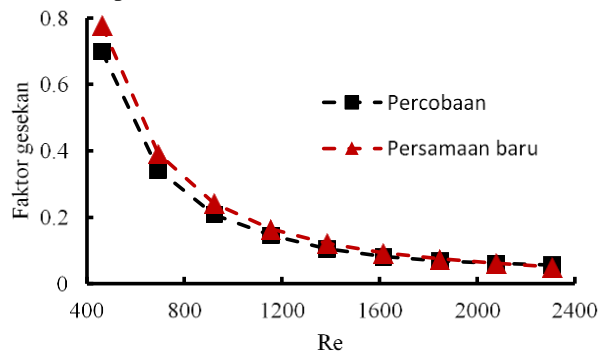
Gambar 8. Perbandingan antara prediksi dengan pengukuran faktor gesekan fluida nano

dimana, C dan m adalah konstanta yang didapatkan dari percobaan.

Dari data percobaan didapatkan konstanta untuk faktor gesekan fluida nano Al_2O_3 -air pada proses pendinginan aliran laminar ditunjukkan pada persamaan (8), yaitu

$$f = 24750 \text{Re}^{-1,69} \quad (8)$$

Gambar 9 menunjukkan perbandingan antara persamaan baru rugi tekanan fluida nano Al_2O_3 -air (8) dengan data hasil percobaan. Penyimpangan maksimum berkisar antara -11,2% sampai 17%.



Gambar 9. Perbandingan rugi tekanan antara persamaan (8) dengan data percobaan

5. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, rugi tekanan fluida nano Al_2O_3 -air dengan prosentase volume partikel 0,15%, 0,25% dan 0,5% pada pipa dengan proses pendinginan aliran laminar pada daerah berkembang penuh telah dilakukan penelitian secara eksperimental. Properti fluida nano Al_2O_3 -air yaitu viskositas dan densitas dilakukan pengukuran pada rentang temperatur 30-60 °C. Sesuai dengan data percobaan telah didapatkan persamaan faktor gesekan untuk proses pendinginan pada prosentase volume partikel yang rendah sebagai fungsi dari bilangan Reynold. Pada prosentase volume partikel yang tinggi yaitu 0,5%, persamaan rugi tekanan untuk air murni tidak dapat digunakan/gagal untuk memprediksi rugi tekanan fluida nano Al_2O_3 -air. Penyimpangan rugi tekanan secara empirik berkisar -11,2%+17% dari data percobaan. Pengaruh temperatur menjadi parameter yang sangat penting dalam menentukan rugi tekanan fluida nano. Bila fluida digunakan dalam aplikasi praktis, dua properti fluida nano yang sangat penting adalah viskositas dan densitas. Dan peningkatan viskositas fluida nano akan memperbesar *pumping power*, tetapi pada temperatur tinggi viskositas fluida nano turun dan dapat mengurangi *pumping power*.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Maxwell, J.C, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., Oxford University Press, London, 1892.
- [2] Choi, S.U.S.: Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, In: D.A. Siginer and H.P. Wang (Eds), *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, ASME FED, 231/MD, 66, 1995, pp. 99-105.
- [3] Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P., and W. Roetzel, "Temperature dependence of

thermal conductivity enhancement for nanofluid," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.125, 2003, pp. 567-574.

- [4] Hwang, Y., Lee, J.K., Jung, C.H., Cheong, S.I., Lee, C.G., Ku, B.C., and Jang, S.P., "Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids," *Thermochimica Acta*, Vol.455, 2007, pp.70-74.
- [5] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., and Yang, C., "Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, 2005, pp.367-373.
- [6] Yu, W., and Choi, S.U.S., "The Role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A Renovated Maxwell Model," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.5, No.1, 2003, pp.167-171.
- [7] Yu, W., and Choi, S.U.S., "The Role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A Renovated Hamilton-Crosser Model," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 6, 2004, pp.167-171.
- [8] Xue, Q. Z., "Model for effective thermal conductivity of nanofluids," *Physics Letters A*, Vol. 307, 2004, pp.313-317.
- [9] Koo, J., and Kleinstreuer, C., "A new thermal conductivity model for nanofluids," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 6, 2004, pp.577-588.
- [10] Prasher, R., Bhattacharya, P., and Phelan, P.E., "Brownian motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluid," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, 2006, pp.588-595.
- [11] Jang, S.P., and Choi, S.U.S., "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluid," *Applied Physics Letter*, Vol.84, 2004, pp.4316-4318.
- [12] Jang, S.P., and Choi, S.U.S., "Effects of parameter on nanofluid thermal conductivity," *Applied Physics Letter*, Vol.129, 2007, pp.617-623.
- [13] Wen, D., and Ding, Y., "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluid at the entrance region under laminar flow conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp.5181-5188.
- [14] Heris, S.Z., Etemad, S., and Esfahany, M.N., "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer," *International Communication of*



- Heat Mass Transfer*, Vol.33, No.4, 2006, pp. 529-535.
- [15] Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., and Wu, G., "Heat transfer properties of nanoparticle in-fluid dispersion (nanofluids) in laminar flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, 2005, pp.1107-1116.
- [16] Duangthongsuk, W., and Wongwises, S., "Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluids in double-tube counter flow heat exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp.2059-2067.
- [17] Vajjha, R.S., Das, D.K., and Kulkarni, D.P., "Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, pp.4067- 4618.
- [18] Suresh, S., Selvakumar, P., Chandrasekar, M., and Raman, V.S., "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al₂O₃/water nanofluid under turbulent flow with spiraled rod inserts," *Chemical Engineering and Processing*, Vol.53, 2012, pp.24–30.
- [19] Heyhat, M.M., Kowsary, F., Rashidi, A.M., Momenpour, M.H., and Amrollahi, A., "Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed flow regime," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 2013, 483-489.
- [20] Teng, T.P., Hung, Y.H., Jwo, C.C., Chen, C.C., and Jeng, L.Y., "Pressure drop of TiO₂ nanofluid in circular pipes," *Particuology*, Vol. 9, 2011, pp.486-491.
- [21] Lee, D., Kim, J.W., and Kim, B.G., "A new parameter to control heat transport in nanofluids: surface charge state of the particle in suspension," *Journal . Physics.Chemistry*, Vol.8, 2006, B 110: 4323-8.
- [22] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., and Lavine, A.S, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 7th ed, New York, 2011.
- [23] Moffat, R. J., "Describing the uncertainties in experimental results," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 11, 1988, pp. 3-17.
- [24] Pak, B.C., and Cho, I.Y., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with sub-micron metallic oxide particles," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, 1998, pp.151-170.
- [25] Zhou, M., Xia, G., Li, J., Chai, L., and Zhou, L., "Analysis of factor influencing thermal conductivity and viscosity in different kinds of surfactant solutions," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 36, 2012, pp. 22-29.

KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGGUNAAN NANOPARTIKEL PADA KINERJA PENGKONDISI UDARA

Sumeru¹⁾, Triaji Pangripto Pramudantoro²⁾, Ismail Wellid³⁾

Departemen Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung

Jalan Gegerkalong Hilir, Ciwaruga Bandung 40012. Indonesia

Phone: 0062-22-2013789, Fax: 0062-22-2013889

E-mail : sumeru84@gmail.com¹⁾, triajipangripto@gmail.com²⁾, iwellid@gmail.com³⁾

ABSTRAK

Dalam satu dekade terakhir, penggunaan nanopartikel pada bidang refrigerasi dan pengkondisi udara mulai dilakukan oleh para ahli. Kajian mereka melaporkan bahwa penggunaan nanopartikel pada mesin pendingin dapat meningkatkan kinerja. Penelitian ini melakukan pengujian kinerja pada pengkondisi udara dengan memasukkan nanopartikel ke dalam minyak pelumas kompresor. Pengkondisi udara yang digunakan adalah berkapasitas 1 HP (0.75 kW), menggunakan R22 sebagai refrigeran dengan mineral oil sebagai minyak pelumas di kompresor dan TiO₂ sebagai nanopartikel. Untuk menghasilkan peningkatan kinerja pada pengkondisi udara, konsentrasi nanopartikel di dalam pelumas harus tepat, karena bila terlalu kental, selain akan mengendap, juga akan menyebabkan penurunan kinerja akibat meningkatnya gesekan di dalam kompresor, dan bila terlalu encer, maka keberadaan nanopartikel tidak berpengaruh pada kinerja sistem. Berdasarkan pengamatan visual pada kelima campuran nanopartikel yang berbeda, pada penelitian ini digunakan konsentrasi TiO₂ sebesar 0.2 gram per liter minyak pelumas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas pendinginan meningkat sebesar 1,22%, daya input kompresor menurun sebesar 3,45% dan COP meningkat sebesar 4,84%. Disamping itu, penambahan nanopartikel TiO₂ ke dalam pelumas akan meningkatkan viskositas pelumas.

Kata kunci: Nanopartikel, pelumas kompresor, TiO₂, pengkondisi udara.

1. PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik oleh pengkondisi udara (AC) pada perumahan maupun gedung komersial dapat mencapai di atas 50% dari konsumsi energi listrik total [1]. Konsumsi energi akan turun bila kinerja AC dapat ditingkatkan. Terdapat beberapa metode untuk meningkatkan kinerja AC, seperti sub-cooling, inverter dan penggunaan nanopartikel pada refrigeran maupun pada pelumas kompresor.

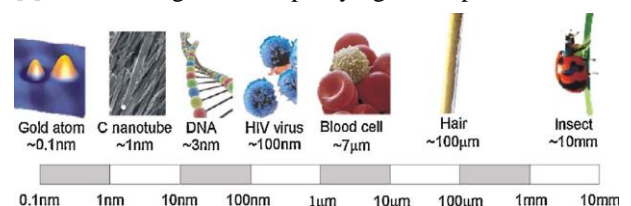
Aplikasi nanopartikel pada bidang refrigerasi dan pengkondisi udara masih dalam bentuk kajian eksperimen. Sehingga sampai saat ini belum terdapat produk refrigerasi dan pengkondisi udara yang mengandung nanopartikel yang terdapat di pasaran. Nanopartikel yang digunakan pada bidang refrigerasi dan pengkondisi udara umumnya berbasis logam atau oksida logam. Alasan penggunaan nanopartikel berbasis logam maupun logam adalah karena jenis ini memiliki konduktivitas thermal jauh lebih tinggi dibanding refrigeran dan minyak pelumas kompresor.

Penelitian oleh Lee *et al.* [2] melaporkan bahwa penggunaan nanopartikel fullerene pada pelumas sistem refrigerasi dapat meningkatkan karakteristik pelumas. Bi *et al.* [3] melaporkan bahwa nanopartikel TiO₂ dengan konsentrasi 0.1% (fraksi massa) di dalam pelumas sintetik pada lemari pendingin menggunakan refrigeran R134a dapat menurunkan daya input kompresor sebesar 26%. Kajian eksperimen selanjutnya dilakukan oleh Wang *et al.* [4], menggunakan nanopartikel NiFe₂O₄ pada pengkondisi udara dengan refrigeran HFC (R410a) melaporkan bahwa telah terjadi peningkatan kinerja sistem. Kajian eksperimen penggunaan nanopartikel TiO₂ di dalam pelumas kompresor lemari pendingin juga dilakukan oleh Sabareesh *et al.* [5], melaporkan bahwa penambahan nanopartikel di dalam pelumas akan menurunkan daya input kompresor sekitar 11% dan meningkatkan kinerja (COP) sistem sekitar 17%. Mahbubul *et al.* [6] juga melakukan eksperimen pada campuran refrigeran R141b dengan nanopartikel Al₂O₃,

melaporkan bahwa penambahan nanopartikel dapat meningkatkan konduktivitas thermal dan viskositas refrigeran. Penelitian lainnya dilakukan oleh Xing *et al.* [7] pada kompresor lemari pendingin, dengan mencampur pelumas mineral dengan fullerene C₆₀ nanopartikel, melaporkan bahwa COP meningkat hingga 5,6%. Pada penelitian ini akan dilakukan kajian eksperimen pada pengkondisi udara jenis split menggunakan refrigeran R22 dengan mencampurkan nanopartikel TiO₂ dengan konsentrasi 0.2 gram per liter pelumas kompresor. Dengan penambahan nanopartikel ke dalam pelumas kompresor maka akan merubah parameter-parameter pada pengkondisi udara. Parameter-parameter pengkondisi udara yang diamati pada penelitian ini adalah kapasitas pendinginan, daya input, COP (*coefficient of performance*) dan ratio kompresi.

2. NANOPARTIKEL

Nanopartikel adalah partikel dengan ukuran 1-100 nanometer (10⁻⁹ m). Nano partikel terbuat dari beberapa jenis material, seperti dari karbon, logam dan oksida logam, dll. Untuk memberikan ilustrasi ukuran nanometer, Serrano *et al.* [8] memberikan gambaran seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi ukuran untuk berbagai benda.

Penggunaan nanopartikel pada bidang refrigerasi dimulai sekitar satu dekade yang lalu, yaitu dengan menggunakan nanopartikel yang terbuat dari Cu (tembaga) dan CuO di dalam refrigeran sekunder *ethylene glycol* pada chiller [8].

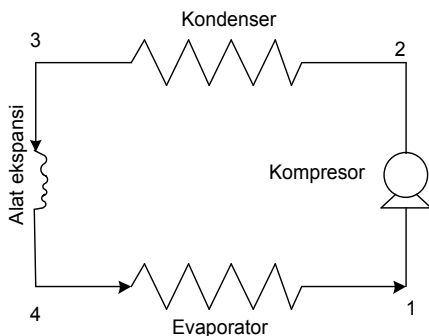
Fungsi dari nanopartikel tersebut untuk meningkatkan konduktivitas thermal refrigeran sekunder, sehingga dapat meningkatkan COP chiller. Terdapatnya nanopartikel pada refrigeran memiliki beberapa keuntungan, antara lain [8]:

1. Meningkatkan permukaan perpindahan kalor, sehingga total perpindahan kalor antara refrigeran dan lingkungan meningkat pula.
2. Meningkatkan konduktivitas thermal refrigeran, sehingga meningkat pula penyerapan dan pembuangan kalor dari dan ke lingkungan.
3. Untuk konsentrasi tertentu, dapat menurunkan kerja kompresor karena efek dari nanopartikel menurunkan gesekan antara dinding piston dengan silinder. Namun bila konsentrasi ditingkatkan maka kerja kompresor justru makin meningkat.
4. Menurunkan potensi pengendapan (*clogging*) pelumas pada kompresor. Sehingga dapat meningkatkan efisiensi kompresor.

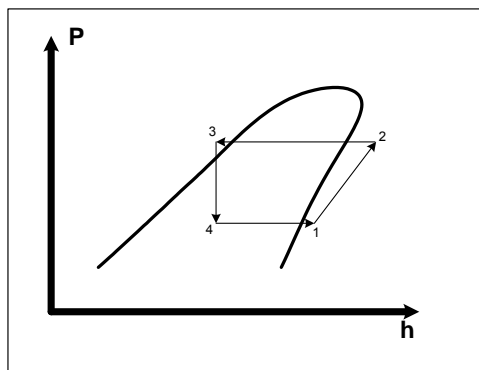
Peningkatan kinerja akibat adanya nanopartikel di dalam sistem refrigerasi tergantung pada jenis dan konsentrasi nanopartikel, jenis refrigeran dan pelumas.

3. METODOLOGI

Prinsip kerja dari pengkondisi udara yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem refrigerasi kompresi uap. Sistem ini memiliki empat komponen utama, yaitu kompresor, kondenser, alat ekspansi dan evaporator. Gambar skematik siklus kompresi uap terlihat seperti pada Gambar 2. Siklus kerja sistem refrigerasi kompresi uap bila digambarkan pada diagram P-h (pressure-enthalpy) terlihat seperti pada Gambar 3.



Gambar 2. Skematik sistem refrigerasi kompresi uap



Gambar 3. Siklus sistem refrigerasi kompresi uap pada diagram P-h

Pada pengkondisi udara, umumnya temperatur evaporator dirancang untuk bekerja pada temperatur 5°C sampai 10°C. Parameter-parameter yang menunjukkan kinerja pengkondisi

udara antara lain adalah kapasitas pendinginan (Q_e), daya input kompresor (W), COP dan ratio kompresi (RK). Berdasarkan Gambar 3, parameter-parameter tersebut dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Q_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$W = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_e}{W_k} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (3)$$

$$RK = \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

Sedangkan untuk menghitung peningkatan (*improvement*) kapasitas pendinginan dan COP dihitung dengan persamaan:

$$Q_{e_{imp}} = \frac{(Q_{e_{nano}} - Q_{e_{std}})}{Q_{e_{std}}} \quad (5)$$

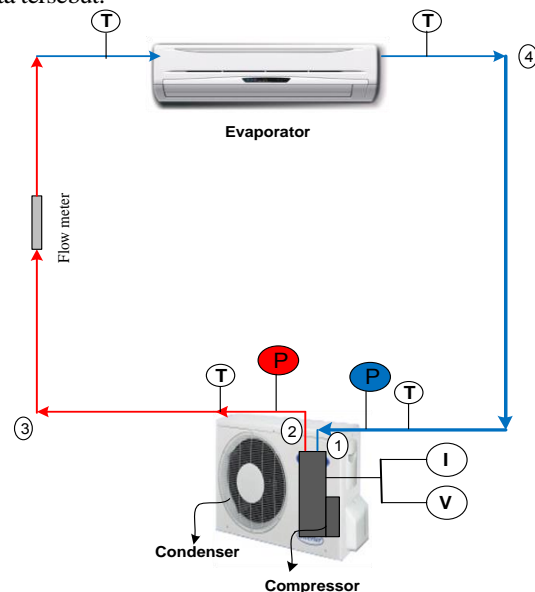
$$COP_{imp} = \frac{(COP_{nano} - COP_{std})}{COP_{std}} \quad (6)$$

Dimana $Q_{e_{std}}$ dan COP_{std} adalah kapasitas pendinginan dan COP pengkondisi udara standard (tanpa nanopartikel), berturut-turut. Sedangkan $Q_{e_{nano}}$ dan COP_{nano} adalah kapasitas pendinginan dan COP pengkondisi udara menggunakan nanopartikel, berturut-turut.

Penurunan daya input kompresor akibat penggunaan nanopartikel dihitung dengan persamaan,

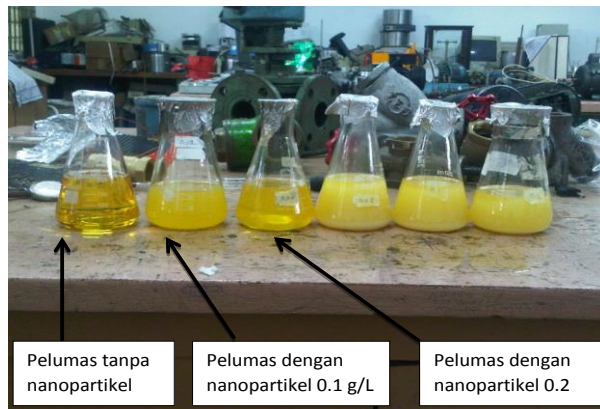
$$W_{red} = \frac{(W_{std} - W_{nano})}{W_{std}} \quad (7)$$

Pada penelitian ini digunakan AC split berkapasitas kompresor sebesar 1 HP (0.75 kW) dengan menggunakan refrigeran R22. Titik pengukuran pada penelitian ini terlihat seperti pada Gambar 4, dimana simbol T dan P mewakili sensor temperatur dan tekanan, berturut-turut. Pengujian dilakukan pada saat sistem telah stabil, dan pengambilan data dilakukan sebanyak lima kali tiap dua menit. Data yang digunakan pada pembahasan adalah nilai rata-rata dari kelima data tersebut.



Gambar 4. Titik pengukuran pengambilan data pada AC split

Pada penelitian ini dilakukan pencampuran nanopartikel TiO_2 ke dalam pelumas mineral dengan lima variasi campuran, yaitu 0,1 g/L; 0,2 g/L; 0,4 g/L; 0,5 g/L dan 0,6 g/L, seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Lima konsentrasi nanopartikel (TiO_2) di dalam pelumas kompresor

Berdasarkan pengamatan visual pada kelima campuran nanopartikel tersebut, maka ditentukan campuran 0,2 gram/liter yang akan dilakukan pengujian pada AC split. Dengan alasan, bila digunakan campuran dengan konsentrasi 0,1 g/L diduga tidak akan menimbulkan dampak positif pada sistem, oleh karena terlalu encer campurannya. Sedangkan campuran di atas 0,2 g/L menunjukkan perubahan warna yang signifikan pada pelumas, sehingga dikawatirkan menimbulkan gangguan (pengendapan) pada kompresor.

Selain dilakukan pengujian perubahan parameter-parameter pada AC split, juga dilakukan pengujian perubahan viskositas pelumas akibat penambahan nanopartikel.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang didapat selama pengukuran dan dengan menggunakan persamaan (1) – (7) maka didapat hasil seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengolahan data hasil pengukuran

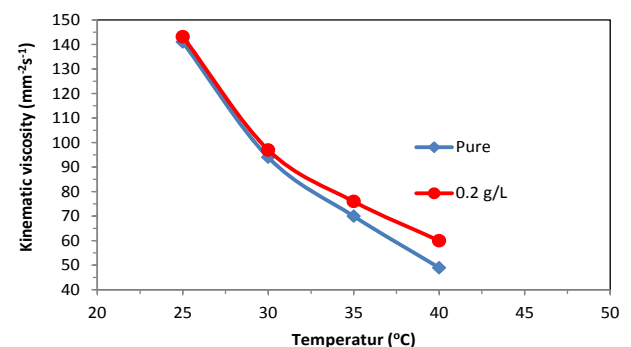
No.	Parameter	Satuan	Tanpa Nano-partikel	Dengan Nano-partikel
1.	P1	Bar	2,82	2,64
2.	P2	Bar	15,32	17,4
3.	I (Arus listrik)	Ampere	2,9	2,8
4.	V (Tegangan listrik)	Volt	218	218
5.	Laju aliran	gr/dt	10,8	10,8
6.	Qe	Watt	2025,4	2050,1
7.	W	Watt	632	610
8.	COP	-	3,20	3,36
9.	Qe _{imp}	%		1,22
10.	W _{red}	%		3,45
11.	COP _{imp}	%		4,84

Pada Tabel 1 terlihat bahwa penambahan nanopartikel TiO_2 sebesar 0,2 g/L relatif tidak berpengaruh pada tekanan suction (P1), namun meningkatkan tekanan discharge (P2) kompresor. Tekanan discharge kompresor sebelum ditambahkan nanopartikel sebesar 15,32 Bar, dan naik sekitar 2 Bar menjadi 17,4 Bar setelah ditambahkan nanopartikel. Pada

sistem refrigerasi standard, kenaikan tekanan discharge akan menaikkan daya input kompresor. Namun dengan penambahan nanopartikel ke dalam pelumas, kenaikan tekanan discharge tidak disertai kenaikan daya input, malah terjadi sebaliknya, yaitu penurunan daya input, yaitu dari 632 Watt menjadi 610 Watt. Hal ini akibat penggunaan nanopartikel akan menurunkan koefisien gesek antara piston dan silinder [5], sehingga kerja kompresor lebih ringan. Berdasarkan Tabel 1, penurunan konsumsi daya input kompresor ($W_{\text{reduction}}$) sebesar 3,45%. Hasil ini lebih kecil bila dibandingkan dengan hasil yang dilaporkan oleh Sabareesh et al. [5,8] yaitu sebesar 11%, pada lemari pendingin. Hal ini diduga disebabkan oleh perbedaan tekanan kerja antara pengkondisi udara dengan lemari pendingin. Oleh karena ratio kompresi lemari pendingin lebih besar dari pengkondisi udara, sehingga pengurangan konsumsi daya input kompresor pada lemari pendingin juga akan lebih tinggi dibandingkan dengan pada pengkondisi udara.

Pada Tabel 1 juga terlihat bahwa pencampuran nanopartikel ke dalam pelumas juga akan meningkatkan kapasitas pendinginan, yaitu dari 2025,4 Watt menjadi 2050,1 Watt. Peningkatan ini disebabkan ikut terbawanya nanopartikel dari kompresor oleh refrigeran dan mengalir melewati evaporator. Keberadaan nanopartikel di dalam evaporator dapat meningkatkan kapasitas pendinginan [3,5,7]. Peningkatan (*improvement*) kapasitas pendinginan pada penelitian ini adalah sebesar 1,22%. Nilai ini lebih rendah dari yang dilaporkan oleh Sabareesh et al. [5], yaitu sebesar 3,6%. Oleh karena terjadi peningkatan kapasitas pendinginan dan penurunan daya input maka COP sistem juga akan meningkat, yaitu sebesar 4,84%.

Oleh karena temperatur kerja kompresor bervariasi, yaitu dari 5°C hingga 70°C (untuk pengkondisi udara), maka pengukuran viskositas pelumas murni (*pure*) dan setelah dicampur dengan nanopartikel dilakukan dengan menggunakan Sychro-letric viscometer dengan memvariasikan temperatur. Hasil pengukuran viskositas tersebut sebagai fungsi dari temperatur terlihat seperti pada Gambar 6. Pada Gambar 6 terlihat bahwa viskositas pelumas murni dan campuran nanopartikel menurun dengan meningkatnya temperatur. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa viskositas pelumas dengan nanopartikel selalu lebih tinggi dibanding dengan pelumas tanpa nanopartikel. Perbedaan nilai viskositas semakin besar dengan naiknya temperatur minyak pelumas. Meningkatnya nilai viskositas ini diduga meningkatkan kinerja kompresor. Menurut teori [5,8], meningkatnya viskositas akan menurunkan rugi daya gesek. Namun untuk mendapatkan nilai viskositas yang optimal agar menghasilkan penurunan rugi gesek antara piston dan silinder yang maksimal masih perlu kajian lebih lanjut.



Gambar 6. Perubahan viskositas pelumas sebelum dan setelah dicampur dengan nanopartikel (TiO_2)



5. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa data dapat disimpulkan bahwa pengujian nanopartikel di dalam pelumas pengkondisi udara jenis split dapat meningkatkan kinerja sistem. Selain menurunkan konsumsi daya input kompresor sebesar 3,45%, penggunaan nanopartikel juga meningkatkan kapasitas pendinginan pengkondisi udara sebesar 1,22%. Peningkatan kapasitas pendinginan dan penurunan daya input akan disertai oleh peningkatan COP sistem, yaitu sebesar 4,84%. Penambahan nanopartikel ke dalam pelumas dapat dianggap seperti *additive* untuk meningkatkan kinerja kompresor. Perubahan parameter pada pelumas yang dicampur dengan nanopartikel TiO_2 adalah meningkatnya viskositas pelumas. Peningkatan viskositas lebih besar dengan naiknya temperatur pelumas.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Politeknik Negeri Bandung melalui skema Program Hibah Bersaing No. 237.11/PL1.R5/LT/2014, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini, baik melalui dana maupun fasilitas.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peres-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, Vol. 40, 2008, hal.394-398.
- [2] Lee, Kwangho, Hwang, Yujin, Cheong, Seongir, Kwon, Laeun, Kim, Sungchoon, Lee, and Jaekeun, "Performance evaluation of nano-lubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil", *Current Applied Physics*, Vol. 9, 2009, hal.128-131.
- [3] Bi, Sheng S., Shi, Lin, Zhang, and Li, "Application of nanoparticles in domestic refrigerators", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, hal.1834-1843.
- [4] Wang, R., Wu, Q., and W, Y., "Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants", *Energy and Buildings*, Vol. 42, 2010, hal.2111-2117.
- [5] Sabareesh, R.K., Gobinat, N., Sajith, V., Das, S., and Sobhan, C.B., "Application of TiO_2 nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems – An experimental investigation", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, 2012, hal.1989-1896.
- [6] Mahbubul, I.M., Saidur, R., and Amalina, M.A., "Influence of particle concentration and temperature on thermal conductivity and viscosity of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R141b}$ nanorefrigerant", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, 2013, hal.100-104.
- [7] Xing, M., Wang, R., and Yu, J., "Application of fullerene C_{60} nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 40, 2014, hal.398-403.
- [8] Serrano, E., Rus, G., and Martinez, J.G., "Nanotechnology for sustainable energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, hal.2373-2384.

STUDI NUMERIK RADIUS *VOLUTE TONGUE* RUMAH KEONG PADA BLOWER SENTRIFUGAL

Sutrisno¹⁾, Suwandi. S.²⁾, Ayub. S.³⁾

Prodi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra^{1,2,3)}
Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia^{1,2,3)}
Phone: 0062-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658^{1,2,3)}
E-mail : sutrisno@peter.petra.ac.id¹⁾

ABSTRAK

Radius Volute Tongue merupakan suatu parameter kelengkungan lidah dari rumah keong. Apabila dimensi radius tidak tepat menyebabkan terjadi separasi aliran sehingga kinerja blower menjadi rendah. Ketika separasi aliran menguasai daerah rumah keong berdampak terhadap fenomena stall pada blower. Oleh karena itu penelitian ini melakukan studi radius volute tongue terhadap karakteristik aliran dalam rumah keong. Penelitian ini dilakukan secara analisa numerik dengan menggunakan program komersial Computational Fluid Dynamic. Analisa penelitian difokuskan pada dampak radius volute tongue terhadap karakteristik aliran di dalam centrifugal blower. Radius volute tongue divariasikan dengan interval 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° dan 30°. Parameter aliran yang digunakan menggunakan kecepatan aliran 11 m/s, model viscous Realizable K-Epsilon. Metode simulasi blower yang digunakan Multiple Reference Frame dengan 4000 RPM. Karakteristik aliran diperlihatkan melalui streamline flow, kontur kecepatan dan kontur tekanan, sedangkan kinerja blower ditunjukkan terhadap selisih tekanan yang dihasilkan antara inlet dan outlet. Hasil analisa menunjukkan bahwa radius volute tongue yang kecil dihasilkan tekanan inlet yang lebih vakum, sedangkan selisih tekanan yang dihasilkan oleh radius volute tongue 5°. Hal ini memperlihatkan bahwa volute tongue untuk dihasilkan kinerja baik memiliki dimensi yang kecil. Distribusi tekanan outlet semakin besar seiring membesarnya radius volute tongue, namun tekanan vakum pada sisi inlet semakin rendah. Aplikasi blower ini digunakan untuk menghisap fluida sehingga maka dianjurkan dengan radius volute tongue yang kecil. Peningkatan kinerja blower yang dihasilkan dengan radius volute tongue 5° sebesar 16%, namun lebih dari sudut tersebut kinerja akan turun 25%.

Kata kunci: Blower, Centrifugal, Fan, Kinerja, Volute Tongue.

1. PENDAHULUAN

Volute tongue pada *volute chamber* berfungsi sebagai *single vane* yang berfungsi sebagai pembagi aliran fluida menuju *outlet*, selain itu sebagai aliran fluida akan disirkulasikan kembali disekitar *volute*. Oleh karena itu dampak geometri *volute chamber* sangat penting untuk mendapatkan tekanan *outlet* yang tinggi. Sebab aliran yang keluar dari *blade* masih memiliki momentum yang tinggi akan diarahkan oleh *volute tongue*, yaitu dalam istilah praktisi dikenal dengan lidah rumah keong. Bentuk lidah keong yang tajam akan menyebabkan aliran rentang terhadap terjadinya separasi aliran yang menyebabkan kerumitan dalam aliran. Namun pada desain *blower centrifugal* optimasi bentuk lidah rumah keong sering diabaikan, biasanya hanya difokuskan pada desain *blade* saja.

Salah satu peneliti Hamada dkk[1] menemukan bahwa desain dengan *volute tongue* tajam selalu dihasilkan performa buruk yang diakibatkan terjadinya separasi aliran dalam *volute chamber*. Sedangkan *volute tongue* yang tumpul aliran pada *volute chamber* diarah dengan baik pada aliran dengan kecepatan rendah maupun tinggi. Dalam peristiwa tersebut bahwa bentuk pengarah yaitu *volute tongue* yang dapat menuntun aliran dengan baik dapat mereduksi terjadinya separasi aliran.

Bentuk penuntun aliran yang baik menurut Anderson dkk[2] memiliki bentuk yang tumpul seperti bentuk *leading edge* pada *airfoil*. Dimana pengarah yang tumpul akan sangat tangguh dalam variasi beban *angle of attack* yang kuat. Aliran yang terseparasi disebabkan oleh dua faktor yaitu penuntun aliran yang buruk (bentuk tajam) dan *adverse pressure gradient* yang besar. Peristiwa yang dialami oleh aliran di dalam *volute chamber* terbagi dari dua bagian, yaitu bentuk

volute tongue sebagai pengarah dan celah radius *volute chamber* sebagai pengontrol terjadi *adverse pressure*.

Penelitian ini akan difokuskan pada variasi bentuk *volute tongue* terhadap karakteristik aliran di dalam *volute chamber* dengan menggunakan metode numerik yang terbukti mampu mengeksplorasi fenomena aliran didalam *volute chamber*.

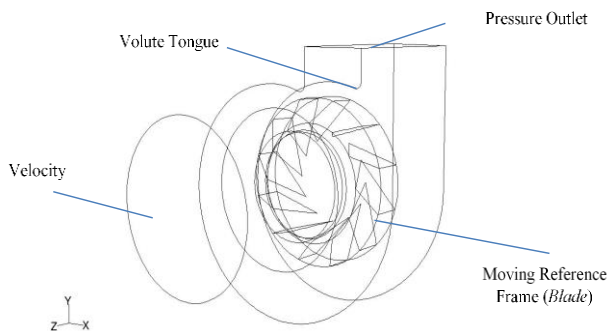
2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan secara analisa numerik dengan menggunakan program komersial *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Dimana proses validasi dilakukan dengan menggunakan *static pressure* dan manometer digital dengan merk Krisbow ditunjukkan pada Tabel 1. Bentuk model disesuaikan dengan produksi yang ada kemudian diuji dengan menggunakan dua alat ukur tersebut. Putaran motor untuk *blower* digunakan dengan RPM 4000, dan kecepatan aliran sebesar 11 m/s. Hasil yang didapatkan bahwa model viscous yang digunakan model Realizable K-Epsilon. Metode simulasi blower yang digunakan *Multiple Reference Frame* dengan 4000 RPM. Hasil menunjukkan bahwa perbedaan hasil numerik dan eksperimen mendekati sama kemudian dilanjutkan dalam variasi bentuk *volute tongue*.

Pada Gambar 1 diperlihatkan domain simulasi numerik dimana saluran masuk didefinisikan sebagai *velocity inlet* sedangkan saluran keluar didefinisikan sebagai *pressure outlet*. Selain itu definisi volume fluida yang berada diantara *blade* didefinisikan sebagai *volume moving reference frame* dan *blade* didefinisikan sebagai *moving wall*. Radius *volute tongue* divariasikan dengan interval 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° dan 30°.

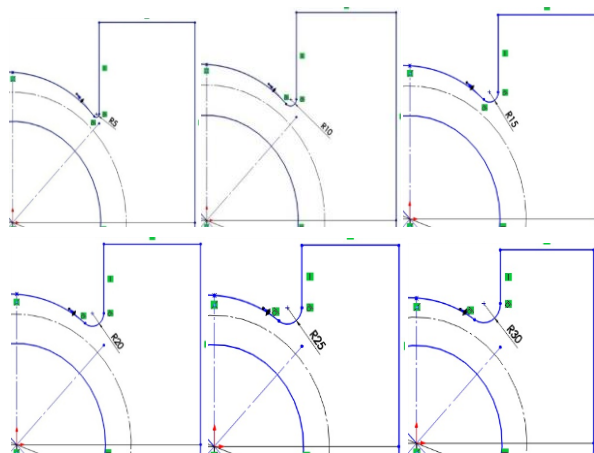
Tabel 1. Validasi numerik dan eksperimen

Numeric		Experiment			
		Static Pressure		Manometer	
Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
-2.66	0.145	-2.64	0.14	-2.156	0.137
		-2.63	0.14	-2.176	0.118
		-2.6	0.13	-2.136	0.137
		-2.61	0.14	-2.176	0.118
		-2.63	0.13	-2.097	0.118
		-2.62	0.13	-2.097	0.118
		-2.64	0.14	-2.078	0.137
		-2.64	0.14	-1.999	0.118
		-2.62	0.13	-2.136	0.098
		-2.6	0.14	-2.117	0.118



Gambar 1. Domain simulasi numerik

Desain *volute chamber* berikutnya adalah mendesain dengan aplikasi *radius volute tongue* yang dikemukakan oleh T. Sakai dan M. Hamada S. Tsujia. Dalam hal ini akan dicari *volute tongue* yang menghasilkan performa terbaik dan efek peningkatannya pada blower *volute* tetap, *radius volute tongue* yang digunakan mulai dari 5 mm sampai radius 30 mm. Dimensi dari beberapa *volute tongue* pada *volute chamber* bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Dimensi *volute tongue* dengan radius tertentu (5 mm – 30 mm)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

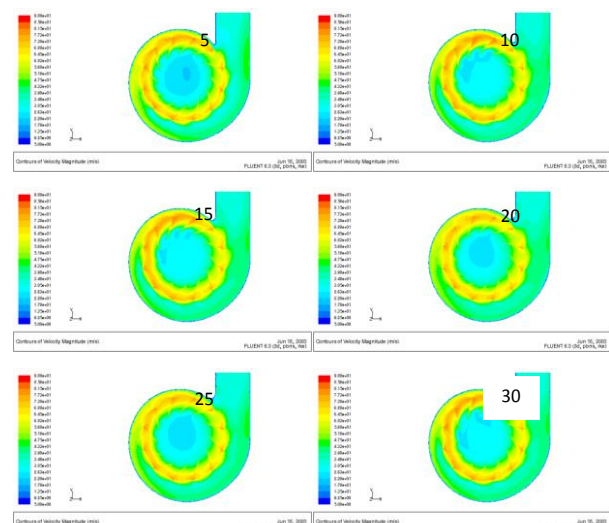
Hasil *studi numerik* ini dipaparkan dalam bentuk kontur kecepatan dan tekanan statis. Pada gambar 3 diperlihatkan kontur kecepatan pada saluran inlet dengan *volute tongue* kecil konsentrasi nilai minimum semakin membesar. Apabila

radius volute tongue diperbesar atau semakin tumpul maka daerah kecepatan minimum tersebut semakin mengecil. Hal ini mendukung prediksi bahwa dengan sudut pengarah yang tumpul menyebabkan aliran mudah mengalir kemudian menyebabkan daerah minimum kecepatan di daerah saluran masuk semakin lemah. Namun pada sudut 20° ke atas daerah minimum kecepatan tersebut semakin membesar kemudian tereduksi kembali, selain itu terjadi reduksi kecepatan di daerah *blade*. Hal ini menyebabkan peristiwa yang menarik untuk dikembangkan kembali untuk mengeksplorasi terjadi fenomena antara *radius volute tongue* 15° dan 20°.

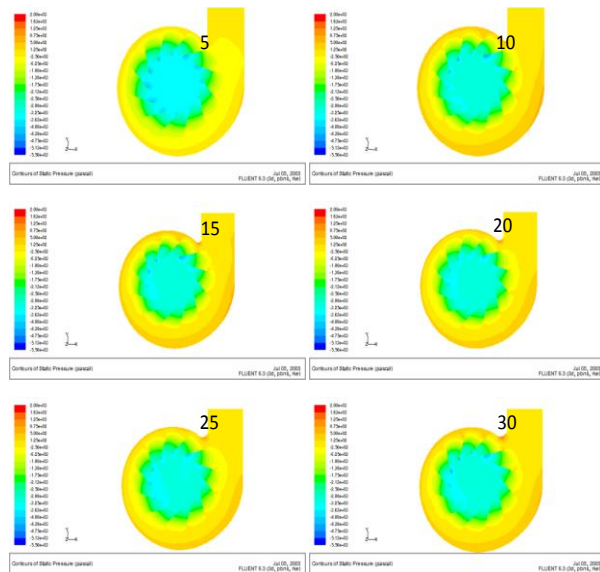
Distribusi tekanan yang terjadi akibat peningkatan sudut *volute tongue* dipaparkan pada gambar 4. Dimana prediksi distribusi kecepatan membuktikan bahwa kenaikan tekanan terbaik dicapai maksimal pada sudut *volute tongue* 15°. Apabila melebihi sudut tersebut maka tekanan akan semakin turun seiring dengan peningkatan *radius volute tongue*. Distribusi tekanan merupakan paparkan bukti untuk mempresentasi kinerja *blower*.

Analisa berdasarkan distribusi tekanan dan kecepatan pada kontur ini merupakan analisa dasar untuk memprediksi aliran, untuk memperkuat data tersebut dibutuhkan evaluasi nilai yang terkandung di dalam saluran inlet dan saluran keluar. Aplikasi *blower* ini dibagi menjadi dua kepentingan yaitu sebagai blower hisap atau tekanan. Nilai optimasi akan berbeda seiring dari kedua fungsi tersebut. Untuk *blower* tekanan selalu diharapkan tekanan pada saluran *discharge* semakin besar sedangkan pada *blower hisap* dihasilkan tekanan saluran masuk semakin vakum. Pada Gambar 5 dipaparkan distribusi tekanan pada saluran inlet dan outlet. Hasil menunjukkan bahwa untuk aplikasi untuk blower dengan dianjurkan menggunakan *radius volute tongue* yang lebih besar diatas 30°, sedangkan di daerah radius kecil paling optimal terjadi pada radius 5°. Sedangkan *blower* yang digunakan untuk vakum, maka disarankan menggunakan *radius volute tongue* yang lebih kecil, namun kinerja terbaik tetap terjadi pada sudut radius *tongue* 5°. Fenomena ini mempertegas bahwa sudut *tongue* 5° merupakan nilai paling optimal digunakan pada *blower* tekanan maupun *blower* hisap.

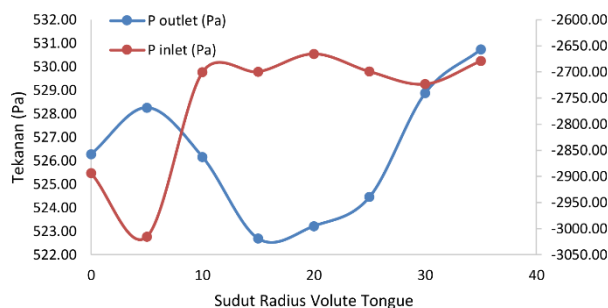
Fungsi sebuah *blower centrifugal* bertujuan untuk meningkatkan tekanan pada saluran masuk menuju saluran keluar. Hal ini dapat dibuktikan dengan menggunakan paparan perbedaan tekanan yang terjadi pada saluran inlet dan outlet yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 3. kontur *velocity volute tongue* (5 mm – 30 mm)

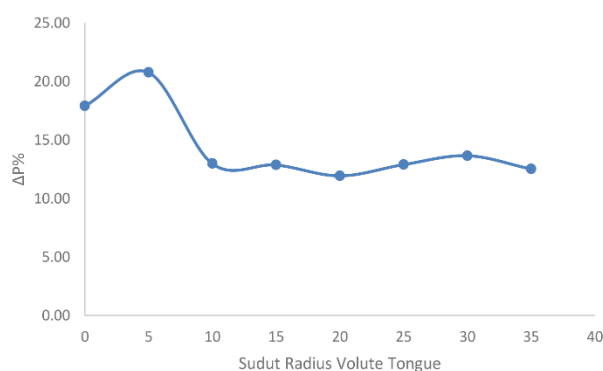


Gambar 4. kontur static pressure volute tongue (5 mm-30 mm)



Gambar 5. Tekanan Inlet dan Outlet Dampak Variasi Radius Volute Tongue.

Peningkatan tekanan ini dibandingkan terhadap desain produk asli blower yang berada pada mesin pengering pencuci beras. Dengan menggunakan variasi sudut radius *volute tongue* didapatkan peningkatan yang cukup signifikan yaitu 20% lebih apabila digunakan radius *volute tongue* 5° dengan peningkatan celah *volute chamber* 15mm. Peningkatan bentuk *volute tongue* itu sendiri hanya meningkatkan 8% dimana 12 % disebabkan oleh peningkatan celah *volute chamber* 15mm. Apabila dibandingkan dengan peristiwa Hamada dkk[1] aplikasi *blower* ini merupakan aliran dengan kecepatan yang relatif rendah sehingga bentuk *volute tongue* yang tajam masih menunjukkan kinerja yang cukup baik. Apabila kecepatan aliran ditingkatkan fenomena ini akan berkebalikan.



Gambar 6. Perbedaan Tekanan Inlet dan Outlet Dampak Variasi Radius Volute Tongue

4. KESIMPULAN

Karakteristik aliran apabila terjadi peningkatan radius *volute tongue* menyebabkan beberapa hal yaitu:

- Daerah minimal kecepatan di saluran masuk akan semakin kecil antara 0° sampai dengan 15°.
- Daerah maksimum di daerah *blade* semakin kecil di atas radius *volute tongue* 20°.
- Reduksi tekanan output antara radius *volute tongue* 5° sampai 15°.
- Tekanan output meningkat tajam dari radius *volute tongue* 15° sampai dengan 35°.
- Tekanan inlet meningkat setelah radius *volute tongue* 5°.

Kinerja paling baik ditunjukkan pada *volute tongue* 5° dan penambahan celah *volute chamber* 15 mm yang menghasilkan peningkatan tekanan 20% dari desain awal yang diaplikasi pada mesin pencuci besar di PT. Agrindo Tbk.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hamada, M. Tsujia, S and Sakai, T., 2000, *Flow Measurement Around A Fan Volute Tongue Using Particle Tracking Velocimetry*. Tokyo: Department of Mechanical Engineering Science University of Tokyo, 2000.
- [2] Anderson J. Jr., 2001., *Fundamental of Aerodynamics*, McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, Third edition, Singapore.

KARAKTERISASI UNJUK KERJA MESIN DIESEL GENERATOR SET SISTEM DUAL FUEL SOLAR DAN SYNGAS BATUBARA

Zuhri Tamam¹⁾, Bambang Sudarmanta²⁾

Prodi Magister Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri ^{1,2)}

Institut Teknologi Sepuluh Nopember ^{1,2)}

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111 ^{1,2)}

E-mail : zvhitamz@gmail.com¹⁾, sudarmanta@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Sejalan dengan pengembangan syngas batubara sebagai bahan bakar alternatif pada motor pembakaran dalam, maka dalam penelitian ini dilakukan aplikasi syngas batubara pada mesin diesel dengan sistem dual fuel. Penelitian difokuskan untuk mengkarakterisasi unjuk kerja dan mendapatkan substitusi syngas yang optimal. Syngas berasal dari proses gasifikasi yang dilakukan pada Updraft Gasifier dengan bahan yang berasal dari batubara. Karakterisasi unjuk kerja sistem dual fuel dilakukan dengan pengujian mesin diesel pada putaran konstan 2000 rpm. Pembebanan dimulai dari beban 500 Watt hingga 5000 Watt dengan interval kenaikan beban 500 Watt. Mekanisme pemasukan syngas dilakukan menggunakan pressure regulator dan mixer berbentuk venturi yang di dalamnya dipasang mixing jet. Jumlah syngas yang dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui pengaturan tekanan pada pressure regulator sebesar 0,5 bar hingga 2,5 bar dengan interval 0,5 bar. Pengukuran dilakukan terhadap laju alir udara dan syngas, waktu konsumsi minyak solar 15 ml, temperatur: mesin diesel, gas buang, oli pelumas, cairan pendingin, arus dan tegangan. Hasil yang didapatkan dari penelitian menunjukkan bahwa jika dibandingkan dengan kondisi standar maka dengan substitusi syngas batubara dapat mengurangi konsumsi minyak solar hingga 76%, meningkatkan efisiensi termal hingga 4 kali lipat tetapi meningkatkan SFC rata-rata hingga 19,68 kg/HP.jam dan menurunkan AFR rata-rata sebesar 3,78%.

Kata kunci: dual fuel, syngas batubara, unjuk kerja.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel sangatlah bergantung pada penggunaan bahan bakar minyak solar guna menyediakan pasokan listrik untuk masyarakat, akan tetapi di sisi lain cadangan minyak bumi Indonesia semakin menipis dan diperkirakan akan habis dalam waktu satu sampai dua dekade.

Untuk mengatasi krisis sumber energi nasional ini maka salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan ketersediaan batubara yang masih melimpah, yaitu dengan menerapkan *synthetic gas* hasil gasifikasi batubara pada mesin diesel dengan sistem *dual fuel*. Hal ini dapat mengurangi penggunaan bahan bakar solar oleh PLTD milik PT. PLN sehingga dapat menekan biaya produksi listrik sekaligus mengurangi beban subsidi pemerintah. Disamping itu juga akan meningkatkan nilai tambah batubara, menambh devisa negara.

Gasifikasi adalah suatu teknologi proses yang mengubah bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas. Gas yang dimaksud adalah gas-gas yang keluar dari proses gasifikasi yang pada umumnya berbentuk CO, CO₂, H₂ dan CH₄. Dengan mengubah batubara menjadi gas, maka material yang tidak diinginkan yang terkandung dalam batubara seperti senyawa sulfur dan abu dapat dihilangkan dari gas dengan menggunakan metode tertentu sehingga dapat dihasilkan gas bersih dan dapat dialirkan sebagai sumber energi. Teknologi gasifikasi ini semakin diminati disebabkan harga bahan bakar minyak yang semakin mahal. Pemanfaatan batubara dengan teknologi gasifikasi diharapkan menjadi sumber energi baru dan dapat menggantikan peran bahan bakar minyak ke depannya.

Diesel bahan bakar ganda atau Diesel Dual Fuel (DDF) adalah mesin standar diesel yang ditambahkan bahan bakar lain pada intake manifold dan penyalaan bahan bakar dilakukan oleh semprotan solar yang disebut pilot fuel. Secara sederhana bahan bakar cair atau gas dapat dimasukkan

dengan membuat lubang pada intake manifold mesin diesel. Tergantung dari jenis bahan bakar yang ditambahkan, apabila jenis liquid/cair yang digunakan seperti ethanol atau methanol maka perlu dibuatkan karburator seperti pada mesin bensin atau dipompa dengan tekanan tertentu dan dikabutkan saat masuk ke saluran udara masuk mesin diesel. Sedangkan untuk bahan bakar gas tidak diperlukan lagi karburator karena bahan bakar gas sudah mempunyai tekanan sendiri.

Penelitian ini mempunyai tujuan utama yaitu mencari komposisi yang optimal antara bahan bakar solar dengan syngas batubara terhadap unjuk kerja mesin *dual fuel* hingga dapat menghasilkan tenaga listrik. Sedangkan manfaat dari penelitian ini jika diterapkan pada PLTD, adalah: mudah dan murah untuk diaplikasikan pada mesin diesel, mengurangi pemakaian bahan bakar solar dan meningkatkan efisiensi mesin diesel.

Penelitian yang dilakukan Santoso, Ari Budi [8] menggunakan mesin diesel satu silinder empat langkah yang telah dimodifikasi pada saluran isap untuk menyuplai biogas berupa penambahan mixer venturi dan blower/fan untuk menyuplai tambahan udara isap. Biogas yang diaplikasikan pada mesin berbahan baku kotoran sapi. Pembebanan yang dilakukan menggunakan lampu hingga 2000 Watt. Hasilnya, dengan menggunakan sistem *dual fuel* konsumsi minyak solar berkurang rata-rata 35,08%, sfc mengalami peningkatan rata-rata 326,95% dari sfc standar (murni solar), efisiensi termal mengalami penurunan rata-rata 12,5% dari standar, AFR mengalami penurunan rata-rata 74,53% dari standar dan mass flowrate mengalami kenaikan rata-rata sebesar 13,56% dibandingkan standar.

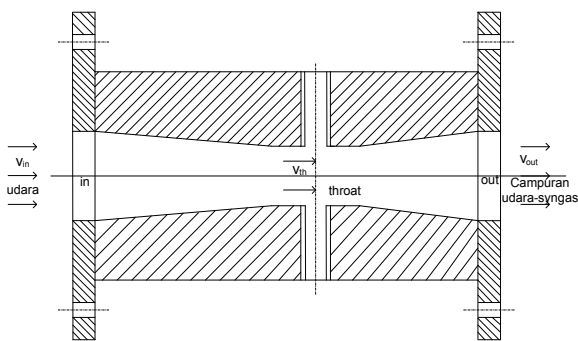
2. METODOLOGI

Pengujian dilakukan pada diesel engine constant speed electrical dynamometer. Pengujian dilakukan pada mesin sebagai alat uji dengan poros utama yang telah terkopel

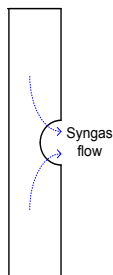
langsung dengan electrical generator sebagai electrical dynamometer. Metode pengujian pada penelitian ini dibagi atas 2 (dua) kelompok, yaitu: kelompok kontrol, yaitu motor diesel menggunakan minyak solar dan kelompok uji, adalah motor diesel menggunakan sistem *dual fuel*.

Mesin yang digunakan adalah mesin diesel 4 (empat) langkah dengan daya 40, 6 kW. Pembebanan yang dilakukan menggunakan beban lampu pijar sebanyak 10 buah dengan konsumsi daya masing-masing lampu sebesar 500 Watt, lampu-lampu ini disusun secara paralel dengan dilengkapi saklar pada tiap-tiap lampu untuk pengaturan beban. Bahan bakar minyak solar yang digunakan adalah minyak solar yang didapatkan dari pasaran yang diproduksi oleh Pertamina. Sedangkan syngas batubara yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai komposisi CO 28,3%, O₂ 2,6%, H₂ 16,5%, CO₂ 6,6%, N₂ 45,7% dan kandungan lainnya 0,3% dengan nilai kalor bawah sebesar 1420,7 cal/m³ yang disimpan dalam tabung dengan tekanan yang dijaga pada 8 bar selama pengujian.

Proses pemasukan syngas dengan sistem *dual fuel* menggunakan *mixer* sebagai tempat udara dan syngas dicampur sebelum masuk ke dalam ruang bakar, *mixer* dibuat dengan bentuk venturi. *Mixer* dipasang pada saluran masuk (*intake manifold*) udara.



Gambar 1. Skema *mixer*



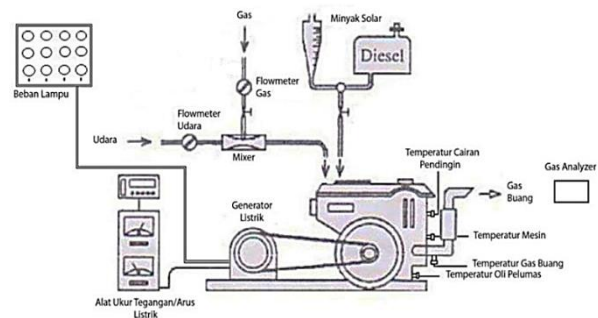
Gambar 2. *Mixing jet*

Atas pertimbangan kemungkinan bahwa besarnya tekanan syngas yang keluar dari *pressure regulator* akan menyebabkan udara segar yang masuk ke ruang bakar menjadi terhambat, maka dipasang alat di antara dua saluran masuk syngas ke dalam *mixer* yang berada di sekitar *throat* seperti pada gambar 2 yang dinamakan *mixing jet*. Alat ini berupa silinder *hollow* (bukan pejal) yang ditambah satu lubang di tengah untuk keluaran syngas yang masuk dari kedua ujung lubang silinder dan pada pemasangannya lubang tersebut mengarah ke katup *intake*.

Prosedur pengujian ini dilakukan dengan mem-variasikan jumlah syngas yang dimasukkan ke dalam ruang bakar melalui pengaturan tekanan pada *pressure regulator* sebesar 0,5 bar hingga 2,5 bar dengan interval 0,5 bar. Setiap satu

variasi tekanan syngas dilakukan pembebanan secara bertahap dari beban 500 Watt hingga 5000 Watt dan setiap tahap pembebanan dilakukan pengambilan data. Data yang diambil antara lain laju alir udara dan syngas, waktu konsumsi minyak solar setiap 15 ml, temperatur: mesin diesel, gas buang, minyak pelumas, cairan pendingin, arus dan tegangan. Selama pengujian berlangsung putaran mesin dijaga konstan pada 2000 rpm dan tekanan tabung *storage* syngas dijaga pada tekanan 8 bar untuk menjamin tekanan *supply* syngas masuk ruang bakar terjaga stabil/konstan. Pada tekanan 2,5 bar saat pengujian, putaran mesin terendah yang dicapai mesin adalah 2200 rpm sehingga pengambilan data hanya dapat dilakukan mulai beban 2500 Watt dimana putaran 2000 rpm dapat tercapai.

Berikut ini adalah gambar skema pengujian yang dilakukan:

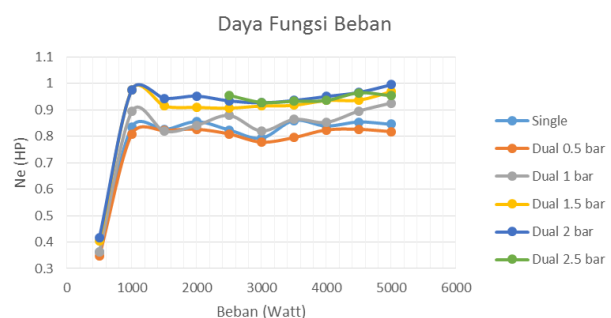


Gambar 3. Skema pengujian

Sebelum dilakukan pengujian dengan sistem *dual fuel* maka terlebih dahulu dilakukan pengujian dengan bahan bakar minyak solar saja, hal ini dimaksudkan agar didapatkan data awal sebagai acuan/standar guna melihat perubahan parameter-parameter yang terjadi saat penerapan sistem *dual fuel*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Daya (Ne)



Gambar 4. Daya mesin fungsi beban listrik

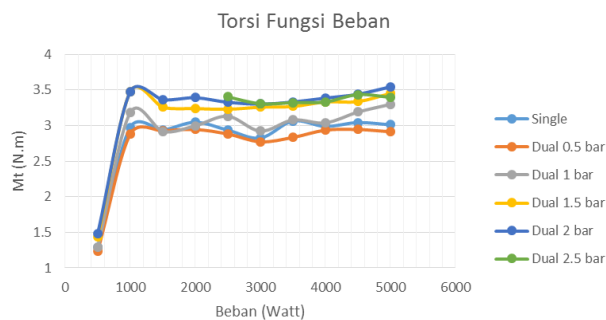
Unit gen-set tersebut bekerja dengan menghasilkan tegangan listrik dimana putaran generator harus dijaga konstan pada 2000 rpm untuk mendapatkan tegangan listrik tetap, sementara pada saat beban listrik ditambah maka akan menyebabkan putaran generator yang diputar oleh engine akan turun.

Sehingga analisa yang dapat dinyatakan adalah daya yang diperlukan akan naik dengan bertambahnya beban listrik yang diberikan sebagai kompensasi bertambahnya bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Bahan bakar yang bertambah banyak menyebabkan semakin banyak energi

yang dapat dikonversi menjadi energi panas dan mekanik dengan udara yang cukup. Energi menjadikan daya engine semakin besar sesuai dengan beban yang diberikan kepada engine.

Idealnya untuk putaran engine konstan daya akan sebanding dengan bertambahnya beban, karena nilai putaran tidak berpengaruh pada perubahan nilai daya engine. Untuk beban 500 hingga 1000 Watt mengikuti idealnya kenaikan daya yang linier dengan kenaikan beban, sementara untuk beban 1000 hingga 5000 Watt terlihat adanya perubahan dan variasi nilai yang menyimpang dari bentuk ideal meskipun secara umum dapat dikategorikan linier. Hal ini disebabkan apabila dilihat dari hasil pengambilan data, nilai dari voltase yang dibaca oleh alat ukur mengalami fluktuasi padahal pada saat pengujian berlangsung putaran pada setiap variasi beban dijaga konstan sebesar 2000 rpm. Penulis menganalisa bahwa tidak terjadi permasalahan apapun pada engine yang menyebabkan terjadinya variasi nilai tersebut. Kemungkinan permasalahan yang terjadi ada pada sistem generator listrik, naik-turunnya voltase tersebut terjadi pada beban 1000 hingga 5000 Watt.

Torsi (Mt)



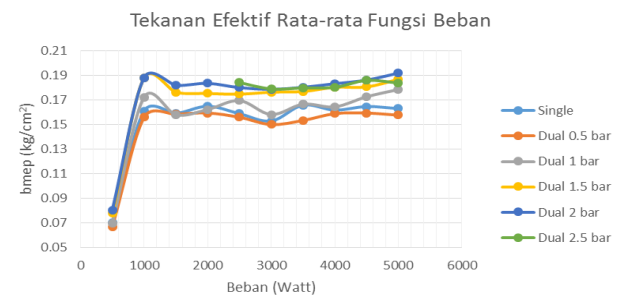
Gambar 5. Torsi mesin fungsi beban listrik.

Grafik torsi engine fungsi beban listrik ini memiliki karakteristik yang sama dengan grafik daya engine. Torsi merupakan ukuran kemampuan dari mesin untuk menghasilkan kerja. Torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu beban diberikan ke poros engine. Sehingga dapat disimpulkan secara sederhana bahwa torsi akan semakin besar, apabila beban yang diberikan juga semakin besar.

Secara umum penambahan jumlah syngas yang masuk ke ruang bakar akan membuat torsi yang dihasilkan oleh engine semakin besar, karena semakin banyak bahan bakar yang masuk ke ruang bakar yang kemudian diubah menjadi energi mekanik mengatasi beban pada poros engine.

Idealnya bentuk grafik torsi putaran konstan adalah bentuk linier dari torsi engine terhadap pertambahan beban. Karena itu pada beban 500 hingga 1000 Watt pada gambar 5 menunjukkan model yang demikian. Akan tetapi apabila kita tinjau pada beban 1000 hingga 5000 Watt bentuk garis-garis yang menghubungkan beberapa titik sesuai dengan variasi laju alir massa syngas membentuk hubungan yang tidak stabil dan ada perbedaan yang sedikit lebih besar dari beban di bawahnya, hal ini disebabkan adanya perbedaan nilai voltase yang dimulai dari beban 1000 Watt. Kemudian ketidakstabilan voltase listrik ini kemudian mempengaruhi nilai daya engine yang dihasilkan oleh engine, dimana daya engine sebagai variabel pembentuk nilai torsi mempengaruhi nilai torsi yang direpresentasikan melalui grafik torsi fungsi beban listrik yang demikian.

Tekanan Efektif Rata-rata (bmep)



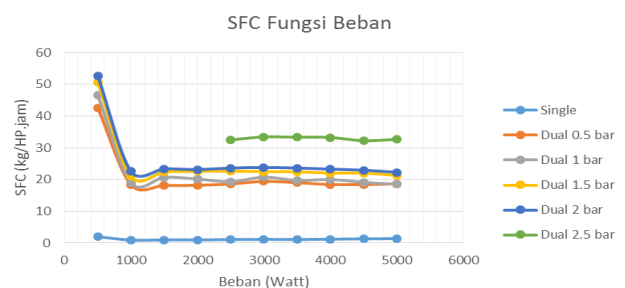
Gambar 6. Bmep fungsi beban listrik.

Secara umum penambahan jumlah syngas yang masuk ke ruang bakar akan membuat *bmep* yang dihasilkan oleh engine semakin besar. Proses pembakaran campuran udara-bahan bakar menghasilkan tekanan yang bekerja pada piston untuk melakukan langkah kerja. Grafik *bmep* terlihat mempunyai kecenderungan naik seiring dengan bertambahnya beban.

Pengamatan yang lebih detail menunjukkan pada beban 500 hingga 1000 Watt pada gambar 6 membentuk garis lurus linier mengikuti bentuk ideal dari grafik torsi fungsi beban listrik. Akan tetapi apabila kita tinjau pada beban 1000 hingga 5000 Watt bentuk garis-garis yang menghubungkan beberapa titik sesuai dengan variasi laju alir massa syngas membentuk hubungan yang tidak stabil dan ada perbedaan yang sedikit lebih besar dari beban di bawahnya, hal ini disebabkan adanya perbedaan nilai voltase yang dimulai dari beban 1000 Watt. Kemudian ketidakstabilan voltase listrik ini kemudian mempengaruhi nilai daya engine yang dihasilkan oleh engine, dimana daya engine sebagai variabel pembentuk nilai torsi mempengaruhi nilai torsi yang direpresentasikan melalui grafik torsi fungsi beban listrik yang demikian.

Dalam keadaan ideal, *bmep* umumnya lebih besar dari tekanan atmosfer. Namun pada data pengujian ini terlihat bahwa nilai *bmep* berada di bawah tekanan atmosfer. Hal ini dimungkinkan karena tekanan yang ditampilkan adalah tekanan alat ukur, sehingga untuk mendapatkan tekanan absolute harus ditambah dengan tekanan atmosfer. Selain hal tersebut nilai *bmep* yang berada di bawah tekanan atmosfer dimungkinkan karena generator tersebut dioperasikan di bawah kondisi operasi minimal yang disyaratkan, akibatnya performa yang dihasilkan pada pembebanan awal tidak akan optimal.

Specific Fuel Consumption (SFC)

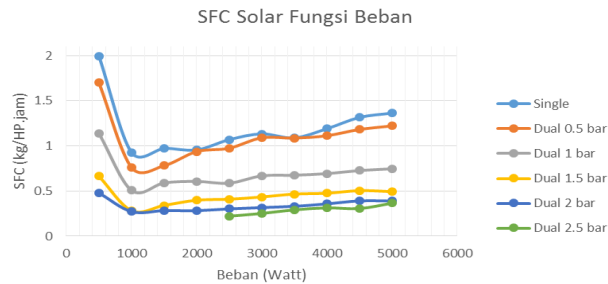


Gambar 7. SFC *single-fuel* dan *dual fuel* fungsi beban listrik.

Dari Gambar 7 terlihat pada tekanan 2,5 bar adalah kondisi maksimum dengan nilai *sfc* dan persentase penggantian minyak solar paling besar dimana engine tidak mati pada saat beban listrik nol, akan tetapi pada tekanan tersebut pada saat pengujian, putaran mesin terendah yang dicapai mesin adalah

2200 rpm sehingga pengambilan data hanya dapat dilakukan mulai beban 2500 Watt dimana putaran 2000 rpm dapat tercapai.

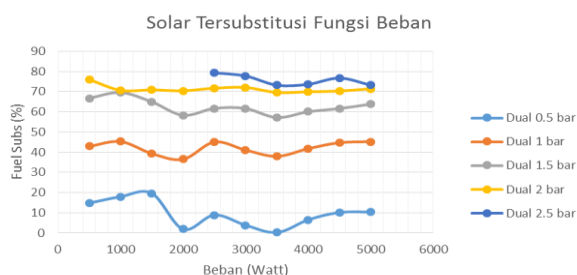
Apabila diambil satu kondisi beban listrik maka akan terlihat setiap penambahan syngas akan membuat besar sfc semakin besar. Hal ini disebabkan laju alir massa syngas sangat besar dibandingkan minyak solar. Demikian pula saat penggunaan syngas dimana meskipun waktu yang diperlukan untuk konsumsi minyak solar semakin lama, akan tetapi saat setingan awal laju alir massa syngas sudah sangat besar melebihi laju alir massa minyak solar dan hal ini sangat terasa pada saat beban rendah.



Gambar 8. SFC minyak solar fungsi beban listrik.

Pada Gambar 8 menunjukkan perbandingan konsumsi bahan bakar spesifik minyak solar saja untuk *single fuel* dan pada saat *dual fuel* dioperasikan. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa secara umum konsumsi minyak solar mengalami penurunan dengan adanya penambahan jumlah syngas yang masuk ke dalam ruang bakar melalui variasi tekanan syngas. Ini berarti bahwa jumlah syngas yang masuk ke ruang bakar dapat menggantikan sejumlah bahan bakar minyak solar untuk mendapatkan daya yang dibutuhkan untuk mengatasi beban listrik.

Berdasarkan analisa, besar sfc hanya dipengaruhi oleh besarnya perubahan daya engine (N_e) dan waktu konsumsi bahan bakar (s), sedangkan massa bahan bakar (m_{bb}) minyak solar konstan. Daya engine naik seiring dengan kenaikan beban listrik sementara waktu konsumsi bahan bakar minyak solar semakin singkat. Pada tekanan 2,5 bar adalah kondisi optimal dimana waktu dan daya yang diberikan memberikan nilai sfc paling rendah. Fenomena yang ditampilkan dalam kondisi ini adalah AFR pada pengujian engine putaran stasioner selalu berubah berdasarkan beban yang diberikan. Namun tidak setiap nilai AFR dapat menghasilkan pembakaran yang optimal. Pada beban kecil, AFR yang terbentuk adalah campuran yang lebih miskin sehingga untuk menghasilkan daya efektif sebesar 1 hp selama 1 jam dibutuhkan lebih banyak campuran bahan bakar. Semakin besar beban maka AFR akan bergeser ke arah campuran yang lebih kaya, namun belum tentu setiap campuran yang kaya mampu menghasilkan daya efektif sebesar 1 hp.

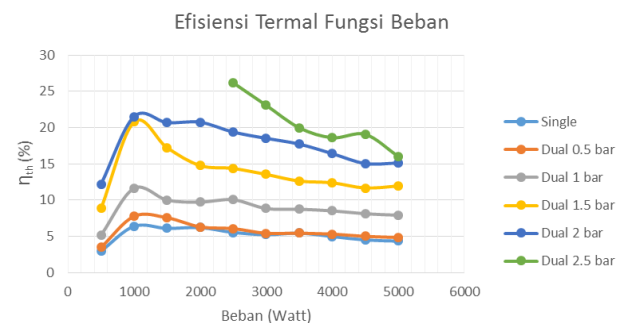


Gambar 9. Persentase penggantian konsumsi minyak solar oleh syngas pada engine fungsi beban listrik

Melalui gambar 9 dapat dilihat jumlah persentase minyak solar yang digantikan oleh syngas setiap penambahan syngas dan beban listrik. Setiap kenaikan laju alir massa syngas, maka besarnya jumlah persentase minyak solar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar untuk menjaga putaran engine konstan akan semakin turun. Sehingga jumlah persentase minyak solar yang digantikan akan semakin besar. Saat beban listrik semakin besar, jumlah minyak solar semakin banyak untuk menjaga putaran konstan sehingga persentase penggantian semakin kecil. Pada grafik tersebut terlihat bahwa jumlah persentase penggantian minyak solar yang terbesar terjadi pada tekanan syngas 2,5 bar. Hal ini disebabkan syngas menjalani perannya sebagai *secondary fuel* dengan baik, meskipun perannya tidak dapat menggantikan minyak solar 100%. Minyak solar dibutuhkan tidak hanya sebagai *primary fuel/pilot fuel* tetapi juga sebagai pelumas pada bagian pompa bahan bakar minyak.

Syngas memiliki kelebihan untuk mencapai homogenitas campuran udara-bahan bakar, sehingga diharapkan periode tunda (*delay period*) proses pembakaran dalam ruang bakar semakin pendek. Apabila pada akhirnya engine hanya mampu mengakomodasi laju alir massa syngas maksimum seperti yang direpresentasikan oleh tekanan syngas 2,5 bar, hal tersebut disebabkan dengan kondisi di atas tekanan syngas 2,5 bar campuran udara-bahan bakar telah menjadi sangat kaya dan menyebabkan pembakaran di dalam ruang bakar tidak lagi sempurna dan banyak bahan bakar yang tidak terbakar karena tidak mendapat udara yang cukup untuk pembakaran. Sehingga banyak energi dari bahan bakar yang terbuang, dan tentu saja daya yang dihasilkan engine berkurang.

Efisiensi Termal



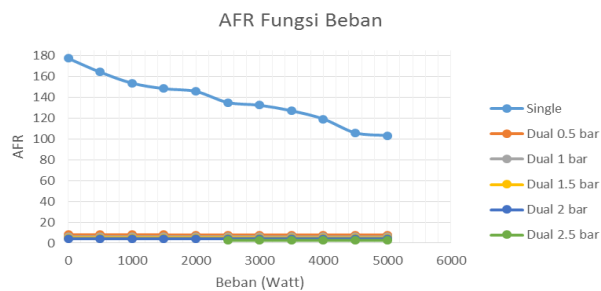
Gambar 10. Efisiensi termal fungsi beban listrik.

Dari Gambar 10 terlihat bahwa efisiensi termal tertinggi ada pada penggunaan *dual fuel* dengan tekanan syngas 2,5 bar, semakin besar laju aliran massa syngas yang direpresentasikan oleh besar tekanan syngas maka efisiensi termal juga semakin baik. Hal ini disebabkan efisiensi termal berbanding lurus dengan daya efektif yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Efisiensi termal menurun karena jumlah energi input yang masuk ke ruang bakar sudah terlalu besar atau campuran dalam ruang bakar kaya akan bahan bakar.

Dapat dilihat bahwa faktor yang membuat nilai efisiensi termal semakin turun adalah lebih disebabkan laju alir massa syngas sangat besar dan nilai ini mempengaruhi nilai sfc -nya yang menjadi sangat besar. Sehingga dibandingkan dengan sistem *single-fuel* dimana nilai sfc -nya jauh lebih kecil maka efisiensi termal-nya menjadi rendah seiring dengan bertambahnya laju alir massa syngas. Kemudian lagi disebabkan bahwa peran minyak solar sebagai *pilot fuel* sangat besar, dan

ketika minyak solar semakin banyak maka semakin banyak juga jumlah syngas yang ikut terbakar.

Air-Fuel Ratio (AFR)



Gambar 11. Rasio udara-bahan bakar (AFR) fungsi beban listrik.

Grafik di atas menunjukkan perbedaan yang sangat besar antara AFR *single-fuel* dengan *dual fuel*. Hal ini disebabkan jumlah bahan bakar yang masuk dalam sistem *dual fuel* jauh lebih besar karena besarnya laju alir massa syngas, meskipun dengan penambahan syngas laju alir massa minyak solar berkurang. Sementara engine diesel yang digunakan adalah *naturally aspirated* yang otomatis dengan bertambahnya laju alir massa syngas akan mengurangi laju alir massa udara yang masuk melalui *intake manifold*. Bertambahnya beban listrik menyebabkan AFR berkurang disebabkan penambahan beban listrik sejalan dengan penambahan bahan bakar minyak solar, sementara laju alir massa udara selalu konstan untuk setiap satu kondisi variasi tekanan syngas.

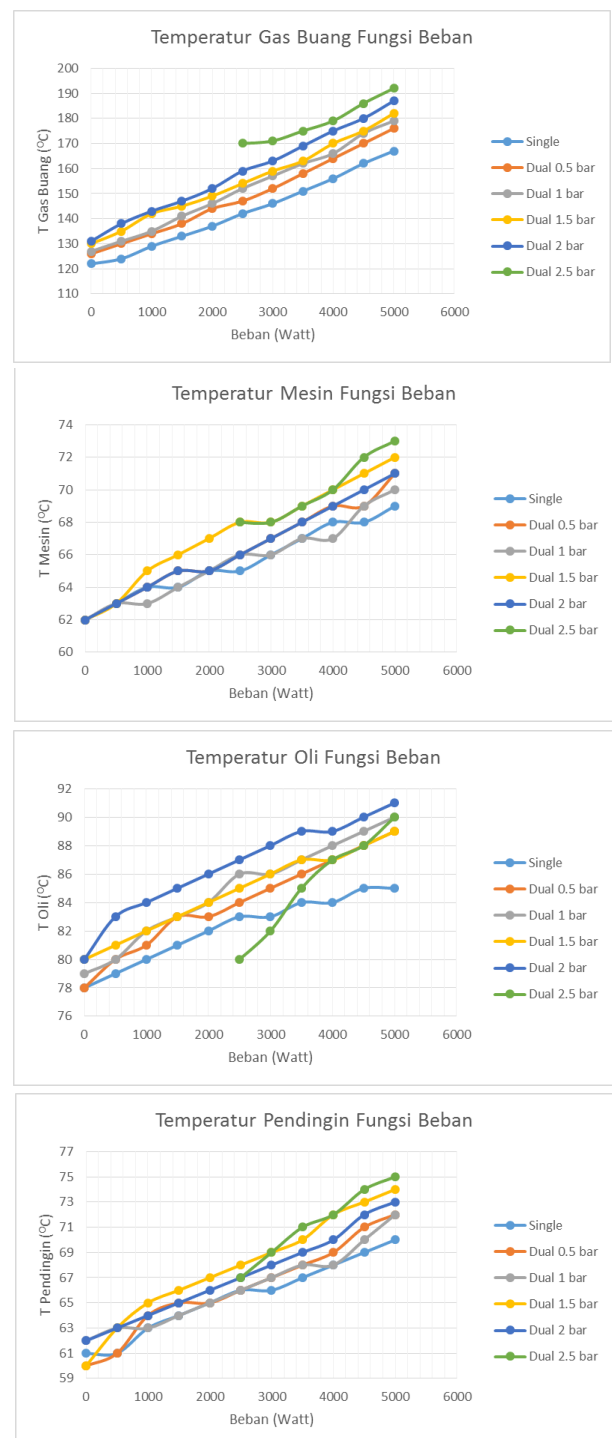
Disebutkan bahwa idealnya AFR berada dalam kisaran ≥ 18 , sementara yang memenuhi syarat AFR tersebut adalah kondisi *single-fuel* antara beban 0 hingga 5000 Watt. Untuk seluruh variasi tekanan syngas yang diujikan pada *dual fuel* tidak satupun yang memenuhi syarat AFR ideal. Disimpulkan bahwa untuk variasi AFR dengan menggunakan *naturally aspirated diesel engine* tidak sesuai digunakan sistem *dual fuel* dengan tekanan syngas $\geq 0,5$ bar.

Temperatur

Secara umum bahwa kenaikan laju alir massa syngas menaikkan temperatur gas buang, mesin, oli pelumas dan pendingin engine dan begitu juga dengan kenaikan beban listrik menyebabkan kenaikan temperatur. Karena semakin banyak bahan campuran udara-bahan bakar yang masuk ke ruang bakar maka semakin besar pula energi panas yang dihasilkan, baik yang ikut terbuang melalui gas sisa pembakaran ataupun yang diambil oleh pelumas dan cairan pendingin dan dibuang ke lingkungan sekitar. Dalam grafik digambarkan bahwa adanya peningkatan temperatur gas buang, mesin, oli pelumas dan cairan pendingin terhadap kenaikan beban, yang disebabkan bertambahnya jumlah energi input ke dalam ruang bakar untuk memberikan daya engine terhadap kenaikan beban listrik. Dan pada tekanan syngas 2,5 bar terlihat ada perbedaan yang mencolok pada tren garis yang dihasilkan tidak seragam dengan yang lainnya yaitu lebih curam, hal ini dikarenakan penambahan energi input ke dalam ruang bakar pada tekanan tersebut sudah mulai memberikan dampak perubahan temperatur yang jauh lebih besar dimana semakin banyak bahan bakar yang tidak terbakar atau dengan kata lain semakin banyak energi panas yang terbuang.

Analisa yang dipahami dari gambaran tersebut adalah

bahwa penambahan energi input ke dalam ruang bakar dengan cara menambah kuantitas bahan bakar membuat semakin banyak energi yang dikonversi menjadi energi panas melalui proses pembakaran dalam ruang bakar.



Gambar 12. Temperatur: gas buang, mesin, oli pelumas dan cairan pendingin fungsi beban listrik

4. KESIMPULAN

Hasil yang didapatkan dari penelitian menunjukkan bahwa jika dibandingkan dengan kondisi standar (*single-fuel*) maka dengan substitusi syngas batubara dapat menggantikan peran minyak solar hingga rata-rata 75,61% pada tekanan syngas 2,5 bar dan mengurangi konsumsi minyak solar hingga rata-



rata menjadi hanya 27,52% pada tekanan syngas yang sama. Efisiensi termal meningkat hingga 4 kali lipat dari 5,18% pada *single-fuel* menjadi 20,5% pada tekanan syngas 2,5 bar. Penerapan sistem *dual fuel* dapat menurunkan SFC solar hingga rata-rata 47,61% akan tetapi meningkatkan SFC keseluruhan rata-rata 19,68 kg/HP.jam dan menurunkan AFR rata-rata sebesar 3,78%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bedoya, I. D., Effect of Mixing System and Pilot Fuel Quality on Diesel-Biogas Dual Fuel Engine Performance, Bioresarch Technology, Colombia, 2009.
- [2] <http://energyefficiencyasia.org>, 20 Juni 2011.
- [3] John, B. Heywood, Internal Combustion Engine, Mc.Graw Hill, London, 1988.
- [4] Mathur, M. I., dan Sharma R. P., A Course in Internal Combustion Engine 3rd Edition, Dhanpat Rai and Sons, Nai Sarak, Delhi, 1980.
- [5] Nasution, A. S., Proses Pembuatan Bahan Bakar Bensin dan Solar Ramah Lingkungan, Pusat penelitian dan pengembangan teknologi minyak dan gas bumi, Jakarta, 2010.
- [6] Praptijanto, A., B. Santoso, W., Putrasari, Y., *Simulasi Uji Performance pada Motor Diesel Injeksi Langsung (1 Silinder) 677 CC Menggunakan Bahan Bakar Dual Fuel (Diesel-Sekam Padi)*, Lab. Motor Bakar Puslit Telimek, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Bandung, 2009.
- [7] Robert W. Fox, Alan T. McDonald dan Philip J. Pritchard, Introduction to Fluids Mechanics 6th Edition, John Wiley and Sons, Denver, 2003.
- [8] Santoso, Ari Budi, *Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diesel Generator Set Sistem Dual Fuel Solar dan Biogas dengan Penambahan Fan Udara sebagai Penyuplai Udara*, Surabaya, 2013.
- [9] Slawomir Luft, *Attempt to Compare Basic Combustion Parameters of A Dual-Fuel Compression Ignition Engine for Various Main Fuels and Their Delivery Modes*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Krakowskiej, 2008.

MENILAI PERFORMANSI GAS AIR HEATER DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP BERKAPASITAS 660 MW (STUDI KASUS PLTU CIREBON)

Hery Sonawan¹, M. Luqmanul Hakim

Jurusan Teknik Mesin FT Universitas Pasundan Bandung

Jl. Setiabudi No. 193, Bandung 40153

e-mail: hsonawan@ymail.com¹⁾

ABSTRAK

Kebutuhan akan energi yang sedang melanda dunia khususnya Indonesia telah menciptakan tantangan baru untuk menggunakan sumber daya alam seefisien mungkin. Indonesia sebagai salah satu penghasil batubara terbesar di dunia memanfaatkan kelebihan ini dengan mendirikan PLTU dalam mega proyek 10.000 MW. Cirebon memiliki PLTU berkapasitas 660 MW sebagai bagian dari mega proyek ini. Salah satu utilitas penting dalam PLTU adalah Gas Air Heater yang berfungsi memanfaatkan kalor sisa pembakaran dari steam generator dan menggunakannya untuk menaikkan temperatur udara pembakaran yang akan masuk ke dalam ruang bakar. Jika performansi dari unit air heater ini buruk, maka instalasi PLTU akan mengalami de-rating. Sebagai gambaran, satu instalasi PLTU mempunyai dua unit gas air heater dan jika salah satunya tidak berfungsi maka instalasi PLTU ini akan mengurangi bebannya sebanyak 50%. Dengan kondisi seperti itu sangat perlu untuk mengetahui performansi dari gas air heater dengan melakukan uji performansi pada beban penuh 698 MW dan pengujian dilakukan dengan mengacu pada kode ASME PTC 4.3. Data hasil pengujian menunjukkan bahwa gas side efficiency diperoleh sebesar 65,64% dimana angka ini lebih rendah 4% dari data desain manufakturnya. Penurunan efisiensi itu dipengaruhi oleh nilai kebocoran 13,3% pada gas air heater. Performansi gas air heater juga ditinjau dari besarnya penurunan tekanan (pressure drop). Data pengujian menghasilkan nilai penurunan tekanan sebesar 73 mmWg, 58 mmWg dan 100 mmWg berturut-turut untuk primary air side, secondary air side dan gas side. Semua nilai itu masih lebih rendah dari nilai-nilai penurunan tekanan hasil desain gas air heater sehingga dapat dikatakan bahwa kondisi elemen pemanas masih baik dan tidak terdapat banyak pengotor.

Kata kunci: Gas air heater, uji performansi, ASME PTC 4.3, gas side efficiency.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi merupakan salah satu permasalahan dunia dalam era globalisasi sekarang ini. Meningkatnya populasi manusia dari waktu ke waktu seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia akan energi sebagai penunjang kebutuhan multi-dimensi mereka, ditambah lagi dengan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil yang selama ini dijadikan komoditas utama penunjang energi bagi manusia. Kondisi itu semakin menantang manusia untuk menciptakan alat pengkonversi energi yang efisien dan ramah lingkungan.

Negara-negara di dunia termasuk Indonesia, kini sedang gencar membangun instalasi-instalasi pembangkit listrik guna mengatasi krisis energi yang melanda dunia. Indonesia menjawab kebutuhan akan energi listriknya dengan membangun mega proyek instalasi pembangkit listrik tenaga uap 10.000 MW yang dibagi menjadi beberapa wilayah di Jawa dan Bali, dan selanjutnya akan diteruskan ke seluruh wilayah Indonesia. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dalam mega proyek tersebut tentunya memakai bahan bakar batubara karena Indonesia termasuk salah satu penghasil batubara terbesar di dunia yang lebih murah dan banyak terdapat di wilayah Indonesia dibandingkan bahan bakar LDO (Light Diesel Oil) yang jauh lebih mahal.

Di Cirebon, sebagai bagian dari proyek PLTU 10.000 MW, telah berdiri instalasi pembangkit listrik tenaga uap berkapasitas 660 MW berbahan bakar batubara. Sebagai instalasi pembangkit yang belum lama berdiri dan beroperasi, perlu dicermati performansi dari unit-unit didalamnya yang tentunya berpengaruh pada efisiensi keseluruhan dari PLTU tersebut. Salah satu yang berperan penting dan berpengaruh signifikan pada performansi dan efisiensi keseluruhan dari unit PLTU ini adalah *gas air heater*. Fungsi dari gas air heater

yaitu memanfaatkan kalor sisa pembakaran dari boiler dan menggunakannya untuk menaikkan temperatur udara pembakaran yang akan masuk ke dalam ruang bakar. Jika performansi dari unit ini buruk, maka berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi boiler. Penurunan efisiensi ini diakibatkan dari pemanfaatan kalor pada ruang bakar dimana jika udara pembakaran dipanaskan terlebih dahulu akan memperkecil nilai ΔT . Semakin kecil nilai ΔT maka semakin sedikit kalor yang dibutuhkan di dalam ruang bakar. Sebagai gambaran, satu instalasi PLTU mempunyai dua unit gas air heater, jika salah satunya tidak berfungsi dengan baik maka efisiensi termal dari unit PLTU ini akan menurun, bahkan hingga 50%. Oleh karena itu sangat perlu untuk menganalisis performansi dari gas air heater ini. Tidak hanya untuk menganalisis performansinya, penelitian ini juga ditujukan untuk mengetahui predikat performansi dari instalasi unit gas air heater pada instalasi PLTU CFPP 660MW di Cirebon, yang akan dibandingkan dengan data standar dari manufakturnya atau dari referensi lainnya.

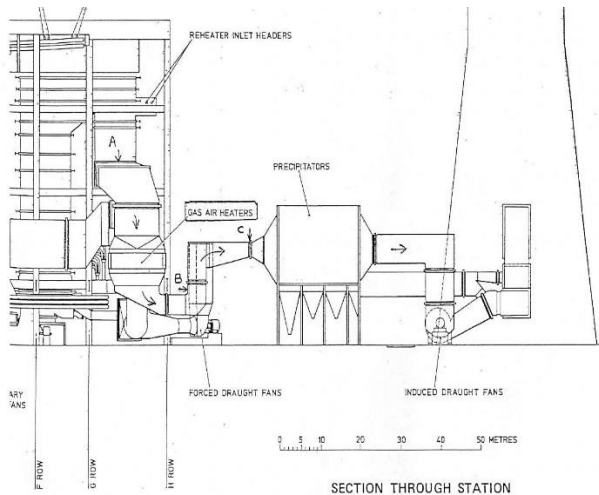
2. METODOLOGI

Metode uji performansi sepenuhnya mengacu pada kode ASME PTC 4.3. Uji ini didesain untuk mengkaji performansi termal dari data-data yang diperoleh pada *hot end* dan *cold end* dari *gas air heater*. Salah satu parameter performansi dari *air heater* adalah tingkat kebocoran. Kebocoran dari instalasi unit gas air heater diukur dengan metode pengambilan sampling kandungan oksigen (O_2) dari sisi inlet dan outlet gas. Alasan dipilihnya sisi gas untuk pembacaan O_2 adalah karena pada sisi gas buang (*flue gas*) normalnya tidak mengandung oksigen karena gas oksigen telah habis terpakai pada saat pembakaran. Selain itu pada sisi gas buang, tekanannya lebih rendah atau memiliki tekanan vakum akibat

dari efek hisapan induced draft fan (ID Fan). Akibat hisapan oleh ID Fan itu maka udara yang masih mengandung banyak oksigen akan lebih mudah masuk melalui celah kebocoran ke dalam saluran sisi gas buang. Oleh karena itu lebih mudah untuk mengukur kandungan oksigen pada sisi gas buang.

Dari sisi instrumentasi, kelengkapan alat ukur yang digunakan selama pengujian performansi *gas air heater* sesuai yang tertera pada ASME PTC 4.3 adalah:

- Tubing S yang digunakan untuk mengukur laju aliran terpasang pada sampling point dengan nilai koefisien 0,84.
- Satu set *inclined manometer* yang digunakan untuk mengukur tekanan statik pada sisi saluran gas buang.
- Satu set termokopel dengan pembacaan digital yang digunakan untuk mengukur temperatur gas buang dan udara pada titik pengukuran yang sama dengan pengukuran tekanan.
- Satu set *gas analyzer* yang digunakan untuk mengukur kandungan oksigen (O_2) pada sisi inlet dan outlet gas buang.



Gambar 1. Section Through Station

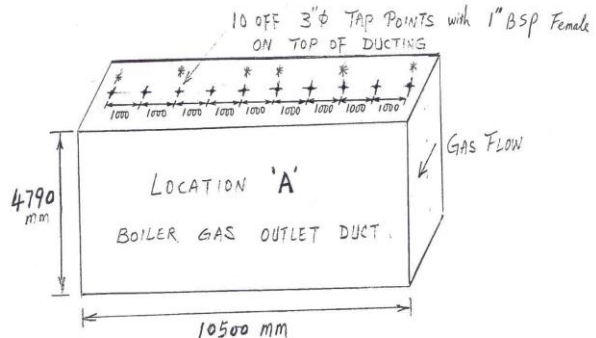
Pengukuran nilai temperatur, tekanan dan kandungan O_2 pada inlet gas buang dilakukan dan diambil pada titik sample (tapping point) yang telah tersedia dan permanen pada salurannya. Seperti pada gambar 2 di bawah ini, pada titik "A", terdapat 10 titik sampel yang telah terpasang pada ducting di masing-masing sisi gas inlet dan data untuk uji ini diambil pada sepuluh titik sampelnya untuk kemudian dicari rata-rata dari nilainya.

Pengukuran nilai temperatur dilakukan dari dua titik pada saluran *force draught fan* (FD Fan) inlet dimana terdapat enam titik sampling point telah terpasang. Sementara untuk pengukuran nilai temperatur outlet dari force draught fan menggunakan metode yang sama dengan sisi inletnya. Pengukuran tekanan statik pada sisi udara dilakukan pada titik sampling point yang telah terpasang pada kedua sisi saluran inlet dan outlet.

Kondisi yang diperlukan selama pengambilan data pengujian performansi *gas air heater* adalah dengan kondisi yang paling mendekati dari 100% beban atau dengan kata lain dengan beban maksimal.

Sebuah tabung S dipasang melintang dan berpotongan dengan arah aliran gas dan udara di dalam saluran. Metode ini dilakukan untuk memperoleh data pembacaan temperatur, tekanan statik dan dinamik. Untuk pembacaan kandungan O_2

dalam ducting dilakukan teknik sampling acak pada instalasi titik samplingnya. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 2 di bawah ini.



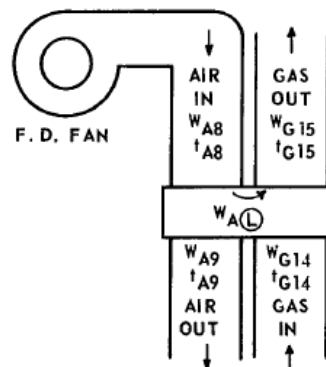
Gambar 2. Lokasi Titik Sampling Pada Ducting Di Titik "A"

Sebagai acuan dalam pengambilan data yang terbaik dalam test ini diperlukan data pembandingan dari DCS, sebagai validasi data yang diperoleh dari pengujian lapangan dan menentukan data yang paling mewakili dari kondisi instalasi itu sendiri. Informasi yang dibutuhkan dari DCS adalah sebagai berikut:

- AH gas inlet/outlet temperature.
- FD Fan power consumption and airflows.
- AH air outlet/inlet temperature.
- Gas AH differential pressure.
- O_2 level at air heater inlet dan outlet.
- Unit Load.

Data yang diambil dari DCS diatas adalah data yang memiliki waktu yang sama dengan waktu pengujian dengan interval 10 menit.

Tipe GAH yang ada di pembangkit listrik tenaga uap Cirebon adalah regenerative, dimana dalam konstruksinya terdapat rotor dan stator. Tipe air heater ini membutuhkan elemen pemanas yang berputar. Gas buang dan udara dialirkan pada dua sektor yang berbeda secara bersilangan, elemen pemanas berada diantaranya sebagai penerima energi panas dari gas buang. Elemen pemanas itu berputar dengan putaran yang lambat sekitar 0,9 rpm untuk memaksimalkan perpindahan panas dari gas buang menuju elemen pemanas kemudian ke udara. Menurut ASME PTC 4.3, skema aliran gas buang dan udara yang terjadi didalam gas air heater jenis regenerative diperlihatkan dalam gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Susunan dasar Air Heater tipe Regenerative.

Kinerja *gas air heater* dapat dinyatakan dengan dua variabel yaitu efisiensi pada sisi gas buang (gas side efficiency) dan pressure drop. *Gas side efficiency* (η_g)

dinyatakan dengan persamaan 1 dan *pressure drop* dihitung dengan melihat selisih antara tekanan input dan output.

$$\eta_G = \frac{t_{G14} - t_{G15NL}}{t_{G14} - t_{A8}} \times 100 \quad (1)$$

Dimana:

t_{G14} : temperatur gas buang terukur yang masuk ke dalam air heater.

t_{A8} : temperatur udara terukur yang masuk air heater.

t_{G15NL} : temperatur gas buang terkoreksi, yang keluar dari air heater dimana tidak terjadi kebocoran, yang dihitung dengan menggunakan persamaan 2 berikut ini,

$$t_{G15NL} = \frac{A_L \times c_{p,A} \times (t_{G15} - t_{A8})}{100 \times c_{p,G}} + t_{G15} \quad (2)$$

$c_{p,A}$: panas jenis rata-rata antara temperatur t_{A8} dan t_{G15} .

$c_{p,G}$: panas jenis rata-rata antara temperatur t_{G15} dan t_{G15NL} .

A_L : kebocoran udara (%), dihitung dengan menggunakan persamaan 3.

$$A_L = \frac{lb \cdot wet \cdot air \cdot leakage}{lb \cdot wet \cdot gas \cdot entering \cdot air \cdot heater} \times 100 \quad (3)$$

$$A_L = \frac{W_{G15} - W_{G14}}{W_{G14}} \times 100$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada proses perhitungan performansi gas air heater seperti yang tercantum dalam ASME PTC 4.3 membutuhkan data input yang harus diperoleh dari pengukuran di lapangan sebagai berikut:

1. Load atau beban bangkitan dari PLTU (MW gross).
2. *Coal feed rate* atau laju aliran massa batu bara (ton/hr).
3. *Coal analysis* yang terdapat persentase komposisi kandungan unsur-unsur kimia yang dilakukan di laboratorium.
4. *Ash Analysis* yang menghitung nilai *unburned carbon*.
5. *Combustion air temperature* atau temperatur udara pembakaran yang terdiri dari temperature udara primer dan sekunder.
6. *Gas temperature* yang terdiri dari temperatur inlet dan outlet di sisi flue gas.
7. Ambient Air Condition atau kondisi udara sekitar, yang terdiri dari wet bulb, dry bulb dan kondisi tekanan atmosfer.
8. Gas Analysis yang terdiri dari kandungan oksigen pada sisi inlet dan outlet dari flue gas

Dari pengujian performansi *gas air heater* yang dilakukan didapatkan data-data input yang diambil sesuai dengan ketentuan prosedural ASME PTC 4.3. Data diambil selama 4 jam dengan interval 15 menit, untuk kemudian diambil nilai rata-rata dari data-data tersebut. Data yang diperoleh tersebut dan telah di ambil rata-ratanya tercantum pada Tabel 1.

Perhitungan dan pengolahan data untuk uji performansi gas air heater dilakukan sesuai formula dan persamaan-persamaan yang tercantum dalam ASME PTC 4.3 seperti yang telah dijabarkan sebelumnya. Perhitungan dari komposisi flue gas didapatkan dari sampling yang dilakukan pada sisi inlet dan outlet dari flue gas ducting saat uji performansi gas air heater dilakukan, dan kemudian analisis dari komposisi air heater ini di lakukan test laboratorium untuk diperoleh komposisi berbasis massa yang mengacu pada ASME PTC 19.1, data selengkapnya tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 1. Data Input Uji Performansi GAH.

PARAMETER	SIM-BOL	SATUAN	NILAI	SUMBER DATA
Load		MW _{gross}	698	P1_AOMW XQ01
Coal feed rate	W_{fe}	ton/hr	287	FA02 XQ04 XQ04
COAL ANALYSIS (ULTIMATE, AF)				
Carbon	C	% weight	47,43	Coal Analysis
Hidrogen	H ₂	% weight	3,29	Coal Analysis
Oksigen	O ₂	% weight	15,86	Coal Analysis
Nitrogen	N ₂	% weight	0,60	Coal Analysis
Moisture	H ₂ O	% weight	31,00	Coal Analysis
Ash	A	% weight	1,75	Coal Analysis
Sulphur	S	% weight	0,07	Coal Analysis
HHV AF constant volume	H_{fcv}	kkal/kg	4500	Coal Analysis
Ash Analysis				
Unburned carbon in bottom ash	U_p	% weight	1,1	Laboratory test
Unburned carbon in fly ash	U_d	% weight	1,1	Laboratory test
Combustion Air Temperature				
AH inlet primary air temperature	t_{A8PA}	°C	41,9	Measured
AH inlet secondary air temperature	t_{A8SA}	°C	33,4	Measured
Gas Temperature				
AH inlet gas temperature	t_{G14}	°C	346,9	Measured
AH outlet gas temperature	t_{G15}	°C	129,6	Measured
Ambient Air Condition				
Dry bulb temperature	t_{dB}	°C	32,77	Measured
Wet bulb temperature	t_{wB}	°C	29,34	Measured
Barometric pressure	Pa	inHg	29,92	Measured
AH Inlet Gas Analysis				
Oksigen of flue gas at AH inlet	O ₂	%dry-vol	3,47	Measured
CO of flue gas at AH inlet	CO	mg/m ³	0	Measured
AH Outlet Gas Analysis				
Oksigen of flue gas at AH outlet	O ₂	%dry-vol	5,8	Measured
CO of flue gas at AH outlet	CO	mg/m ³	0	Measured



Tabel 2. Analisis Gas Buang pada GAH

	SIM-BOL	SATUAN	AH INLET	AH OUTLET
O ₂ rata-rata	O ₂	% vol-kering	3,47	5,8
Udara kering teoritik	Ao'	Lb/lb AF fuel	5,9654	5,9654
Udara lebih (excess air)	Ax'14	%	19,502	37,629
Komponen gas buang				
O ₂	O _{2,fg}	cu.ft/lb.AF fuel	3,176	6,128
SO ₂	SO _{2,fg}	cu.ft/lb.AF fuel	0,008	0,008
CO ₂	CO _{2,fg}	cu.ft/lb.AF fuel	14,468	14,468
N ₂	N _{2,fg}	cu.ft/lb.AF fuel	73,864	85,036
Total	Tot _{fg}	cu.ft/lb.AF fuel	91,517	105,641
O ₂	O ₂	% vol-kering	3,471	5,801
SO ₂	SO ₂	% vol-kering	0,009	0,008
CO ₂	CO ₂	% vol-kering	15,809	0,000
N ₂ (by diff.)	N ₂	% vol-kering	80,711	13,696

Dalam ASME PTC 4.3 dijelaskan bahwa untuk menghitung efisiensi di sisi gas pada *gas air heater* sebuah pembangkit listrik tenaga uap dengan bahan bakar batu bara diperlukan nilai laju aliran dari gas kering dan gas basah (mengandung uap air) pada titik 15 dan 14, selanjutnya disimbolkan menjadi $W_{G14,15}$ untuk gas basah dan $W_{G'14,15}$ untuk gas kering. Persamaan untuk mencari nilai-nilainya adalah:

$$W_{G15,14} = W_{G'15,14} + W_{mG}$$

Dimana:

$$W_{G'15,14} = \text{laju gas kering yang keluar atau masuk Air Heater (lb-dry gas / lb AF.fuel)}$$

$$W_{mG} = \text{kelembaban total di sisi flue gas inlet air heater (lb-dry gas / lb AF.fuel).}$$

Berdasarkan hasil pengukuran, laju aliran massa gas kering dan gas basah ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Laju aliran Massa Gas Basah.

Dry gas flow entering AH	W_{G14}	7,16210	Lb of dry gas/lb AF fuel
Dry gas flow leaving AH	W_{G15}	8,20137	Lb of dry gas/lb AF fuel
Wet gas flow entering AH	W_{G14}	7,81528	Lb of wet gas/lb AF fuel
Wet gas flow leaving AH	W_{G15}	8,85455	Lb of wet gas/lb AF fuel

Kebocoran pada *air heater* didefinisikan sebagai massa dalam pound kebocoran dari sisi udara ke sisi gas dibagi dengan massa dalam pound gas masuk air heater dan dihitung dengan menggunakan persamaan (3).

$$A_L = \frac{W_{G15} - W_{G14}}{W_{G14}} \times 100\%$$

$$A_L = \frac{8,85455 - 7,81528}{7,81528} \times 100$$

$$A_L = 13,298\%$$

Dari perhitungan kalkulasi kebocoran gas air heater dengan basis massa didapatkan nilai kebocoran sebesar 13,298%.

Sebelum menghitung *gas side efficiency* perlu diketahui nilai dari temperatur gas yang terkoreksi tanpa kebocoran, nilai temperatur ini adalah nilai deviasi dari temperatur yang terukur dikurangi dengan faktor-faktor yang mengurangi kebocoran tersebut, nilai ini disimbolkan dengan $t_{G15(NL)}$ dan dihitung dengan persamaan 2. Nilai air heater leakage diketahui sebesar 13,298, nilai $c_{p,A}$ dan $c_{p,G}$ didapat dari grafik kalor jenis udara dan gas pada temperatur tertentu sesuai dengan ASME PTC 4.1 dan didapatkan nilai masing-masing $c_{p,A}$ sebesar 0,24050 Btu/lb-F dan $c_{p,G}$ sebesar 0,23802 Btu/lb-F, dan nilai t_{G15} dan t_{A8} masing-masing 265,28°F dan 95,33°F, sehingga temperatur gas koreksi tanpa kebocoran adalah:

$$t_{G15NL} = \frac{A_L \times c_{p,A} \times (t_{G15} - t_{A8})}{100 \times c_{p,G}} + t_{G15}$$

$$t_{G15NL} = \frac{13,298 \times 0,2405 \times (265,28 - 95,33)}{100 \times 0,23802} + 265,28$$

$$t_{G15NL} = 288,115^\circ F$$

Setelah diketahui nilai temperatur t_{G15NL} maka nilai *gas side efficiency* dapat dihitung dengan persamaan 1. Diketahui nilai aktual temperatur inlet air heater sebesar 656,42°F, dan temperatur gas terkoreksi tanpa kebocoran adalah 288,115°F, temperatur aktual udara yang memasuki air heater 95,33°F maka didapatkan nilai efisiensinya adalah:

$$\eta_G = \frac{t_{G14} - t_{G15NL}}{t_{G14} - t_{A8}} \times 100\%$$

$$\eta_G = \frac{656,42 - 288,115}{656,42 - 95,33} \times 100\%$$

$$\eta_G = 65,64\%$$

Setelah didapatkan data dan efisiensi dari uji performansi gas air heater secara aktual dan kalkulasinya, selanjutnya adalah membandingkan data-data tadi dengan data-data yang digaransikan oleh manufaktur. Karena di dalam tabel O&M manual tidak didapatkan nilai *gas side efficiency* nya, maka harus dilakukan perhitungan sesuai ASME PTC 4.3 dengan mengganti parameter-parameter desain coal, temperatur inlet atau outlet, dan kebocorannya sesuai nilai di dalam tabel performansi desainnya.

Setelah dilakukan input terhadap *analys tool* sesuai data performansi desainnya maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

$$\eta_G = \frac{t_{G14} - t_{G15NL}}{t_{G14} - t_{A8}} \times 100\%$$

$$\eta_G = \frac{656,42 - 260,60}{656,42 - 87,98} \times 100\%$$

$$\eta_G = 69,63\%$$

Nilai *gas side efficiency* pada data aktual dan desain adalah 65,64% dan 69,63%, yang artinya terdapat $\pm 4\%$ penurunan efisiensi dari efisiensi desain. Penurunan $\pm 4\%$ ini dipengaruhi oleh besarnya kebocoran (leakage) yang diketahui dari uji performansi senilai 13,298% dimana seharusnya sesuai data desain manualnya bernilai 9%. Sesuai dengan rekomendasi dari manufaktur bahwa overhaul untuk *gas air heater* terjadwal adalah setiap satu tahun. Dengan melihat penurunan efisiensi sebanyak 4% dalam 6 bulan maka diprediksi sesuai desain bahwa *gas air heater* akan mengalami penurunan performansi hingga 10% pada 8 bulan ke depan yang artinya unit ini masih dapat bertahan hingga jadwal overhoulnya dengan catatan grafik penurunannya adalah linear.

Pengukuran pressure drop menghasilkan data-data sebagai berikut:

Tabel 4. Desain Performansi GAH.

Project Name	AIR PREHEATER OF 695MW CIREBON COAL FIRED POWER PLANT		
Fuel		Design	Aktual
Load	Unit	75%	698MW
A. Primary Air flow			

B. Secondary Air Flow			

Total Leakage(%):	%	9,00	13.298
C. Gas Flow			

E. Secondary Air Temp.			

F. Gas Temp.			

G. Press. Difference at Hot End			
---	mmWg	854	850
---	mmWg	657	647
H. Pressure Drop			
1) Primary Air Side	mmWg	75	73
2) Secondary Air Side	mmWg	60	58
3) Gas Side	mmWg	104	100
I. Gas Side Efficiency	%	69,63	65,64

Pressure drop atau penurunan tekanan antara sisi inlet dan outlet pada uji performansi sesuai dan hampir sama dengan nilai pada data manufakturnya, yang artinya keadaan heating element masih baik dan tidak tersumbat (*clogged by fly ash*). Perbedaan antara data desain dan hasil pengukuran pada sisi primary air, secondary air dan gas side berturut-turut 2,7%; 3,4% dan 4%. Perbedaan ini masih dianggap cukup rasional karena dari pengamatan lapangan tidak dijumpai debu pengotor dalam jumlah banyak yang dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan aliran.

4. KESIMPULAN

Uji performansi gas air heater yang dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Cirebon menghasilkan beberapa

simpulan antara lain:

1. Nilai *gas side efficiency* berdasarkan data aktual adalah 65,64%, sedangkan berdasarkan data desain adalah 69,63%.
2. Nilai kebocoran dari gas air heater yang diperoleh adalah 13,298%.
3. *Pressure drop* yang terjadi pada saluran *primary air side* adalah 73 mmWg dan *secondary air side* adalah 58 mmWg. Data desain berturut-turut 75 dan 60 untuk *primary air side* dan *secondary air side*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASME Team, Performance Test Code for Steam Generators PTC 4.1, United Engineering Centre New York USA, 1968.
- [2] ASME Team, Performance Test Code for Gas Air Heater PTC 4.3, United Engineering Centre New York USA, 1968.
- [3] ASME Team, Performance Test Code for Gas Analysis PTC 19.1, United Engineering Centre New York USA, 1968.
- [4] ASME Team, The Ljungstroom Air Preheater Historic Landmark, SMR Sweden, 1995.
- [5] Doosan Heavy industries, O&M Manual for Gas Air Preheater, CEP 2011.
- [6] Babcock & Wilcox, Steam Its Generation and Use, Barberton Ohio USA, 2005.
- [7] Rayaprolu Kumar, Boilers for Power and Process, CRC Press, 2009.
- [8] Holmann, JP, Heat Transfer 10th Edition, Mc Graw-Hill, USA, 2010.



MSWT-01 (MOBILE SURFACE WATER TREATMENT), PENJERNIH AIR MULTI FUNGSI DARI INSTITUSI PENDIDIKAN VOKASI UNTUK MASYARAKAT

Gamawan Ananto¹⁾, Albertus B. Setiawan²⁾

Politeknik Manufaktur Bandung, Jurusan Teknik Manufaktur ^{1,2)}

Jl. Kanayakan 21, Dago, Bandung 40135, Indonesia ^{1,2)}

Phone: 0062-22-2500241, Fax: 0062-22-2502649 ^{1,2)}

E-mail : gamawan@polman-bandung.ac.id¹⁾, bertoes@polman-bandung.ac.id²⁾

ABSTRAK

Politeknik Manufaktur Bandung (Polman) adalah sebuah institusi pendidikan vokasi atau terapan (vocational) yang menjalankan program praktik dan teori sekira 60%:40%, dengan tujuan pencapaian kompetensi mahasiswa peserta didik dalam pengetahuan, analisis dan ketrampilan (skill) teknik. Media produk untuk proses pembelajaran yang digunakan berupa benda kerja latihan terstruktur, produk pelanggan dari industri serta produk ataupun prototipe hasil penelitian institusi. Salah satu hasil penelitian dan eksperimental yang telah direalisasi adalah unit MSWT-01 (mobile surface water treatment) kapasitas 1m³ per jam, suatu alat penjernih air yang dilengkapi kereta penarik (anhanger) untuk mendukung mobilitas. Eksperimen diawali dengan metoda pengolahan air menggunakan proses kimia dikombinasikan dengan filtrasi fisik media penyaring. Dengan pertimbangan kemudahan preparasi dan kecepatan operasi terkait kedaruratan penggunaan daerah bencana, dilakukan modifikasi menjadi penggunaan modul katrid membran penyaring serta disinfeksi non kimia. Alat ini mampu mengolah sumber air baku dari sungai, danau ataupun air yang ada di daerah bencana; dengan hasil air bersih, layak masak ataupun siap minum. Pada perkembangannya, MSWT-01 ini bisa menjadi alat yang multi fungsi; selain untuk pengadaan air bersih di daerah bencana atau dapur umum, juga dimanfaatkan untuk berbagai keperluan di lapangan dan pelosok seperti program sosial kemahasiswaan dengan lokasi yang jauh dari sumber air bersih dan lain lain.

Kata kunci: *pengolah air, media produk, pendidikan terapan.*

1. PENDAHULUAN

Sebagai sebuah institusi pendidikan vokasi atau terapan (vocational), dalam proses pembelajarannya Politeknik Manufaktur Bandung (Polman) menyelenggarakan program praktik dan teori dengan perbandingan sekira 60%:40%, dengan tujuan pencapaian kompetensi mahasiswa peserta didik dalam pengetahuan, analisis dan ketrampilan (skill) teknik. Media produk yang digunakan adalah benda kerja latihan terstruktur, produk pelanggan dari industri serta produk ataupun prototipe hasil penelitian institusi. Benda kerja latihan terstruktur (*structured job*) diterapkan sebagai media untuk pembelajaran proses dasar permesinan pada semester 1 dan/ atau 2, dimana sebagian diantaranya menghasilkan komponen yang bermanfaat (*useable*) untuk keperluan internal, atau menghasilkan alat bantu mekanikal sederhana yang bisa dijual (*saleable*). Media produk dari pelanggan diterapkan pada semester atau tingkat berikutnya dimana peserta didik mulai dilibatkan dalam produk berdasarkan pesanan (*ordered job*) yang mengacu pada kebutuhan atau permintaan dari industri eksternal, dalam suatu sistem yang disebut *Production Based Education* (PBE). Pada tingkat ini kesesuaian kualitas, efisiensi biaya dan jadwal penyelesaian (QCD, *quality-cost-delivery*) merupakan tuntutan yang harus dipenuhi melalui pengendalian operasi yang baik. Dengan demikian institusi pendidikan vokasi seperti politeknik mampu membentuk kompetensi peserta didik dengan media pembelajaran nyata, dimana pada aktivitas semacam ini juga dengan sendirinya terjadi validasi proses pendidikan untuk selalu menghasilkan luaran yang relevan dengan kebutuhan industri [1].

Media produk berikutnya adalah pembuatan atau realisasi hasil penelitian dari institusi, baik eksperimental, prototipe maupun produk akhir, dengan tujuan menjadikan konsep atau

ide di atas kertas menjadi sesuatu yang nyata dan bisa diimplementasikan, baik oleh industri ataupun masyarakat pada tahap berikutnya. Salah satu hasil penelitian dan eksperimental yang telah dilaksanakan dan terus dikembangkan adalah suatu alat penjernih air yang diberi nama MSWT-01 (*mobile surface water treatment*) yang memiliki kapasitas 1m³ per jam, dilengkapi kereta penarik (*anhanger*) untuk mendukung mobilitasnya. Dengan dasar pemikiran kebutuhan akan air bersih atau air minum pada daerah bencana, untuk penjernih air ini telah dilakukan pengembangan desain dan konsep, pembuatan prototipe serta pelaksanaan ujicoba, yang diikuti dengan rangkaian perbaikan dan penyempurnaan yang mengacu juga pada sejumlah referensi, literatur dan *benchmark* pada produk pabrikan yang ada di pasaran. Pada awalnya digunakan metoda pengolahan air dengan penggunaan bahan tambah, baik untuk proses koagulasi, flokulasi, maupun disinfeksi. Proses kimia ini dikombinasikan dengan filtrasi fisik menggunakan media pasir, karbon dan zeolit. Pada perkembangannya, mesin dimodifikasi menjadi hanya proses fisik, menggunakan kombinasi dari berbagai tingkatan katrid membran sesuai kebutuhan.

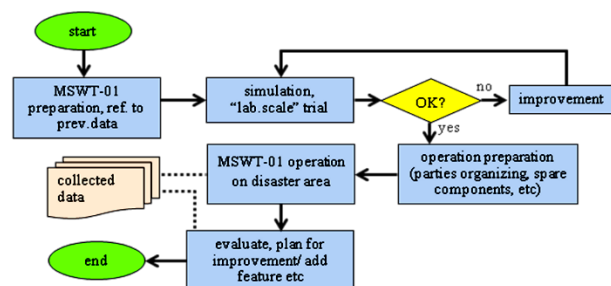
Pelaksanaan pembuatan maupun penyempurnaan/perbaikan yang mengacu pada hasil teknis ujicoba MSWT-01 ini diintegrasikan dengan program praktik peserta didik, dimana proses fabrikasi ataupun permesinan yang diperlukan disesuaikan dengan tingkat kompetensi yang direncanakan, sebagai salah satu proyek pekerjaan dalam sistem PBE.

Selain itu, dalam implementasi mesin di daerah bencana yang sesungguhnya kelak, hal ini bisa dijadikan sarana untuk kegiatan bermasyarakat bagi para mahasiswa. Sebagai 'adaptasi' dari gagasan 'CSR' (*corporate social responsibility*) yang pertama kali digagas oleh Bowen (1953) [2], kepedulian dan tanggung jawab terhadap masyarakat dari institusi pendidikan tidak berbeda dengan industri, bahkan ia menjadi

salah satu fungsi penting universitas dalam melayani masyarakat dan lingkungan [3]. Pengembangan MSWT dan 'CSR' mahasiswa melalui sistem PBE ini selain akan memperkaya variasi pekerjaan juga menjadi media produk yang bisa diimplementasikan untuk kegiatan sosial yang telah terdefinisi, dimana peserta didik juga akan mengalami pembelajaran dan menggali pengalaman berinteraksi dengan lebih banyak pihak di lapangan.

2. METODOLOGI

Secara umum, ilustrasi tahapan pembuatan MSWT-01 ada pada Gambar 1 di bawah [4]. Setelah persiapan awal dan mesin atau alat siap untuk difungsikan, dilakukan uji fungsi pada skala laboratorium, untuk memastikan bahwa semua fungsi teknis berjalan dengan baik; seperti kondisi elektrik, mekanikal dan hal lainnya. Simulasi ini bisa dilaksanakan dengan menggunakan air baku dengan debit yang telah dikondisikan; atau di sumber air permukaan terdekat seperti sungai kecil atau kolam untuk uji kapasitas dan uji fungsi proses pengolahannya. Dari hasil simulasi ini bisa dilakukan perbaikan yang perlu, mengacu pada uji laboratorium kandungan air hasil olahan dibandingkan dengan yang diinginkan. Perbaikan bisa berupa penambahan fitur, penggantian media filtrasi, atau hal kondisional lainnya.



Gambar 1. Tahapan Umum Pembuatan MSWT-01

Setelah hasil simulasi memadai, MSWT-01 disiapkan untuk operasi di lapangan atau daerah bencana sesungguhnya. Preparasi meliputi hal teknis seperti kesiapan cadangan bahan, suku cadang, peralatan pendukung, kereta penarik (*anhanger*), generator sumber listrik, maupun hal-hal yang terkait pengorganisasian menyangkut pihak-pihak terkait dengan mitigasi bencana serta penjadwalannya. Artinya, MSWT-01 telah siap dioperasikan setiap saat diperlukan, melalui kordinasi dengan pengelola mitigasi bencana, area pengungsian, dapur umum dan lain-lain.

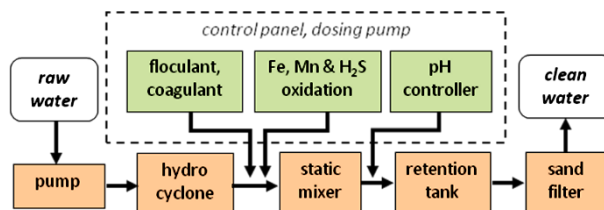
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aspek Teknis

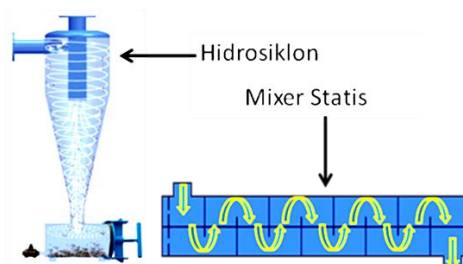
Pada awalnya MSWT-01 menggunakan metoda pengolahan air dengan bahan tambah untuk proses koagulasi, flokulasi, maupun disinfeksi. Proses kimia ini dikombinasikan dengan hidrosiklon dan filtrasi fisik menggunakan media pasir, karbon dan zeolit. Diagram proses dari MSWT-01 dengan kimia ini [4] seperti dijelaskan pada Gambar 2. Diagram ini adalah adopsi dan modifikasi dari sejumlah sumber, termasuk dari konsep IWET a.s. dari Republik Czech [5] yang digunakan pada mesin IWET dengan kode RWT-05.

Proses diawali dengan pemisahan partikel berukuran > 0.2 mm dari air baku pada komponen hidrosiklon dengan cara

aliran berputar dan memanfaatkan gaya sentrifugal. Setelah ditambahkan bahan koagulan, flokulan dan pengoksidasi, dilanjutkan dengan proses pencampuran pada mixer statis. Berikutnya ditambahkan bahan untuk pengendalian pH kemudian masuk ke dalam tanki retensi agar proses flokulasi dan koagulasi berlangsung optimal. Ilustrasi kerja Hidrosiklon dan Mixer Statis ada pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram Proses MSWT-01 Kimikal

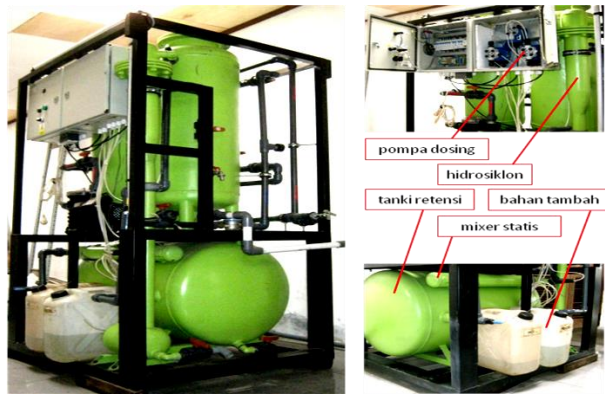


Gambar 3. Ilustrasi Kerja Hidrosiklon dan Mixer Statis

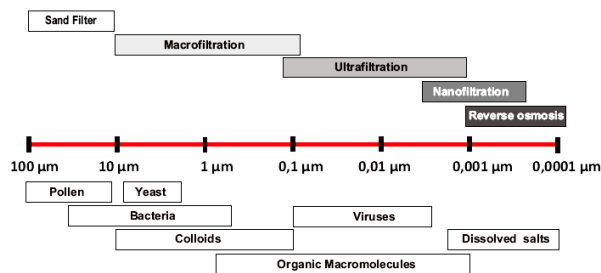
Pada perkembangannya, meskipun hasil ujicoba menunjukkan hasil yang baik namun dirasakan kendala pada beberapa hal yaitu upaya (*effort*) yang harus dilakukan secara operasional terkait bahan tambah karena diperlukan penambahan secara berkala dan harus dilakukan pengendalian dosis yang disesuaikan dengan kondisi air baku. Selain itu, dari sisi kedaruratan penggunaan terkait kecepatan proses juga dipandang kurang sesuai karena secara teoritis untuk kapasitas yang sesuai dengan spesifikasi MSWT-01 diperlukan waktu proses dan waktu tahan (*holding time*) di dalam tanki retensi sekira 30 menit [6]. Hal yang lain dari metoda kimia ini adalah secara fisik diperlukan ruang lebih karena dimensi tanki retensi yang relatif besar, sekira diameter 400 x panjang 900 dalam satuan mm, yang juga berkonsekuensi pada bobot (*weight*). Metoda pengolahan menggunakan bahan kimia ini memerlukan ruang yang relatif luas karena itu sesuai untuk diimplementasikan pada sistem dengan kapasitas besar. Bahkan pada kondisi tertentu selain proses flokulasi, koagulasi dan filtrasi ditambahkan juga proses aerasi (menambahkan oksigen pada air), klorinasi (membubuhkan klor) ataupun sedimentasi untuk mengendapkan flok (gumpalan) yang terbentuk, agar beban pada proses filtrasi lebih ringan. Sistem seperti ini banyak digunakan di penyedia air minum kapasitas besar misalnya untuk tingkat kota, dimana dalam area instalasi sistem dibuat bak tersendiri untuk masing-masing proses tersebut di atas [7]. Pada Gambar 4 ditunjukkan dokumentasi foto MSWT-01 kimia beserta komponen pompa dosing, hidrosiklon, mixer statis, tanki retensi serta tanki/tempat untuk penyimpanan bahan tambah.

Karena itu, dilakukan modifikasi MSWT-01 menjadi hanya proses fisik, dengan tetap menggunakan filtrasi media yang dikombinasikan dengan teknologi katrid/ membran beberapa tingkatan sesuai kebutuhan. Dengan demikian komponen hidrosiklon, mixer statis, tanki retensi dan pompa dosing dihilangkan, dengan keuntungan pengurangan bobot yang cukup signifikan. Hal ini juga

terinspirasi oleh sejumlah penemuan baru dalam teknologi fisik dengan menggunakan membran dan bahan untuk filtrasi yang semakin praktis dalam penggunaannya. Ilustrasi dari tingkatan proses fisik tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar.5 bahwa proses filtrasi dengan media pasir mampu menahan partikel dengan dimensi hingga 10 μm sementara tingkatan berikutnya harus menggunakan MF (*micro filtration*), UF (*ultra filtration*), NF (*nano filtration*) atau RO (*reverse osmosis*) [8].



Gambar 4. MSWT-01 Kimia dan beberapa komponennya



Gambar 5. Tingkatan Teknologi Filtrasi (Bestindo, 2007).

Diagram proses MSWT-01 dengan proses fisik ditunjukkan pada Gambar.6. Dari pompa umpan air baku mengalir melalui katrid CB (*Carbon Block*) sebagai penyaring tahap awal, dilanjutkan dengan proses filtrasi. Media yang digunakan pada tabung filtrasi ini terdiri atas karbon aktif, gravel (kerikil), pasir silika, pasir manganis dan *multiramp*, suatu bahan mineral berkemampuan tinggi dalam menyerap kandungan unsur dalam air yang tidak diinginkan [4]. Setelah itu, air melewati mikro filtrasi (MF) yang berukuran pori 1 μm . Secara teoritis, hasil atau luaran dari MF ini sudah layak digunakan sebagai air sipa olah untuk memasak atau minum dan air bersih untuk keperluan sehari hari. Jika luaran yang diperlukan lebih tinggi lagi, misalnya untuk air siap minum, secara opsional harus ditambahkan proses UF dan disinfeksi. Namun demikian, semua ini tetap harus mengacu pada hasil uji laboratorium dimana kualitas air baku juga bisa menentukan penambahan fitur tingkat tertentu. Misalnya, air baku dengan kandungan bakteri e-koli yang tinggi, meskipun luaran hanya setingkat air bersih dengan menggunakan MF, namun harus ditambahkan proses disinfeksi.



Gambar 6. Diagram Proses MSWT-01 Fisikal

Gambar 7 adalah dokumentasi foto MSWT-1 Fisikal ketika dilakukan uji coba dan uji fungsi di sebuah sungai daerah Bandung Selatan dimana gambar tersebut juga memperlihatkan komponen katrid CB dan MF. Seperti telah disebutkan, apabila diperlukan, dengan mengacu pada uji hasil luaran, secara opsional bisa ditambahkan katrid UF dimana telah disediakan dudukan untuk UF ini, pada sisipan gambar kiri bawah.



Gambar 7. MSWT-01 Fisikal beserta komponen CB, MF dan Dudukan UF

Dari sejumlah ujicoba, dilakukan uji laboratorium kandungan hasil proses MSWT-01 seperti tampak pada Tabel.1 berikut ini. Proses kimia serta proses fisik (menggunakan katrid CB dan MF) masing-masing memiliki 2 sampel yang ditampilkan, dimana masing-masing sampel terdiri atas sub sampel air baku dan air hasil olahan. Bila dibandingkan dengan standar parameter sesuai Peraturan Menteri Kesehatan nomor 492/MENKES/PER/IV/2010, sampel-1 kimia belum menunjukkan hasil sesuai harapan pada parameter kekeruhan dan kandungan organik, namun sampel-2 -setelah proses lebih stabil- memiliki hasil yang sudah amat baik.

Tabel 1. Perbandingan hasil MWST-01 Kimia dan Fisikal

Parameter	Std. max spec. ^{*)}	Unit	Chemical & Filtration				Membran Cartridge & Filtration			
			Raw-1	Result-1	Raw-2	Result-2	Raw-1	Result-2	Raw-2	Result-2
Colour	15	TCU	6.80	2.20	11.20	0.20	35.90	0.03	9.10	0.40
Turbidity	5	NTU	15.10	9.20	18.90	0.13	199.80	0.08	147.80	13.80
Fe content	0.3	mg/l	1.08	0.11	2.40	< 0.01	8.96	< 0.01	6.84	0.49
Mn content	0.4	mg/l	0.76	0.34	0.65	0.22	0.46	0.45	0.32	0.15
Nitrit	3	mg/l	0.11	0.05	1.28	< 0.01	2.15	0.00	0.01	2.10
Organic, KMnO ₄	10	mg/l	19.42	12.69	19.81	0.39	51.81	1.68	582.75	11.08
Hardness, CaCO ₃	500	mg/l	204.86	181.15	247.02	211.22	136.04	257.76	146.68	139.62

^{*)} Based on 492/MENKES/PER/IV/2010

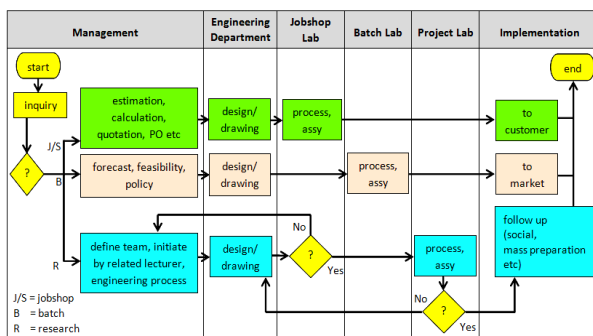
Sementara itu, pada MSWT-01 proses fisik (katrid membran) digunakan air baku dengan parameter yang lebih buruk; baik warna, kekeruhan, kandungan besi/Fe, dan - terutama- kandungan zat organik (pada sampel-2). Tampak bahwa secara signifikan MSWT-01 mampu menurunkan kandungan yang tidak dikehendaki, misalnya kadar zat organik pada sampel-2 fisik, dari 582.75 menjadi 11.08 dalam satuan mg/l. Meskipun demikian, pada beberapa parameter dengan tanda kuning dan diberi kotak masih lebih tinggi dari standar yang ditentukan, karena itu harus ditambahkan fitur UF pada unit ini bila memang kualitas air baku demikian parah.

PBE (*Production Based Education*) dan Kegiatan Mahasiswa

Dengan adanya sistem pendidikan berbasis produksi pada pembelajaran di Politeknik Manufaktur Bandung (Polman), pelaksanaan pembuatan MSWT-01 ini diintegrasikan dengan program praktik peserta didik, dimana proses fabrikasi ataupun permesinan yang diperlukan disesuaikan dengan

tingkat kompetensi yang direncanakan, sebagai salah satu proyek pekerjaan dalam sistem PBE, termasuk penyempurnaan/perbaikan yang mengacu pada hasil teknis ujicoba, seperti telah diuraikan sebelumnya.

Pada PBE, MSWT-01 merupakan salah satu jenis media produk yang dilaksanakan di laboratorium, yaitu realisasi hasil penelitian, eksperimental atau riset. Pada Gambar 8 disebutkan 3 jenis media produk yang dilaksanakan dalam program praktik pendidikan; (1) *job shop* yang berupa produk sesuai permintaan atau kebutuhan pelanggan atau pemesan, (2) *batch shop* yang diprogramkan untuk semi massal namun didahului dengan analisis kebutuhan pasar serta (3) *research* berupa inovasi hasil penelitian yang mengacu pada pengembangan teknologi, permasalahan (*issue*) strategis, gagasan dasar maupun rancangan peralatan tepat guna yang bisa diaplikasikan di masyarakat [9].



Gambar 8. Prosedur Penanganan Pesanan dalam PBE di Polman

MSWT-01 dilaksanakan oleh tim yang terdiri atas staf pengajar dan beberapa mahasiswa pendukung sebagai anggota tim kontemporer. Untuk melaksanakan proses permesinan atau fabrikasi yang dibutuhkan pekerjaan bisa didistribusikan kepada para peserta didik dengan program yang relevan serta tingkat kompetensi yang sesuai [10], dibawah pengendalian tim. Manakala MSWT ini selesai dan siap doperasikan, tim bertugas untuk menyiapkan semua hal yang diperlukan untuk implementasi pada lokasi bencana dengan melibatkan para peserta didik yang sesuai dengan jadwal program. Preparasi meliputi hal teknis seperti kesiapan cadangan bahan, suku cadang, peralatan pendukung, kereta penarik (*anhanger*), generator sumber listrik, maupun hal-hal yang terkait pengorganisasian menyangkut pihak-pihak terkait dengan mitigasi bencana serta penjadwalannya.

Bila kebutuhan MSWT muncul diluar jadwal program maka bisa dilakukan penugasan secara kondisional melalui program ekstra kurikuler, sebagai bagian dari kewajiban bermasyarakat dan 'adaptasi' dari gagasan 'CSR' (*corporate social responsibility*) yang juga merupakan salah satu fungsi lembaga pendidikan dalam melayani masyarakat dan lingkungan. Di lapangan, para peserta didik juga akan mengalami pembelajaran dan menggali pengalaman berinteraksi dengan banyak pihak di lapangan.

Pasca operasi, diperoleh umpan balik untuk dasar perbaikan dan penyempurnaan MSWT-01 untuk operasi berikutnya, berbasis pada laporan data teknis yang dibuat oleh tim yang bertugas. Misalnya, apakah perlu ditambahkan fitur lain yang perlu, atau hal lain terkait kehandalan komponen atau kualitas bahan media penyaring misalnya. Hal lain yang menjadi prosedur tetap adalah proses standar perawatan alat pasca operasi agar performa dan kondisi alat atau mesin selalu terjaga dengan baik dan siap untuk digunakan kembali.

Pada perkembangannya, dalam pemanfaatan sehari hari MSWT-01 ini bisa menjadi alat yang multi fungsi; selain untuk pengadaan air bersih di daerah bencana, pusat pengungsian atau dapur umum, juga bisa dimanfaatkan untuk berbagai keperluan di lapangan dan pelosok seperti program-program organisasi kemahasiswaan, kegiatan sosial untuk masyarakat dengan lokasi yang jauh dari sumber air bersih, dan lain lain.

4. KESIMPULAN

MSWT-01 (*mobile surface water treatment*) adalah suatu alat penjernih air yang memiliki kapasitas 1m³ per jam dengan fasilitas kereta penarik untuk mendukung mobilitas Bergeraknya, yang merupakan salah satu hasil penelitian dan eksperimental yang telah dilaksanakan dan masih terus dikembangkan di Politeknik Manufaktur Bandung (Polman). Semula digunakan metoda pengolahan air kimia dengan penggunaan bahan tambah untuk proses koagulasi, flokulasi, dan disinfeksi yang dikombinasikan dengan filtrasi fisik menggunakan media pasir, karbon dan zeolit. Dengan pertimbangan kecepatan proses, kepraktisan dan hal lain terkait kedaruratan dalam penggunaannya dilakukan modifikasi menjadi hanya proses fisik, menggunakan kombinasi dari berbagai tingkatan katrid membran sesuai kebutuhan. Urutan proses pengolahan pada metoda fisik ini adalah katrid *Carbon Block* (CB), media filtrasi yang berisi karbon aktif, gravel, pasir silika, pasir manganis dan *multiramp*, serta katrid *micro filtration* (MF).

Dari serangkaian uji coba dan uji fungsi, mesin ini berfungsi dengan baik dan mampu menghasilkan air bersih untuk kebutuhan sehari hari dan layak digunakan untuk memasak. Hasil uji coba juga menunjukkan bahwa pada kondisi air baku yang memiliki kandungan sejumlah parameter jauh lebih tinggi dari standar yang ditetapkan, seperti halnya yang bisa dialami di daerah banjir, hasil pada beberapa parameter masih sedikit di atas ambang standar. Karena itu masih harus dilakukan beberapa uji coba berikutnya dan ditambahkan fitur-fitur lain secara kondisional, misalnya katrid ultra filtration (UF) dan disinfeksi.

Dalam merealisasi pembuatan MSWT-01, pelaksanaannya merupakan bagian dari sistem pendidikan berbasis produksi pada pembelajaran di Politeknik Manufaktur Bandung (Polman), diintegrasikan dengan program praktik peserta didik, dimana proses fabrikasi ataupun permesinan yang diperlukan disesuaikan dengan tingkat kompetensi yang direncanakan. Ketika MSWT ini selesai dan siap doperasikan, disiapkan semua hal yang diperlukan untuk implementasi pada lokasi bencana dengan melibatkan para peserta didik, meliputi hal teknis seperti kesiapan cadangan bahan, suku cadang, peralatan pendukung, kereta penarik (*anhanger*), generator sumber listrik, maupun hal-hal yang terkait pengorganisasian menyangkut pihak-pihak terkait dengan mitigasi bencana serta penjadwalannya.

Dalam implementasinya, dilakukan penugasan melalui program ekstra kurikuler, sebagai bagian dari kewajiban lembaga pendidikan dalam melayani masyarakat dan lingkungan bermasyarakat dan 'adaptasi' dari gagasan 'CSR' (*corporate social responsibility*). Di lapangan, para peserta didik akan mengalami pembelajaran dan menggali pengalaman berinteraksi dengan banyak pihak di lapangan. Lebih jauh lagi, pemanfaatan MSWT-01 ini bisa diperluas menjadi alat yang multi fungsi; selain untuk pengadaan air bersih di daerah bencana, pusat pengungsian atau dapur umum, juga bisa dimanfaatkan untuk berbagai program-program



organisasi kemahasiswaan, kegiatan sosial untuk masyarakat dengan lokasi yang jauh dari sumber air bersih, dan lain lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ilyas PI and Semiawan T, "Production Based Education (PBE): The Future Perspective of Education on Manufacturing Excellent", SciVerse ScienceDirect, Procedia-Social and Behavioral Sciences 52 (2012) 5-14.
- [2] Poulton E and Barnes L, "Corporate Social Responsibility: an Examination of Business Students' Perceptions of Materialism", Zenith, International Journal of Multidisciplinary Research Vol.2 Issue 6, June, ISSN 2231 5780, 2012.
- [3] Burcea M and Marinescu P, "Students' Perception on CSR at The Academic Level case Study", The Faculty of Administration and Business, University of Bucharest AE (Amfiteatru Economic), Corporate Social Responsibility Vol. XIII no 29 (2011) 207-220.
- [4] Ananto G, Setiawan AB and Darman MZ, "MSWT-01, an alternative in combining Production Based Education (PBE) and student CSR program in Polman", Material Science & Engineering volume 58 (2014) 012005, doi:10.1088/1757-899X/58/1/012005.
- [5] IWET Indonesia-pt, "Well Water Treatment/ RWT-05 Manual Book", Tasikmalaya: IWET, 2007.
- [6] Lindu M, "The Effects of Gradients Velocity and Detention Time to Coagulation-Flocculation of Dyes and Organic Compound in Deep Well Water", Indo. J. Chem. 8 (2) p146-150, 2008.
- [7] Philadelphia Water Department, PWD, 2009, "General Information, Literature", <http://www.phila.gov/water/>
- [8] Heijman S G J, "CT4471, Nanofiltration and Reverse Osmosis", (TU Delft) p2, 2007.
- [9] Ananto G, "Project Lab' Sebagai Alternatif Penanganan Produk Inovatif Penelitian Di Politeknik Manufaktur (POLMAN) Bandung", ISBN: 978-602-97961-1-7, Prosiding Seminar Nasional SciETec 2012 Unibraw, 2012.
- [10] Ananto G, "'321' Program In Polman for Better Operations Management Understanding", Advanced Material Research 576 (2012) 685-689.

PENGARUH BENTUK DAN UKURAN GELOMBANG PLAT PENYERAP TERHADAP EFISIENSI KOLEKTOR SURYA

Ekadewi A. Handoyo, Gideon Indrata

Prodi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra

Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia

E-mail :ekadewi@petra.ac.id

ABSTRAK

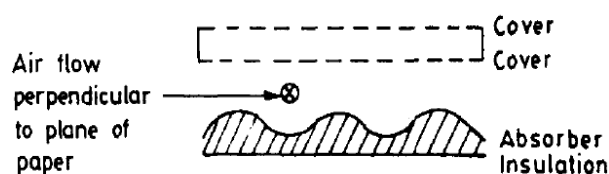
Kolektor surya merupakan piranti yang mengkonversi radiasi matahari menjadi energi termal. Meskipun kolektor surya memiliki konstruksi yang sederhana, namun sangat memungkinkan digunakan di daerah tropis. Fluida kerja yang umum digunakan adalah air atau udara. Efisiensi kolektor yang memanaskan udara lebih rendah dibandingkan air, karena kalor jenis dan konduktivitas termal udara yang lebih rendah dari air. Karenanya banyak penelitian dilakukan untuk memperbaiki kinerja kolektor pemanas udara. Kolektor yang umum digunakan adalah yang jenis plat datar. Namun, plat bergelombang memiliki luasan lebih besar, sehingga dapat menyerap lebih banyak radiasi dan memberikan hasil lebih baik daripada plat datar. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk dan ukuran gelombang plat penyerap pada suatu kolektor surya yang memberikan efisiensi tinggi. Di samping plat gelombang, diteliti juga kolektor dengan plat penyerap plat datar. Penelitian dilakukan dengan simulasi numerik dan percobaan. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil percobaan. Setelah model yang digunakan dalam simulasi numerik dinyatakan valid, penelitian dilanjutkan secara numerik untuk mencari perbandingan ukuran gelombang plat penyerap yang memiliki efisiensi paling tinggi dan pressure drop paling rendah dengan software ANSYS FLUENT. Hasil dari percobaan adalah bahwa plat penyerap bentuk gelombang memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan plat datar. Sedangkan menurut simulasi, perbandingan ukuran plat gelombang yang menghasilkan efisiensi kolektor paling tinggi dengan pressure drop paling rendah adalah pada $\omega = 4$, dan $\gamma = 8$.

Kata kunci: kolektor surya, plat penyerap bentuk gelombang, pemanas udara.

1. PENDAHULUAN

Dengan semakin menipisnya persediaan minyak bumi dan bahan bakar tidak terbarukan, maka pemanfaatan energi matahari semakin digalakkan. Salah satu peralatan untuk itu adalah kolektor surya yang umumnya digunakan untuk memanaskan air atau udara. Kolektor surya pemanas air memiliki efisiensi lebih tinggi dari udara, karena kalor jenis dan konduktivitas termal air yang lebih tinggi dibanding udara. Namun, kolektor surya pemanas udara juga mempunyai kelebihan, yaitu udara lebih ringan dibanding air sehingga peralatan lebih ringkas, udara tidak bersifat korosif dibandingkan air. Kelebihan lain adalah konstruksi kolektor surya pemanas udara lebih sederhana, karena tidak menghadapi masalah kebocoran seperti pada pemanas air.

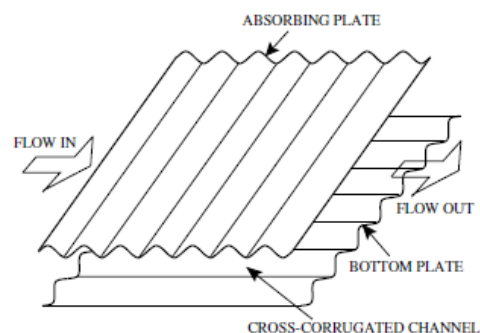
Banyak penelitian dilakukan untuk meningkatkan kinerja kolektor surya pemanas udara. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan meningkatkan luas permukaan perpindahan panas dan menambah turbulensi di dalam aliran fluida kerja, dalam hal ini udara. (Choudhury & Garg, 1991) meneliti kolektor surya pemanas udara dengan plat penyerap bentuk gelombang seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Plat penyerap bergelombang (Choudhury & Garg, 1991)

Ada pula penelitian untuk mengetahui pengaruh besarnya celah ketegingian dan arah aliran fluida terhadap efisiensi pada

kolektor surya yang jenis fluida kerjanya mengalir di bawah plat penyerap berbentuk gelombang (Lin, Gao, & Liu, 2006). Kemudian juga terdapat penelitian untuk mengetahui pengaruh ditambahkannya gelombang pada plat sebelah bawah dan arahnya dirubah menjadi tegak lurus arah gelombang plat penyerap dan arah kebalikannya terhadap efisiensi, seperti pada Gambar 2 (Gao, Lin, Liu, & Xia, 2007). Hasilnya adalah ternyata yang paling efisien adalah ketika arah aliran fluida sejajar dengan arah gelombang plat bawah dan tegak lurus arah gelombang plat penyerap yang berarti membuat turbulensi yang cukup pada aliran dan luas plat penyerap yang terbesar. Sehingga arah aliran yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sejajar dengan gelombang plat penyerap pada tipe kolektor yang arah alirannya di atas plat penyerap.

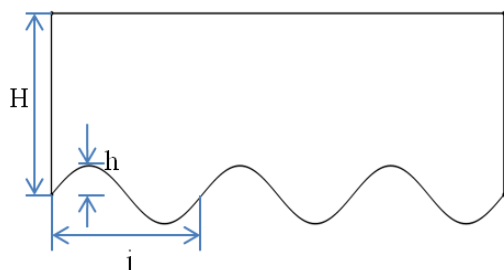


Gambar 2. Aliran udara melintang plat penyerap bentuk gelombang (Gao, Lin, Liu, & Xia, 2007)

Plat penyerap dengan permukaan bergelombang memiliki luas permukaan yang lebih besar jika dibandingkan dengan plat datar. Selain itu, kolektor dengan plat gelombang juga cenderung membuat aliran udara memiliki turbulensi lebih

besar daripada kolektor dengan plat datar, sehingga diharapkan efisiensi kolektor dengan plat gelombang lebih tinggi dari kolektor plat datar. Akan tetapi, belum ada penelitian yang mencari bentuk dan ukuran gelombang plat penyerap yang memberikan efisiensi terbaik suatu kolektor surya pemanas udara. Dalam penelitian ini, dicari rasio jarak/lebar gelombang, j , terhadap tinggi gelombang, h

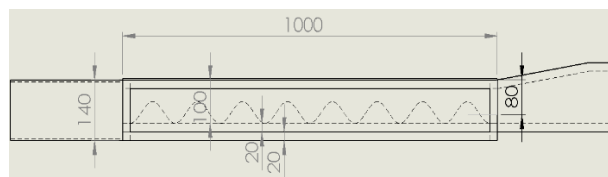
$h\left(\frac{j}{h} = \omega\right)$ dan rasio lebar celah, H , terhadap tinggi gelombang, $h\left(\frac{H}{h} = \gamma\right)$, seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Bentuk dan dimensi gelombang plat penyerap

2. METODOLOGI

Penelitian diawali dengan penentuan model kolektor yang akan diteliti secara eksperimen/percobaan. Ukuran plat penyerap plat datar adalah sama dengan ukuran kaca, yaitu $P \times L = 1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$. Plat penyerap yang digunakan berupa aluminium yang dicat hitam dengan ketebalan 0,3 mm. Skema dan foto dari kolektor surya yang digunakan dalam percobaan adalah seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Skema kolektor surya plat gelombang yang digunakan dalam percobaan.



Gambar 5. Kolektor plat datar dan gelombang yang digunakan dalam percobaan.

Setelah peralatan siap, percobaan dilakukan di *outdoor*. Untuk mengalirkan udara melalui kolektor digunakan dua kipas komputer yang dilengkapi dengan potensio untuk mengatur kecepatan aliran udara. Udara dialirkan dengan

kecepatan 0,5 m/s dan 0,8 m/s. Kecepatan udara diukur dengan anemometer. Temperatur udara diukur pada masukan dan keluaran. Percobaan dilakukan secara bersamaan untuk kolektor plat gelombang dan plat datar seperti pada Gambar 5.

Data yang didapat dari percobaan digunakan untuk mem-validasi model yang digunakan dalam simulasi numerik. Setelah model numerik dinyatakan valid, maka penelitian dilanjutkan secara numerik saja untuk mendapatkan rasio ω dan rasio γ yang memberikan efisiensi kolektor terbaik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil percobaan yang dilakukan di *outdoor* dengan pengukuran serentak adalah seperti pada Tabel 1 untuk kecepatan aliran udara sebesar 0,8 m/s dan Tabel 2 untuk 0,5 m/s.

Tabel 1. Hasil percobaan ketika kecepatan aliran udara 0,8 m/s

Jenis plat	T_i , C	T_o , C	ΔT , C	T_{amb} , C	V_{fan} , m/s	Jenis plat	T_i , C	T_o , C	ΔT , C	T_{amb} , C	V_{fan} , m/s
Datar	34,7	39,3	4,6	34,7	0,8	Gelombang	34,4	40	5,6	34,4	0,8
	34,8	38,7	3,9	34,8	0,8		35,2	41,3	6,1	35,2	0,8
	34,6	41,3	6,7	34,6	0,9		35,2	40,4	5,2	35,2	0,9
	34,8	41,1	6,3	34,8	0,9		34,9	43,4	8,5	34,9	0,8
	35	41,6	6,6	35	0,8		35	40,5	5,5	35	0,8

Tabel 2. Hasil percobaan ketika kecepatan aliran udara 0,5 m/s

Jenis plat	T_i , C	T_o , C	ΔT , C	T_{amb} , C	V_{fan} , m/s	Jenis plat	T_i , C	T_o , C	ΔT , C	T_{amb} , C	V_{fan} , m/s
Datar	33,6	36,5	2,9	33,6	0,5	Gelombang	34	40,8	6,8	34	0,6
	33,8	39,1	5,3	33,8	0,6		34,2	40,4	6,2	34,2	0,6
	33,7	38,7	5	33,7	0,6		33,7	39,7	6	33,7	0,5
	34	39,3	5,3	34	0,5		33,8	39,6	5,8	33,8	0,6
	33,8	39,6	5,8	33,8	0,5		33,9	41	7,1	33,9	0,5

Efisiensi kolektor tergantung pada kalor yang diserap udara, Q_u , luasan kolektor, A_c , dan intensitas radiasi, I_T , sesuai

dengan persamaan: $\eta = \frac{Q_u}{I_T \times A_c}$ (Duffie, 1991). Pada per-

cobaan, I_T diukur dengan Pyarnometer berkisar 800 W/m². Perbandingan hasil perhitungan efisiensi kedua kolektor pada Tabel 3.

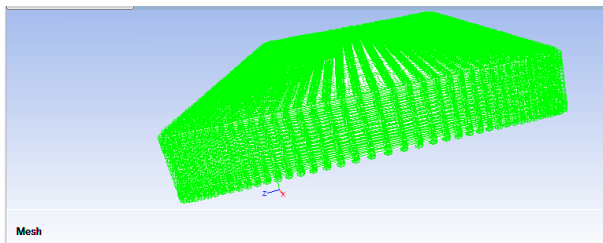
Tabel 3. Perbandingan kinerja kolektor dengan plat datar dan gelombang

Bentuk	Kenaikan temperatur, K		Efisiensi	
	$V_{udara} = 0,8 \text{ m/s}$	$V_{udara} = 0,5 \text{ m/s}$	$V_{udara} = 0,8 \text{ m/s}$	$V_{udara} = 0,5 \text{ m/s}$
Datar	4,6	4,9	0,55	0,36
gelombang	6,2	6,4	0,64	0,45

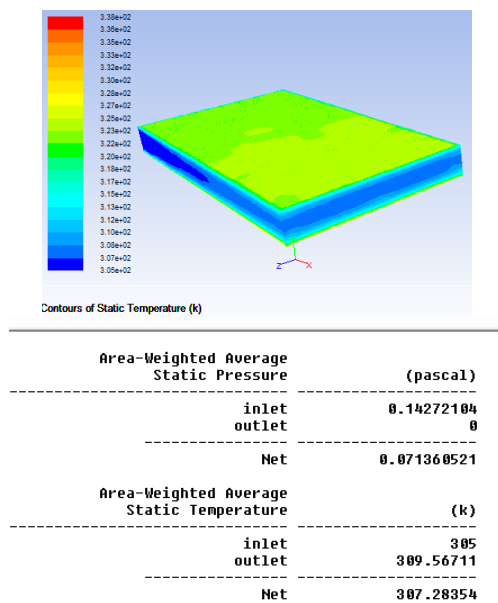
Mesh dari model numerik dibuat sesuai dengan model pada percobaan seperti pada Gambar 6. Selain mendapatkan distribusi temperatur, juga didapatkan hasil numerik temperatur dan tekanan udara di masukan-keluaran. Arah aliran fluida kerja diambil searah dengan sumbu x positif, dan arah radiasi matahari searah dengan sumbu y negatif.

Distribusi temperatur pada aliran udara yang mengalir di bawah plat penyerap dari tiap bentuk kolektor dengan kecepatan 0,8 m/s sebagai hasil simulasi numerik dapat

dilihat pada Gambar 7 dan 8. Pada kedua gambar tersebut juga ditunjukkan hasil numerik dari simulasi untuk temperatur udara serta penurunan tekanan aliran masuk dan ke luar saluran.



Gambar 6. Mesh dari model kolektor surya plat datar



Gambar 7. Distribusi temperatur pada kolektor datar

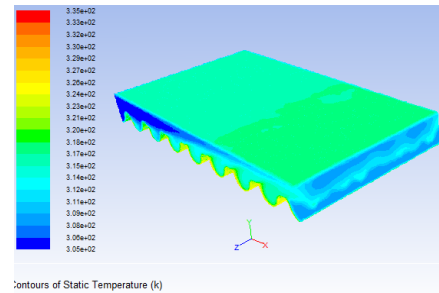
Dapat terlihat pada Gambar 7 bahwa temperatur keluar dari kolektor datar tidak merata atas-bawah dan temperatur pada pertengahan adalah sekitar 306-307 K. Dari Gambar 7 dan 8, temperatur udara keluar kolektor dengan plat gelombang terlihat lebih tinggi daripada kolektor plat datar. Sedang dari rata-rata temperatur yang didapatkan, terlihat bahwa kolektor plat datar memiliki temperatur rata-rata keluar yang lebih tinggi dari plat gelombang. Pada plat datar, temperatur rata-rata keluaran udara adalah 309,567 K. Sedangkan pada kolektor plat gelombang, temperatur keluaran udara adalah 310,175 K. Perbandingan kenaikan temperatur udara dan efisiensi dari hasil simulasi numerik ditunjukkan pada Tabel 4.

Dari Tabel 3 dan 4 terlihat bahwa kenaikan temperatur udara dan efisiensi kolektor dengan plat penyerap bentuk gelombang lebih tinggi daripada plat datar. Terdapat perbedaan antara angka yang didapat dari percobaan dengan simulasi. Hal ini disebabkan kontur gelombang pada simulasi didekati dengan kurva sinus, sedangkan pada percobaan lebih menyerupai setengah lingkaran. Penyebab lain adalah pada simulasi intensitas radiasi dijaga konstan 800 W/m², sedangkan pada percobaan dapat lebih tinggi.

Selanjutnya adalah meneliti rasio ω dan γ terbaik. Dari beberapa kali simulasi, didapatkan hasil seperti berikut ini.

Tinggi gelombang, h , diteliti dengan interval 10 mm dari ketinggian minimum 10 mm hingga tinggi maksimum 60

mm, seperti pada Gambar 9. Jarak atau panjang gelombang, j , diteliti dengan interval 40 mm, dari panjang terpendek 40 mm hingga 200 cm, seperti pada Gambar 10.



Gambar 8. Distribusi temperatur pada kolektor gelombang

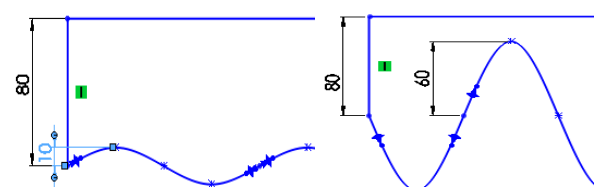
Tabel 4. Perbandingan hasil simulasi numerik pada kecepatan aliran 0,8 m/s

Bentuk	ΔP (Pa)	ΔT (K)	η
Datar	0,143	4,567	0,46
Gelombang	1,892	5,175	0,52

Dari Tabel 3 dan 4 terlihat bahwa kenaikan temperatur udara dan efisiensi kolektor dengan plat penyerap bentuk gelombang lebih tinggi daripada plat datar. Terdapat perbedaan antara angka yang didapat dari percobaan dengan simulasi. Hal ini disebabkan kontur gelombang pada simulasi didekati dengan kurva sinus, sedangkan pada percobaan lebih menyerupai setengah lingkaran. Penyebab lain adalah pada simulasi intensitas radiasi dijaga konstan 800 W/m², sedangkan pada percobaan dapat lebih tinggi.

Selanjutnya adalah meneliti rasio ω dan γ terbaik. Dari beberapa kali simulasi, didapatkan hasil seperti berikut ini.

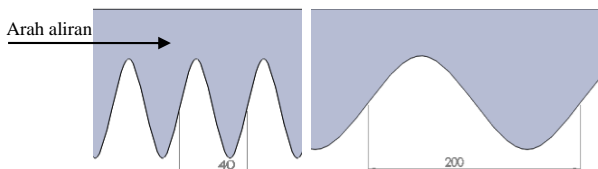
Tinggi gelombang, h , diteliti dengan interval 10 mm dari ketinggian minimum 10 mm hingga tinggi maksimum 60 mm, seperti pada Gambar 9. Jarak atau panjang gelombang, j , diteliti dengan interval 40 mm, dari panjang terpendek 40 mm hingga 200 cm, seperti pada Gambar 10.



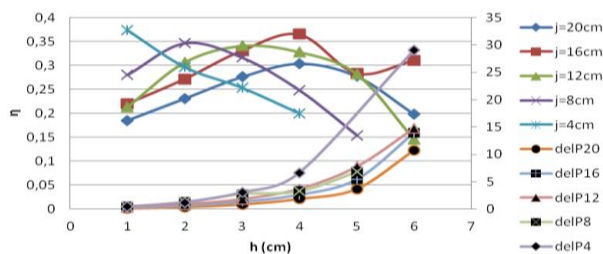
Gambar 9. Ketinggian gelombang minimum 10 mm dan maksimum 60 mm

Dari hasil simulasi numerik untuk tinggi gelombang, h , dari 10 mm hingga 60 mm dan panjang gelombang, j , dari 40 mm hingga 200 mm, didapatkan efisiensi kolektor seperti pada Gambar 11. Semakin tinggi gelombang maka semakin tinggi pula pressure drop. Dari Gambar 11 terlihat bahwa

pressure drop untuk plat dengan tinggi gelombang, h , lebih dari 4 sangat tinggi dan sebaiknya dihindari. Jarak antar gelombang atau panjang gelombang yang memberikan efisiensi paling tinggi adalah ketika 4 cm pada ketinggian gelombang 1 cm. Pada Gambar 11 terlihat bahwa ketika tinggi gelombang, $h=1$ cm, semakin kecil jarak antar gelombang, j , semakin tinggi efisiensi kolektor. Ada kemungkinan efisiensi tertinggi tercapai ketika tinggi gelombang di bawah 1 cm. Oleh karena itu diadakan simulasi 2 kali lagi, yaitu pada tinggi gelombang 0,3 dan 0,7 cm dengan hasil pada Gambar 12.

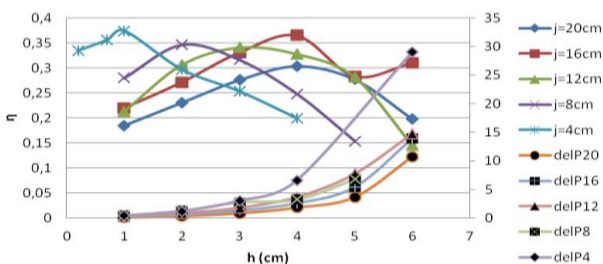


Gambar 10. Panjang gelombang minimum 40 mm dan maksimum 200 mm



Gambar 11. Efisiensi terhadap ketinggian gelombang beserta *pressure drop* pada lima panjang gelombang yang diteliti

Dari Gambar 12, ternyata efisiensi kolektor paling tinggi tetap pada tinggi gelombang, h , 1 cm. Jika dibandingkan dengan plat datar yang efisiensinya sekitar 0,29, maka titik tertinggi plat gelombang memiliki efisiensi lebih tinggi. Jarak antar gelombang atau panjang gelombang terbaik adalah 4 cm dengan tinggi gelombang 1 cm. Dengan demikian, rasio $\omega = h/j = 4$, dan $\gamma = H/h = 8$. Hasil ini bersesuaian dengan hasil yang didapatkan Naphon yang meneliti untuk plat diberi pemanas yang dibuat bergerigi. Naphon menemukan bahwa semakin kecil gerigi yang digunakan, efisiensi perpindahan panas semakin tinggi (Naphon, 2007).



Gambar 12. Efisiensi kolektor dengan tambahan tinjauan tinggi gelombang di bawah 1 cm

4. KESIMPULAN

Dari hasil percobaan dan simulasi numerik, didapatkan bahwa:

- Efisiensi kolektor surya dengan plat penyerap bentuk gelombang lebih tinggi daripada kolektor plat datar.

- Penurunan tekanan aliran udara semakin tinggi ketika panjang gelombang lebih pendek dan tinggi gelombang lebih besar. Pada tinggi gelombang kurang atau sama dengan 2 cm, penurunan tekanan hampir tidak berbeda untuk panjang gelombang berapapun.
- Efisiensi kolektor dengan plat penyerap bentuk gelombang tertinggi saat perbandingan ukuran $\omega = 4$, dan $\gamma = 8$.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Choudhury, C., & Garg, H. P. (1991). Design Analysis of Corrugated and Flat Plate Solar Air Heaters. *Renewable Energy Vol I, No. 5/6*, p. 595 – 607.
- [2] Duffie, J. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd ed.* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Gao, W., Lin, W., Liu, T., & Xia, C. (2007). Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters. *Applied Energy* 84, 425-441.
- [4] Lin, W., Gao, W., & Liu, T. (2006). A parametric study on the thermal performance of cross-corrugated solar air collectors. *Applied Thermal Engineering* 26, 1043–1053.
- [5] Naphon, P. (2007). Heat transfer characteristics and pressure drop in channel with V corrugated upper and lower plates. *Energy conversion and management* 48, 1516 – 1524.

EVALUASI RANCANGAN SEPEDA *PASCA STROKE* DITINJAU DARI ASPEK PERAKITAN DENGAN MENGHITUNG EFISIENSI DESAIN PERAKITAN

Ahmad Anas Arifin¹⁾, I Made Londen Batan²⁾

Jurusan Teknik Mesin FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember^{1,2)}

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia^{1,2)}

Phone: 0062-85-730258314¹⁾, 0062-81-6543876²⁾

E-mail : anas.arifin10@gmail.com¹⁾, londbatan@me.its.ac.id²⁾

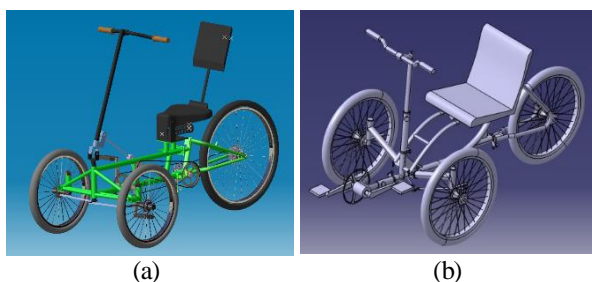
ABSTRAK

Akhir-akhir ini banyak masyarakat yang terkena penyakit *stroke*. Untuk mengatasi masalah tersebut, telah dirancang sepeda *pasca stroke* untuk membantu pemulihan penderita *pasca stroke*. Pada tahap awal, sepeda *pasca stroke* dikembangkan menjadi 2 konsep alternative sepeda *pasca stroke* yaitu konsep A dan konsep B. Konsep A dikembangkan dengan sistem *kayu tangan* dan penambahan fitur pelipatan. Sedangkan konsep B merupakan konsep yang berbeda yaitu dengan meletakkan sistem pedal kaki pada bagian depan sepeda, penambahan fitur lipatan *hanger* roda depan, dan perubahan model rangka utama. Untuk memilih konsep, maka dilakukan pemilihan berdasarkan fungsi, operasional, ergonomi, kekuatan material, *manufacturability*, dan perakitan. Pada penelitian ini, pemilihan dari konsep dilakukan berdasarkan aspek *manufacturability* dan perakitan. Metodologi penelitian yang digunakan; studi literatur dan lapangan dilanjutkan dengan evaluasi *manufacture ability*. Selanjutnya, evaluasi perakitan dilakukan dengan menghitung nilai efisiensi desain perakitan. Dari evaluasi tersebut, hasil yang didapatkan ; nilai efisiensi desain perakitan konsep A sebesar 24.10 % dan konsep B sebesar 23.09 % dengan waktu *machining* konsep A = 254.78 menit dan konsep B = 296.61 menit. Setelah melalui proses penilaian, konsep terpilih yang didapatkan adalah konsep A.

Kata kunci: Efisiensi desain perakitan, *manufacturability*, *pasca stroke*, sepeda.

1. PENDAHULUAN

Stroke merupakan penyebab kematian dan kecacatan utama di dunia pada saat ini. Data Kementerian Kesehatan RI (2009) menunjukkan bahwa *stroke* merupakan penyebab kematian nomor 1 diantara pasien yang dirawat di rumah sakit. Atas latar belakang tersebut, telah dirancang sepeda *pasca stroke* untuk membantu penanganan penderita *pasca stroke*. Sebagai langkah awal, 2 buah konsep sepeda *pasca stroke* sudah dirancang oleh saudara Setiawan [1]. Kedua konsep tersebut dapat dilihat pada gambar 1 a dan b:



Gambar 1. a) Konsep A Sepeda Pasca Stroke, b) Konsep B Sepeda Pasca Stroke (Andi, 2014)

Dari 2 konsep tersebut dipilih salah satu konsep untuk direalisasikan. Untuk pemilihan konsep tersebut, beberapa parameter dibutuhkan untuk proses evaluasi. Sebagai langkah awal, konsep sepeda yang dirancang dipilih berdasarkan atas evaluasi fungsional, mampu raih, ergonomi dan kekuatan material. Proses pemilihan konsep tersebut dilakukan oleh Imama [2]. Namun demikian, aspek manufaktur dan perakitan belum dimasukkan ke dalam evaluasi konsep tersebut. Untuk itu, pada penelitian ini evaluasi yang lebih jauh dilakukan dengan memasukkan aspek manufaktur dan perakitan ke dalam proses pemilihan konsep. Untuk maksud

tersebut, maka 2 buah konsep dievaluasi dari segi kemampuan manufaktur, perakitan, dan perhitungan efisiensi desain perakitan pada penelitian ini. Sehingga rekomendasi dapat disusun untuk pemilihan konsep. Dengan evaluasi tersebut, evaluasi konsep diharapkan lebih teliti dan dapat disusun konsep pemilihan desain yang lebih kompleks dan menyeluruh (melibatkan seluruh aspek pengembangan produk).

Berdasarkan uraian di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui *Manufacturability* masing-masing konsep.
2. Untuk mengetahui evaluasi perakitan dari masing-masing konsep.
3. Untuk mengetahui nilai efisiensi desain perakitan masing-masing konsep.

Sedangkan manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan rekomendasi dalam proses pemilihan konsep.
2. Dapat memberikan sebuah metode dalam perancangan dan pengembangan suatu produk.

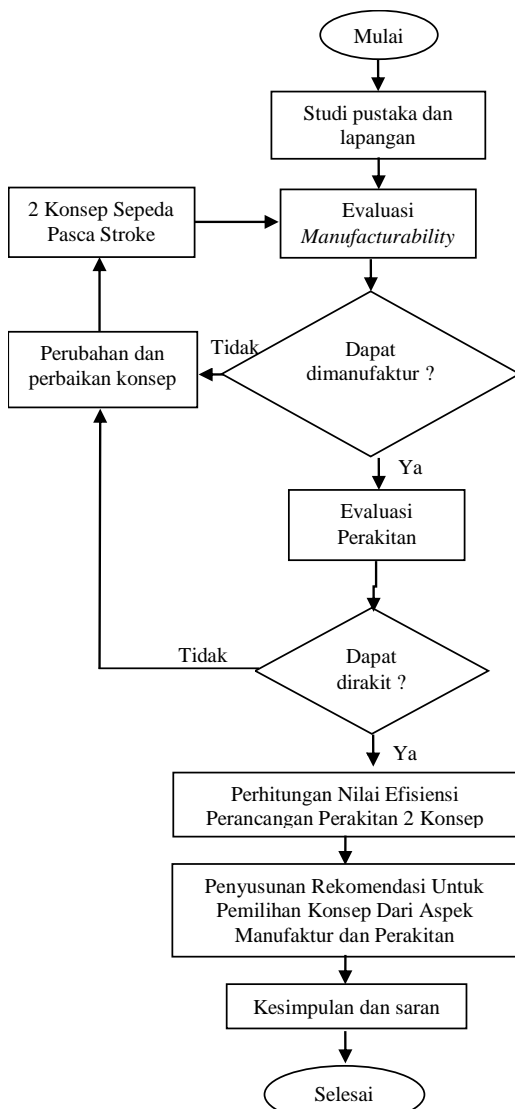
2. METODOLOGI

Untuk melakukan evaluasi rancangan sepeda *pasca stroke*, maka, diagram alir dibuat seperti Gambar 2.

Berdasarkan diagram alir pada gambar 2, langkah – langkah penelitian dimulai dengan studi pustaka dan lapangan untuk memperkuat dasar teori penelitian. Selanjutnya 2 konsep sepeda dievaluasi berdasarkan *manufacturability*. Dari langkah ini *output* yang diharapkan adalah sebuah kesimpulan bisa tidaknya sepeda tersebut dibuat atau dimanufaktur. Di samping itu dilakukan juga perhitungan estimasi pemesinan yang dibutuhkan. Langkah selanjutnya adalah evaluasi perakitan. Pada langkah ini rangka sepeda dalam bentuk konsep tersebut dievaluasi dengan merancang

assembly line dan jenis perakitan yang sesuai. Pada tahap ini ditetapkan sub komponen rangka dan jenis perakitan. Setelah masing-masing sub komponen ditetapkan kemudian dipilih jenis perakitan yang sesuai. Kemudian langkah penelitian dilanjutkan dengan menghitung nilai efisiensi desain perakitan.

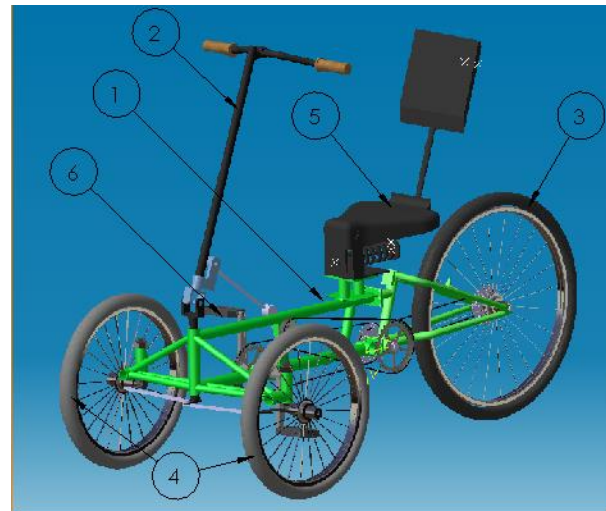
Efisiensi desain perakitan adalah perbandingan antara jumlah waktu minimum teoritis perakitan standar dibandingkan dengan waktu perakitan sebenarnya yang didekati dengan metode *assembly efficiency* (Boothroyd, 2002). Dalam perhitungan efisiensi desain perakitan, pendefinisian masing-masing sub komponen diperlukan untuk memudahkan mengisi lembar kerja efisiensi desain. Pendefinisian yang dimaksudkan adalah simetri α dan β untuk melihat derajat simetri dari sub komponen tersebut, dimensi sub komponen untuk mengklasifikasikan waktu pemegangan dan pemasangan, dan tingkat kesulitan pemegangan [3][4]. Perhitungan efisiensi desain dilakukan dengan menggunakan lembar kerja efisiensi desain untuk mendapatkan jumlah komponen teoritis dan waktu perakitan total. Setelah nilai efisiensi desain masing-masing konsep didapatkan. Langkah dilanjutkan dengan penilaian konsep untuk penyusunan rekomendasi konsep yang akan membantu pemilihan konsep secara keseluruhan.



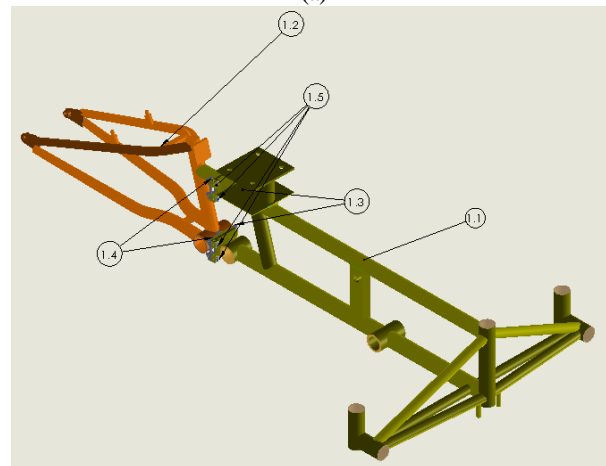
Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

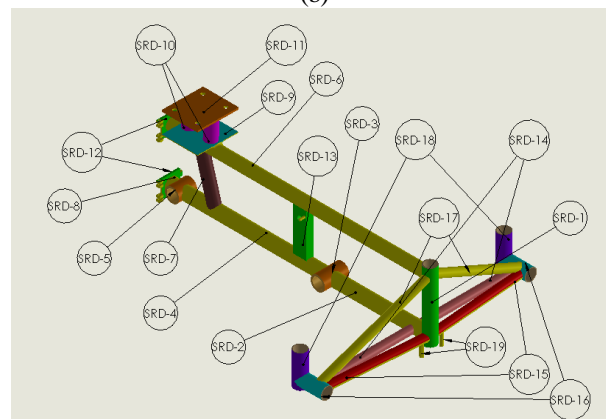
Dengan menerapkan diagram alir penelitian pada Gambar 2, langkah penelitian diawali dengan evaluasi *manufacturability*. Evaluasi *manufacturability* diawali dengan penomoran komponen dan sub komponen rangka sepeda untuk memudahkan identifikasi komponen agar tidak tertukar satu dengan yang lainnya. Penomoran komponen dan sub komponen untuk konsep A dan B dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4:



(a)

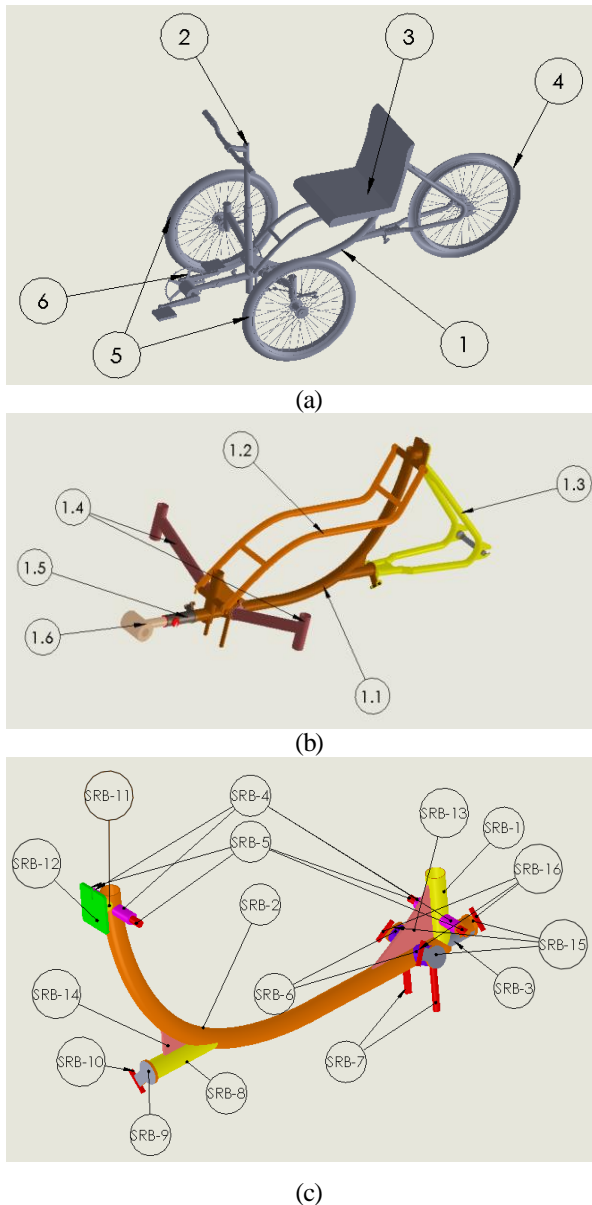


(b)



(c)

Gambar 3. a). Pengelompokan komponen kelompok besar, b). Penomoran komponen kelompok kecil, c). Penomoran sub komponen (SRD- Sub Rangka Depan) Dari Konsep A



Gambar 4. a). Pengelompokan komponen kelompok besar, b). Penomoran komponen kelompok kecil, c). Penomoran sub komponen (SRB- Sub Rangka Bawah) Dari Konsep B

Dengan menggunakan cara yang sama, bagian-bagian lain dari rangka sepeda masing-masing konsep dievaluasi hingga didapatkan semua nomor sub komponen masing-masing konsep. Kemudian, evaluasi dilanjutkan dengan pendefinisian dimensi masing-masing sub komponen dan pemilihan jenis manufaktur yang sesuai serta perhitungan estimasi waktu manufaktur [5] yang dibutuhkan seperti contoh SRD-1 konsep A pada Tabel 1.

Cara evaluasi yang sama dilakukan pula pada konsep 2. Selanjutnya, seluruh kolom jenis manufaktur kedua konsep diisi sesuai dengan jenis *machining* yang dibutuhkan. Evaluasi tersebut dapat digunakan untuk mengetahui bahwa seluruh rangka konsep sepeda pasca stroke dapat dibuat/dimanufaktur. Selain jenis proses manufaktur, pada langkah ini dihitung juga waktu yang digunakan untuk mengerjakan/menyelesaikan pembuatan sebuah komponen. Berdasarkan hasil perhitungan waktu manufaktur masing-masing konsep, estimasi biaya dapat disusun dengan asumsi upah kerja sesuai UMK Jawa timur yang telah dikonversikan

menjadi Rp 3.18 per detik. Berdasarkan analisa tersebut, data hasil evaluasi *manufacturability* disusun dalam Tabel 2.

Tabel 1. Lembar Kerja *Manufacturability* Sub Komponen SRD-1 Konsep A

No. Komponen	Komponen	Jumlah Komponen	No. Sub komponen	Sub Komponen	Jumlah	Dimensi	Proses Machining	Waktu Pemesinan
1	Rangka Depan	1	SRD -1	Pipa Rumah Engsel Kemudi	1	Do = 34mm, Di = 28 mm, L = 190 mm	Bubut	8.24 menit
							Cutting	5.53 menit

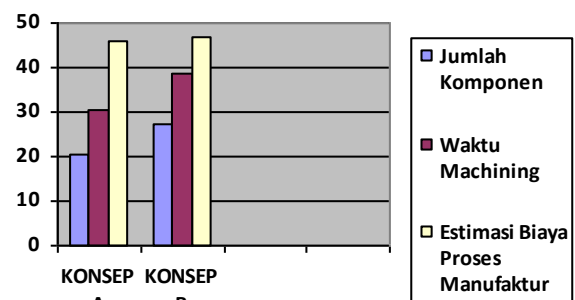
Cara evaluasi yang sama dilakukan pula pada konsep 2. Selanjutnya, seluruh kolom jenis manufaktur kedua konsep diisi sesuai dengan jenis *machining* yang dibutuhkan. Evaluasi tersebut dapat digunakan untuk mengetahui bahwa seluruh rangka konsep sepeda pasca stroke dapat dibuat/dimanufaktur. Selain jenis proses manufaktur, pada langkah ini dihitung juga waktu yang digunakan untuk mengerjakan/menyelesaikan pembuatan sebuah komponen. Berdasarkan hasil perhitungan waktu manufaktur masing-masing konsep, estimasi biaya dapat disusun dengan asumsi upah kerja sesuai UMK Jawa timur yang telah dikonversikan menjadi Rp 3.18 per detik. Berdasarkan analisa tersebut, data hasil evaluasi *manufacturability* disusun dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Evaluasi *Manufacturability*

	Konsep A	Konsep B
Jumlah komponen	53	66
Waktu Machining*	254,78 menit	296,61 menit
Bisa/ tidak dimanufaktur	Bisa	Bisa
Estimasi Biaya Proses Manufaktur*	Rp. 49.184	Rp. 56.593

*Waktu dan biaya yang dimaksud adalah biaya proses saja, tidak termasuk biaya material, alat, listrik, perawatan, dan setup machine.

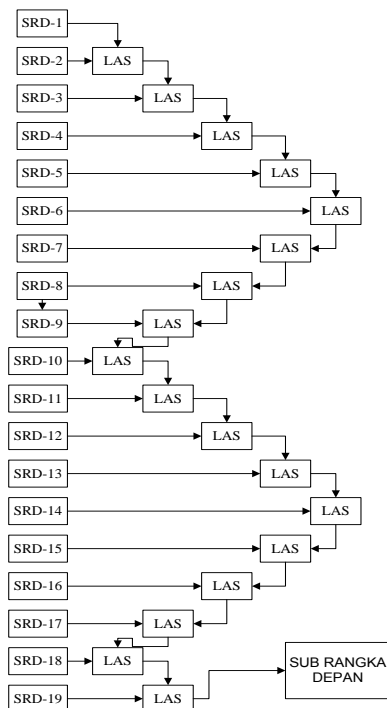
Kemudian diagram hasil evaluasi *manufacturability* disusun sebuah grafik untuk menunjukkan hubungan antara jumlah komponen dengan waktu *machining*.



Gambar 5. Diagram Hasil Evaluasi *Manufacturability*

Berdasarkan gambar 5, terlihat bahwa jumlah komponen berpengaruh terhadap waktu *machining* yang diperlukan secara umum. Semakin banyak jumlah komponen, semakin lama waktu *machining* yang diperlukan. Semakin besar waktu *machining* yang diperlukan, semakin besar pula biaya yang dikeluarkan. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah komponen berbanding lurus dengan waktu *machining*. Hal yang sama terjadi, dimana waktu *machining* berbanding lurus dengan jumlah biaya yang dikeluarkan. Waktu yang didapatkan pada perhitungan ini adalah waktu relatif proses pemesinan.

Selanjutnya, evaluasi dilanjutkan dengan merancang *assembly line* sekaligus penentuan jenis perakitan. Berikut adalah contoh *assembly line* pada Sub Rangka Depan (SRD) konsep A seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. *Assembly line* SRD konsep A

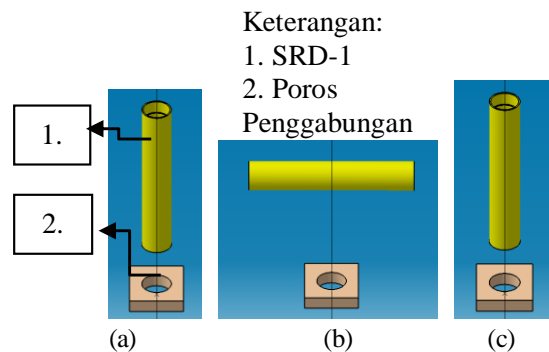
Evaluasi yang sama dilakukan pula untuk semua sub perakitan dari seluruh konsep. Berdasarkan bagan perakitan yang telah dibuat untuk kedua konsep, dapat dilihat bahwa semua sub komponen memiliki jenis perakitan tertentu sesuai dengan geometri dan material komponen. Dari langkah *assembly line* dan penentuan jenis perakitan tersebut dapat disimpulkan bahwa 2 konsep tersebut dapat dirakit. Bagan perakitan merupakan bagian penting dalam evaluasi perakitan. Hal ini dikarenakan bagan perakitan menentukan urutan perakitan produk tersebut. Perbedaan urutan perakitan dapat mengakibatkan perbedaan waktu perakitan produk tersebut. Namun, dalam penelitian ini hanya dibahas satu jenis urutan perakitan saja tiap konsep.

Effisiensi Desain Perakitan

Kemudian, evaluasi dilanjutkan dengan perhitungan nilai efisiensi desain perakitan masing-masing konsep. Perhitungan nilai efisiensi desain diawali dengan mengisi lembar kerja efisiensi desain perakitan. Berikut adalah hasil lembar kerja efisiensi desain untuk masing-masing konsep:

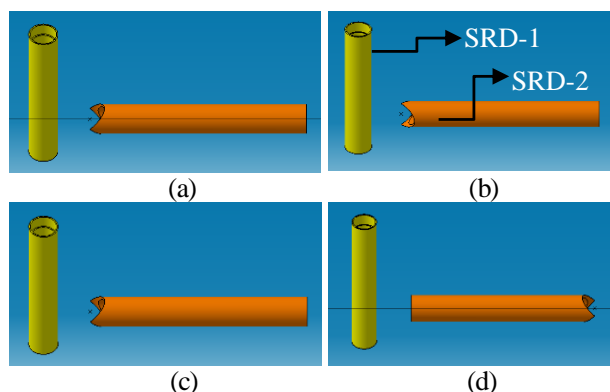
Konsep A

Sebelum mengisi lembar kerja efisiensi desain perakitan, terlebih dahulu dibuat deskripsi untuk masing-masing sub perakitan. Dalam pendeskripsian masing-masing sub komponen terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu Alpha (α), Beta (β), jenis pemegangan dan pemasangan. Untuk lebih memahami poin-poin tersebut, sebuah penjelasan yang rinci dibutuhkan untuk mendeskripsikan suatu komponen. Contoh pendeskripsian sub komponen untuk SRD-1 dan SRD-2 Konsep 1 dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8



Gambar 7. (a) Posisi SRD-1 pada $\alpha = 0^\circ$, (b) Posisi SRD-1 pada $\alpha = 90^\circ$, (c) Posisi SRD-1 pada $\alpha = 180^\circ$

Berdasarkan Gambar 8 dapat terlihat bahwa sudut simetri α pada SRD-1 adalah 180° . Hal ini dikarenakan pada sudut $\alpha = 90^\circ$ SRD-1 belum dapat masuk pada poros penggabungannya. Sedangkan sudut simetri β pada SRD-1 adalah 0° . Hal ini dikarenakan penampang poros penggabungan SRD-1 adalah lingkaran sehingga ketika SRD-1 diputar sesuai sumbu poros penggabungan maka SRD-1 dapat masuk ke poros penggabungan pada posisi derajat berapapun. SRD-1 bisa dipegang satu tangan tanpa alat bantu. Hal ini dikarenakan bentuknya sederhana dan dimensinya tidak terlalu kecil serta beban sub komponen tidak terlalu berat. Kemudian evaluasi dilanjutkan dengan perakitan SRD-1 dan SRD-2.



Gambar 8. (a) Posisi SRD-2 pada $\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$, (b) Posisi SRD-2 pada $\beta = 90^\circ$, (c) Posisi SRD-2 pada $\beta = 180^\circ$, (d) Posisi SRD-2 pada $\alpha = 180^\circ$

Berdasarkan gambar 8 dapat terlihat bahwa sudut simetri α pada SRD-1 adalah 360° . Hal ini dikarenakan pada sudut $\alpha = 90^\circ$ dan 180° SRD-2 belum dapat sesuai pada poros penggabungannya (SRD-1). Sedangkan sudut simetri β pada SRD-1 adalah 180° . Hal ini dikarenakan penampang poros penggabungan SRD-2 adalah penampang selimut SRD-1 dengan profil *tee joint*. Pada $\beta = 90^\circ$, SRD-2 belum dapat



sesuai dengan poros penggabungannya sampai pada $\beta = 180^\circ$ barulah SRD-2 sesuai dengan poros penggabungannya. SRD-2 bisa dipegang satu tangan tanpa alat bantu. Hal ini dikarenakan bentuknya sederhana dan dimensinya tidak terlalu kecil serta beban sub komponen tidak terlalu berat. Sedangkan untuk pemasangannya, SRD-2 dan SRD-1 digabungkan dengan menggunakan pengelasan. Kemudian evaluasi dilanjutkan dengan metode yang sama untuk semua sub komponen lain dari konsep A. Lembar kerja efisiensi desain konsep A disusun seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Lembar Kerja Efisiensi Desain Konsep A

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kode Komponen	Jumlah	Kode Pemegangan	Kode Pemasangan	Kode Pemasangan	Kode Pemasangan	Waktu Operasi	Biaya Operasi	Estimasi Jumlah Komponen	Nama Perakitan	Keterangan
1.1	1	88	2.45	03.	3.5	5.95	18.921	1	Rangka Depan	Ditempatkan di Fixture
	27					359.8	1144.164	27		Sub Perakitan
1.2	1	88	1.95	06.	5.5	7.45	23.691	1	Rangka Belakang	Rakit
	16					210.68	669.9624	16		Sub Perakitan
1.3	2	00.	1.13	48	8.5	19.26	61.2468	2	Engsel Lipat	Baut
1.4	2	00.	1.13	48	8.5	19.26	61.2468	2	Pin Pengunci	Baut
1.5	4	00.	1.13	48	8.5	38.52	122.4936	4	Pengunci	Baut
	53					660.92*	2101.726*	53	Rangka	

*Waktu dan biaya yang dimaksud adalah biaya proses saja, tidak termasuk biaya material, alat, listrik, perawatan, dan setup machine.

Efisiensi desain perakitan dari konsep A:

$$E_{ma} = 53 \times \frac{3s}{660,92s} = 0,241$$

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan evaluasi dari konsep A yaitu:

- Jumlah komponen : 53
- Waktu perakitan : 660,92
- Biaya Perakitan : Rp 2101,72
- Efisiensi desain perakitan : 24,10 %

Berdasarkan kondisi pemegangan, perakitan pada rangka konsep A ini dapat dikatakan baik. Hal ini dibuktikan dengan hampir semua komponen dan sub komponen dapat dipegang dengan mudah, tanpa alat bantu. Semakin mudah komponen tersebut dipegang, semakin cepat waktu pemegangan yang dibutuhkan. Demikian pula untuk kondisi pemasangan, semakin sederhana jenis pemasangan komponen tersebut, semakin cepat waktu pemasangannya (Boothroyd dan Dewurst, 2002). Hal ini terbukti pada perhitungan waktu operasi perakitan rangka konsep A.

Waktu perakitan yang dibutuhkan sebesar 660,92 detik dan biaya perakitan yang dibutuhkan sebesar Rp 2101,72. Waktu dan biaya ini terbilang sangat kecil karena pada perhitungan efisiensi desain perakitan ini hanya meninjau dari waktu proses perakitannya saja, dengan mengabaikan biaya material, alat, elektroda las, biaya listrik, dan biaya perawatan serta setup machine. Biaya proses didapatkan dari fungsi waktu perakitan x upah kerja (Rp. 3,18/detik). Sehingga waktu dan biaya ini merupakan bilangan relatif yang digunakan untuk perbandingan waktu dan biaya antar konsep. Nilai efisiensi desain perakitan yang didapatkan sebesar 24,10%.

Konsep B

Dengan cara yang sama seperti langkah-langkah pada konsep A. Pada langkah awal dibuat deskripsi sub komponen meliputi α , β , jenis pemegangan, dan jenis pemasangan

disusun. Deskripsi sub komponen berguna untuk membantu menentukan waktu pemegangan dan pemasangan sub komponen tersebut. Lembar kerja efisiensi desain konsep B dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Lembar Kerja Efisiensi Desain Konsep B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kode Komponen	Jumlah	Kode Pemegangan	Kode Pemasangan	Kode Pemasangan	Kode Pemasangan	Waktu Operasi	Biaya Operasi	Estimasi Jumlah Komponen	Nama Perakitan	Keterangan
1.1	1	88	6.35	03.	3.5	9.85	31.323	1	Rangka Bawah	Ditempatkan di Fixture
	26					372.9	1185.82	26		Sub Perakitan
1.2	1	88	6.35	38	6	12.35	39.273	1	Rangka Atas	Baut
	8					110.6	351.708	8		Sub Perakitan
1.3	1	88	6.35	31	5	11.35	36.093	1	Rangka Belakang	Rakit
	13					180	572.452	13		Sub Perakitan
1.4	2	88	6.35	31	5	22.7	72.186	2	Hanger	Rakit
	5					64.6	205.428	5		Sub Perakitan
1.5	1	35	2.73	31	5	7.73	24.5814	1	Ekstensi Lipat	Rakit
	5					40.88	129.998	5		Sub Perakitan
1.6	1	35	2.73	92	5	7.73	24.5814	1	Rumahnya Pedal	Rakit
	2					16.58	52.7244	2		Sub Perakitan
	66					857.3	2726.15	66	Rangka	

*Waktu dan biaya yang dimaksud adalah biaya proses saja, tidak termasuk biaya material, alat, listrik, perawatan, dan setup machine.

Efisiensi Desain:

$$E_{ma} = 66 \times \frac{3s}{857,3s} = 0,2309$$

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan evaluasi dari konsep B yaitu:

- Jumlah komponen : 66
- Waktu perakitan : 857,3 s
- Biaya Perakitan : Rp 2726,15
- Efisiensi desain : 23,09 %

Berdasarkan hasil yang didapatkan, waktu perakitan yang dibutuhkan sebesar 857,3 detik dimana biaya perakitan yang dibutuhkan adalah Rp 2726,15. Waktu dan biaya ini terbilang kecil. Biaya proses didapatkan dari fungsi waktu perakitan x upah kerja (Rp. 3,18/detik). Nilai efisiensi desain perakitan yang didapatkan sebesar 23,09%. Nilai ini lebih kecil dibandingkan dengan nilai efisiensi desain perakitan konsep A. Hal ini dikarenakan karena terdapat perbedaan waktu perakitan dan jumlah komponen. Dengan jumlah komponen yang banyak maka semakin kecil nilai efisiensi desainnya (Boothroyd dan Dewurst, 2002). Hal ini semakin menguatkan pernyataan tersebut karena jumlah komponen konsep B lebih banyak daripada jumlah komponen pada konsep A.

Setelah melakukan perhitungan nilai efisiensi desain untuk masing-masing konsep sepeda, maka langkah penelitian dilanjutkan dengan analisa total keseluruhan hasil perhitungan efisiensi desain perakitan yang telah didapatkan. Tabulasi hasil total perhitungan efisiensi desain perakitan kedua konsep dapat dilihat pada Tabel 5.

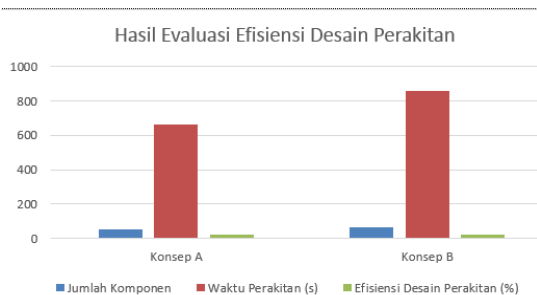
Tabel 5. Hasil Efisiensi Desain Perakitan Masing-masing Konsep

	Konsep A	Konsep B
Jumlah Komponen	53	66
Waktu Perakitan*	660,9 s	857,3 s
Efisiensi Desain Perakitan	24,10%	23,09 %

*Waktu dan biaya yang dimaksud adalah biaya proses saja, tidak termasuk biaya material, alat, listrik, perawatan, dan setup machine.



Diagram hasil evaluasi perakitan dapat dilihat pada gambar 9. Gambar 9 menunjukkan hubungan antara jumlah komponen dengan waktu perakitan dan efisiensi desain perakitan.



Gambar 9. Hasil Evaluasi Efisiensi Desain Perakitan

Berdasarkan *trendline* yang terjadi, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah komponen, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk merakit komponen tersebut. Namun, semakin besar waktu yang dibutuhkan, semakin kecil nilai efisiensi desain perakitannya. Hal ini terjadi karena semakin lama waktu yang dibutuhkan, semakin tidak efisien desain konsep tersebut ditinjau dari aspek perakitan. Berdasarkan hasil evaluasi efisiensi desain perakitan maka konsep A merupakan konsep yang paling efisien dibandingkan konsep lain.

Namun demikian ada faktor lain yang mempengaruhi waktu perakitan produk, yaitu kesulitan pemegangan dan pemasangan. Sebagai contoh, benda yang licin lebih sulit dipegang dibandingkan benda yang kasar. Semakin sulit benda itu dipegang maka semakin lama waktu yang dibutuhkan. Sama halnya dengan pemasangan, semakin banyak kesulitan yang terjadi ketika pemasangan maka semakin banyak waktu yang dibutuhkan untuk pemasangan. Artinya, sangatlah mungkin terjadi kasus, dimana waktu perakitan produk dengan komponen yang banyak lebih cepat daripada perakitan produk dengan komponen yang lebih sedikit, hal tersebut dapat terjadi jika tingkat kesulitan perakitan produk dengan komponen yang lebih sedikit lebih tinggi daripada perakitan produk dengan jumlah komponen yang lebih banyak.

Menurut, Boothroyd dan Dewurst (2002) bahwa error perhitungan waktu perakitan yang mungkin terjadi adalah 50% atau lebih. Hal ini dikarenakan kondisi perakitan ideal sangatlah jarang ditemui dalam kenyataan. Oleh karena itu waktu yang didapatkan pada perhitungan dengan menggunakan metode Boothroyd bukanlah waktu perakitan kenyataan di lapangan. Waktu yang didapatkan adalah waktu relatif yang digunakan untuk membandingkan rancangan satu produk dengan produk lainnya.

4. KESIMPULAN

Dari pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya, ada beberapa kesimpulan yang didapat dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Seluruh konsep rangka, yaitu 2 buah rangka sepeda yang dikembangkan dapat dimanufaktur. Estimasi waktu manufaktur yang dibutuhkan untuk konsep A adalah 254.78 menit sedangkan konsep B = 296.61 menit.
2. Jumlah masing-masing komponen konsep rangka sepeda pasca stroke berturut-turut; konsep A=53 buah sedangkan konsep B=66 buah. Dari evaluasi yang telah dilakukan, seluruh konsep sepeda pasca stroke dapat dirakit.

3. Dari perhitungan efisiensi desain perakitan yang telah dilakukan, Nilai efisiensi desain perakitan konsep A sebesar 24,10% sedangkan konsep B = 23,09%. Oleh karena itu atas aspek perakitan konsep A direkomendasikan untuk dipilih.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Setiawan, T. "Pengembangan Sepeda *Pasca Stroke*", Tesis Mahasiswa Pasca Sarjana Teknik Mesin, FTI-ITS, 2014.
- [2] Imama, A.C. "Evaluasi Rancangan Dalam Rangka Pengembangan Sepeda Pasca Stroke Berdasarkan Mekanisme Gerak, Ergonomi, dan Kekuatan Material Menggunakan Software Catia V5R20", Tugas Akhir Mahasiswa Teknik Mesin FTI-ITS, 2014.
- [3] Boothroyd, G., Dewhurst, P., dan Knight, W. "Product Design For Manufacture and Assembly. Second edition", Marcel Dekker, Inc, USA, 2002.
- [4] Batan, I.M.L., "Desain Produk", Guna Widya, Surabaya, 2012.
- [5] Bralla, J.G., "Design for Manufacturability Handbook. Second Edition", Mc-Graw-Hill book, New York, 1999.
- [6] Pollack, H.W., Tool Design, Second Editon, Prentice-Hall, Inc, 1988.

EVALUASI RANCANGAN DALAM RANGKA PENGEMBANGAN SEPEDA PASCA STROKE BERDASARKAN MEKANISME GERAK, ERGONOMI, DAN KEKUATAN MATERIAL MENGGUNAKAN SOFTWARE CATIA V5R20

Arifa Candrawati Imama¹⁾, I Made Londen Batan²⁾

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember^{1,2)}

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia^{1,2)}

E-mail : arifa.imama43@gmail.com¹⁾, londbatan@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

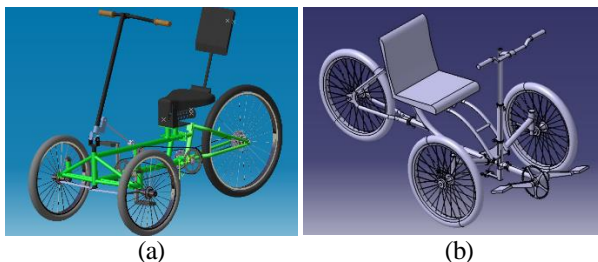
Untuk membantu penderita dari stroke yang berkepanjangan telah dirancang 2 (dua) konsep sepeda pasca stroke, sebuah sepeda yang dapat digunakan sebagai alat terapi fisik pasien pasca stroke. Untuk memilih salah satu dari 2 konsep sepeda tersebut, timbul permasalahan bagaimana menentukan konsep sepeda yang paling sesuai dengan kebutuhan. Untuk menyelesaikan masalah tersebut langkah-langkah penelitian dilakukan dimulai dengan menganalisa mekanisme gerak semua konsep sepeda terhadap gerak tubuh pemakai dan dikatakan baik apabila sepeda dapat digunakan oleh pengendara saat bergerak maju dan berbelok tanpa ada benturan antara pengendara dengan sepeda. Kedua, evaluasi resiko cedera pengendara (ergonomi), dilakukan dengan perhitungan RULA (Rapid Upper Limb Assessment) menggunakan software CATIA R5V20 dan dikatakan baik apabila nilai RULA yang didapat ≤ 3 . Setelah itu, dilakukan pemilihan konsep berdasarkan analisa yang telah dilakukan. Pada akhir penelitian dilakukan analisa kekuatan material pada rangka konsep terpilih menggunakan software CATIA V5R20 dan secara manual menggunakan teori kegagalan MSST. Rancangan rangka dikatakan aman apabila tegangan maksimal yang terjadi \leq tegangan ijin materialnya. Dari hasil analisa, konsep terpilih adalah konsep 1 yang menggunakan U-Joint untuk mentransmisikan gerakan tangan ke roda untuk berbelok dan untuk mengayuh. Bagian kemudi terletak pada dua roda depan dan bagian penggeraknya ada pada satu roda belakang. Konsep ini memiliki nilai RULA 2 saat bergerak maju, nilai 3 saat berbelok dan memiliki nilai tegangan maksimum 2.17 Mpa \leq Tegangan Ijin Materialnya 48 Mpa.

Kata kunci: sepeda pasca stroke, mekanisme gerak, ergonomis, kekuatan material, aman

1. PENDAHULUAN

Stroke merupakan gangguan fungsi saraf yang menyebabkan penurunan kesadaran, gangguan bicara, dan kelumpuhan anggota gerak, di mana bisa terjadi secara tiba-tiba akibat adanya gangguan peredaran darah di otak. Dengan jumlah penderita yang selalu meningkat tiap tahunnya, tentulah kepedulian dari semua pihak sangatlah penting untuk menurunkan angka cacat akibat stroke.

Sejalan dengan tujuan membantu menyembuhkan fisik penderita *pasca stroke*, telah dirancang sebuah sepeda roda tiga untuk penderita *pasca stroke* oleh Tri Andi (2014). Langkah awal dalam perancangan tersebut adalah membuat 2 buah konsep sepeda *Pasca Stroke* yang memiliki dimensi tertentu dan dapat dilipat sehingga lebih fleksibel dan dapat dimasukkan ke dalam bagasi mobil, kedua konsep sepeda *pasca stroke* tersebut seperti terlihat pada Gambar 1 (a) dan (b).



Gambar 1. (a) Konsep 1 (b) Konsep 2 Sepeda *Pasca Stroke* (Andi, 2014)

Selanjutnya 2 buah konsep dievaluasi untuk dipilih konsep yang paling sesuai untuk memenuhi kebutuhan penderita *pasca stroke*. Untuk memilih dua buah konsep tersebut, selain

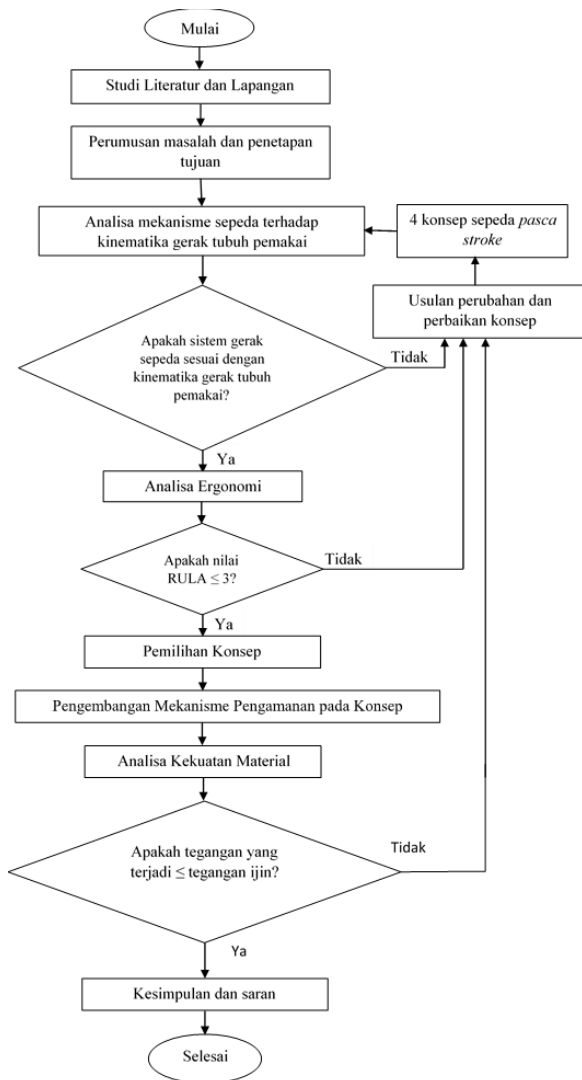
analisa kenyamanan (ergonomi) dan keamanan (kekuatan material) dibutuhkan analisa mekanisme gerak untuk memastikan bahwa konsep sepeda *pasca stroke* memenuhi syarat fungsional dan gerak bebas, artinya saat pengendara sepeda anggota tubuh pengendara tidak terjadi singgungan dengan bagian-bagian sepeda.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah konsep sepeda *Pasca Stroke* yang dibuat sistem geraknya sesuai dengan kinematika gerak tubuh pemakai, ergonomis, dan aman digunakan. Manfaat yang ingin didapatkan dalam penelitian ini adalah mengetahui kemampuan serta kegunaan yang bisa dicapai pada rancangan sepeda *Pasca Stroke* dan untuk kemajuan teknologi fisioterapis untuk membantu penderita *pasca stroke* dalam menyembuhkan penyakit stroke.

2. METODOLOGI

Langkah-langkah penelitian dilakukan mulai dengan menganalisa mekanisme gerak semua konsep sepeda terhadap gerak tubuh pemakai, dan dapat dikatakan baik apabila sepeda dapat digunakan oleh pengendara saat bergerak maju dan berbelok tanpa ada benturan antara pengendara dengan sepeda. Kedua, evaluasi resiko cedera pengendara (ergonomi), dilakukan dengan perhitungan RULA (Rapid Upper Limb Assessment) menggunakan software CATIA V5R20 dan dibandingkan dengan perhitungan dikatakan baik apabila nilai RULA yang didapat ≤ 3 . Setelah itu, dilakukan pemilihan konsep berdasarkan analisa yang telah dilakukan. Pada akhir penelitian dilakukan analisa kekuatan material pada rangka konsep terpilih menggunakan software CATIA V5R20 dan secara manual menggunakan teori kegagalan MSST dan dikatakan aman apabila tegangan maksimal yang

terjadi \leq tegangan ijin materialnya. Berikut adalah diagram alir penelitian yang dilakukan, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

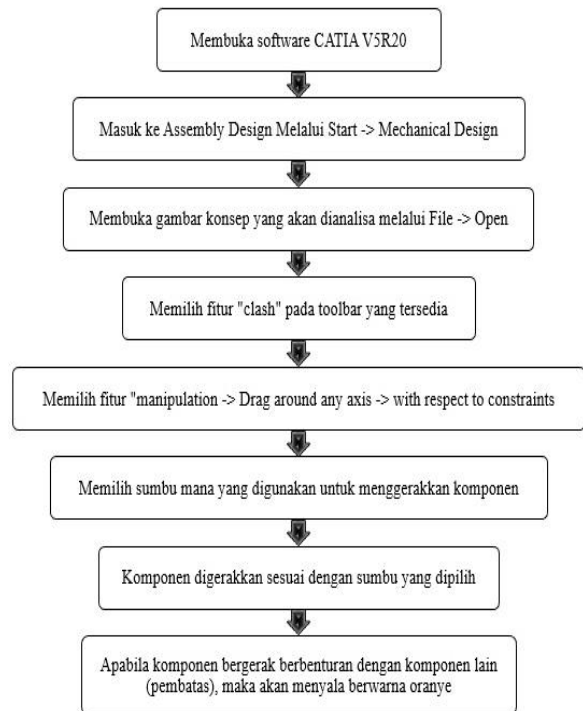
Analisa Mekanisme Gerak Sepeda Terhadap Gerak Anggota Tubuh Pemakai

Sebagai alat transportasi manusia, sepeda yang dirancang harus sesuai dengan dengan ukuran tubuh pengendaranya. Artinya semua gerakan yang terjadi akibat gerakan anggota tubuh manusia (pengendara) harus dievaluasi pada rancangan tersebut, apakah jangkauan kayuh oleh kaki pada pedal dan jangkauan pegang oleh tangan pada stang dapat dipenuhi oleh pengendara. Untuk menganalisa gerakan tubuh manusia dan komponen sepeda, dapat digunakan software CATIA V5R20 yaitu dengan mensimulasikan gerakan komponen sepeda yang diikuti oleh gerakan tubuh pengendara.

a) Gerakan Komponen Sepeda.

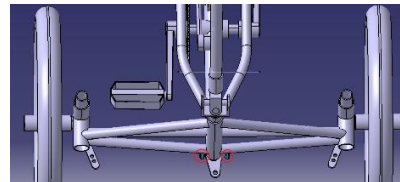
Posisi yang dianggap paling rentan terjadi benturan antara komponen sepeda dengan pengendara adalah ketika sepeda berbelok maksimal. Posisi rancangan sepeda ketika berbelok maksimal dapat diketahui dengan mensimulasikannya menggunakan software CATIA V5R20 dengan fitur "Clash".

Berikut merupakan langkah-langkah mensimulasikan posisi sepeda ketika digerakkan berbelok seperti terlihat pada Gambar 3.

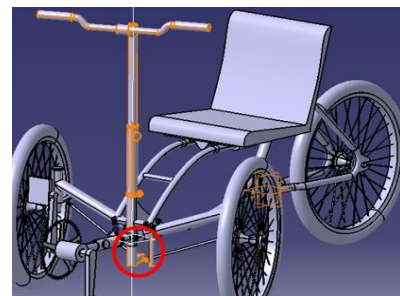


Gambar 3. Flowchart Simulasi Posisi Sepeda Menggunakan Fitur "clash" pada CATIA V5R20

Fitur "clash" ini berfungsi untuk memberhentikan manipulasi gerakan ketika terjadi benturan antara komponen. Gambar 4 dan 5 (lingkaran merah) merupakan komponen pembatas belokan sepeda.

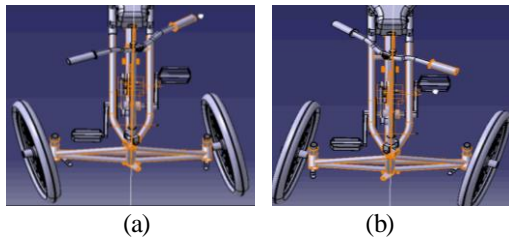


Gambar 4. Stopper untuk Belokan konsep 1 Sepeda Pasca Stroke

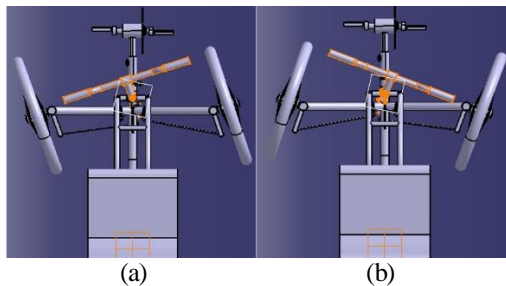


Gambar 5. Stopper untuk Belokan konsep 2 Sepeda Pasca Stroke

Sepeda dibelokkan ke kanan ataupun ke kiri, ketika komponen pembatas bersinggungan dengan komponen dari stang maka fitur *clash* ini akan membuat sepeda berhenti bergerak dan komponen yang bersinggungan menyala seperti Gambar 6 dan 7.



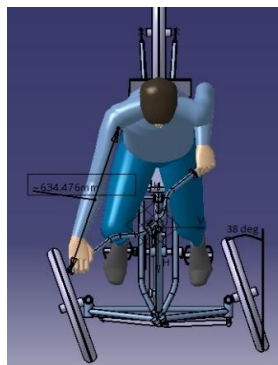
Gambar 6. Sepeda Konsep 1 saat berbelok maksimum (a) ke kiri dan (b) ke kanan



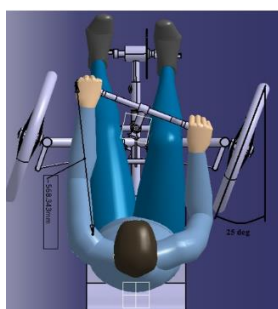
Gambar 7. Sepeda Konsep 2 saat berbelok maksimum (a) ke kiri dan (b) ke kanan

b) Gerakan Tubuh pengendara

Setelah posisi stang terjauh didapatkan, untuk mengetahui apakah saat sepeda berbelok maksimal tangan pengendara mampu meraih ujung stang terjauh atau tidak, maka pengendara dimodelkan dengan manekin orang asia yang memiliki panjang lengan rata-rata 578.9 mm akan dipasang pada sepeda yang berbelok maksimal. Ketika manekin dipasang ke sepeda yang berbelok maksimal akan didapatkan sudut belok maksimum sepeda dan posisi tangan terhadap ujung stang seperti pada Gambar 8 dan 9 (tampak atas).



Gambar 8. Sudut saat Berbelok Maksimum dan Panjang Jangkauan Terjauh dari Stang Konsep 1

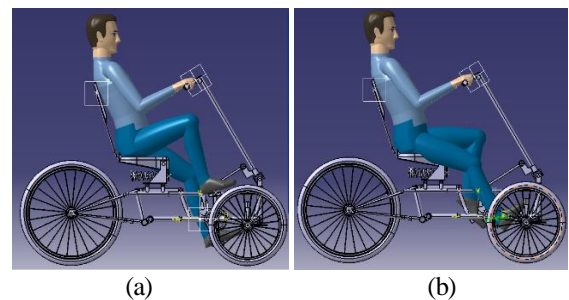


Gambar 9. Sudut saat Berbelok Maksimum dan Panjang Jangkauan Terjauh dari Stang Konsep 1

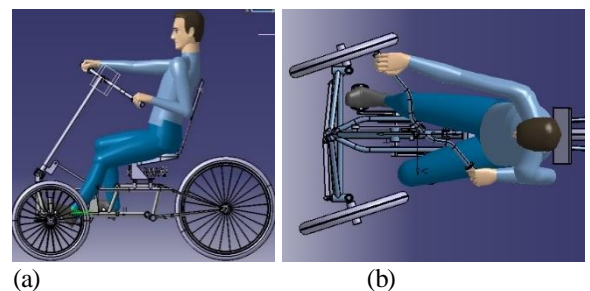
Dari analisa yang telah dilakukan, didapatkan nilai sudut belok maksimum sepeda konsep 1 dan 2 sebesar 38° dan 25° dengan panjang jangkauan tangan terhadap stang sebesar 634.476 mm dan 568.343 mm. Panjang jangkauan konsep 1 melebihi panjang tangan manekin yaitu 578.9mm. Hal ini menandakan bahwa saat berbelok maksimum, pengendara akan mengalami kesulitan dalam memegang ujung stang sepeda tetapi masih mampu meraih.

c) Gerakan Komponen Sepeda Terhadap Gerak Tubuh Pemakai

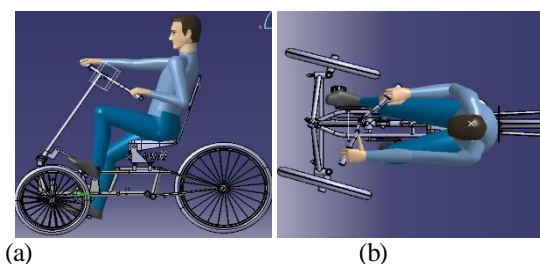
Setelah didapatkan hasil diatas, langkah selanjutnya adalah memasang manekin pada sepeda untuk mensimulasikan posisi tubuh pengendara saat mengendarai sepeda. Posisi – posisi yang disimulasikan adalah saat kayuhan mencapai titik-titik puncak, yaitu saat pedal berada pada posisi paling atas/bawah dan posisi paling depan/belakang terhadap bentuk kaki pemakai. Simulasi ini juga dilakukan dalam kondisi berbelok (belokan maksimal) yang berhubungan dengan kondisi tangan dan kaki pemakai. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa saat menggunakan sepeda pada posisi apapun tubuh pengendara tidak berbenturan dengan komponen sepeda.



Gambar 10. Simulasi Gerak Tubuh saat Posisi Kayuhan pada Titik Puncak (a) Atas/Bawah dan (b) Depan/Belakang konsep 1



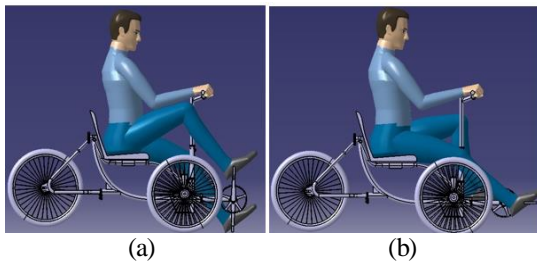
Gambar 11. Simulasi Gerak Tubuh saat Posisi Kayuhan di Titik Depan/Belakang dan Berbelok Maksimum (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas konsep 1



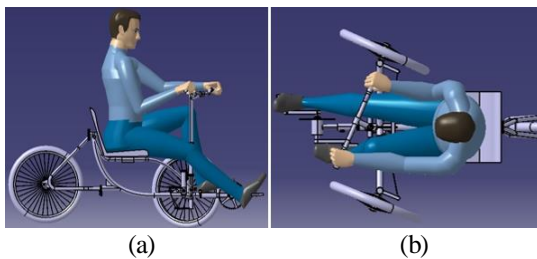
Gambar 12. Simulasi Kinematika Tubuh saat Posisi Kayuhan di Titik Atas/Bawah dan Berbelok Maksimum (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas konsep 1



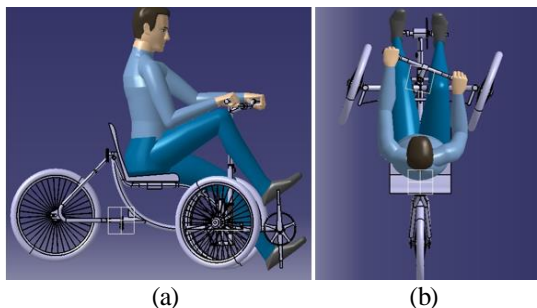
Dari Gambar 10, 11, dan 12 diatas, dapat dilihat secara visual bahwa dalam posisi apapun, pengendara dapat menggunakan sepeda konsep 1 ini dengan nyaman tanpa khawatir adanya benturan dengan komponen sepeda.



Gambar 13. Simulasi Gerak Tubuh saat Posisi Kayuhan pada Titik Puncak (a) Atas/Bawah dan (b) Depan/Belakang konsep 2



Gambar 14. Simulasi Gerak Tubuh saat Posisi Kayuhan di Titik Depan/Belakang dan Berbelok Maksimum (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas konsep 2



Gambar 15. Simulasi Kinematika Tubuh saat Posisi Kayuhan di Titik Atas/Bawah dan Berbelok Maksimum (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas konsep 2

Dari Gambar 13, 14, dan 15 diatas, dapat dilihat secara visual bahwa dalam posisi apapun, pengendara dapat menggunakan sepeda konsep 2 ini dengan nyaman tanpa adanya benturan dengan komponen sepeda.

Analisa Ergonomi (RULA)

Agar sepeda nyaman untuk digunakan, rancangan sepeda harus ergonomis atau memiliki nilai tingkat risiko cedera bagi pengendara yang minimum. Hal ini dapat diketahui dengan analisa ergonomi menggunakan metode RULA(Rapid Upper Limb Assessment) yang tersedia pada Software CATIA V5R20. Semakin kecil nilai RULA semakin ergonomis rancangan tersebut. Analisa ergonomi ini dilakukan pada posisi-posisi ekstrims tertentu saja, yaitu saat kayuhan mencapai titik-titik puncak, yaitu saat pedal berada pada posisi paling atas/bawah dan posisi paling depan/belakang terhadap bentuk kaki pemakai. Simulasi ini juga dilakukan

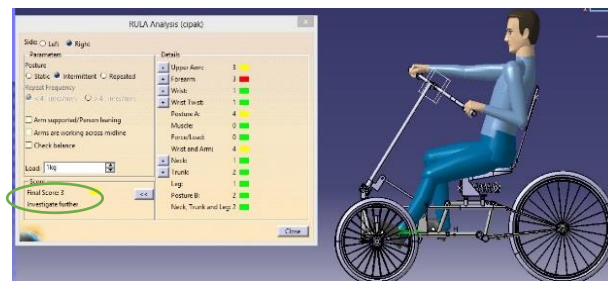
dalam kondisi sepeda bergerak lurus dan berbelok (belokan maksimal) yang berhubungan dengan kondisi tangan dan kaki pemakai. Berikut adalah hasil dari analisa ergonomi yang dilakukan.



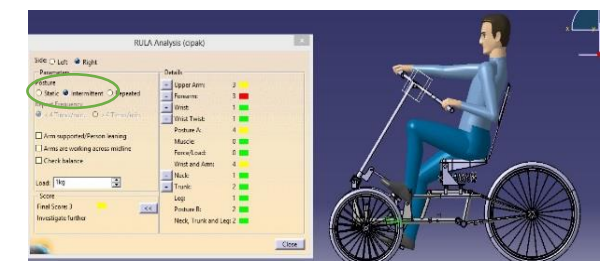
Gambar 16. Pengendara mengayuh dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling depan atau belakang pada konsep 1 memiliki nilai RULA 2



Gambar 17. Pengendara mengayuh dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling atas atau bawah pada konsep 1 memiliki nilai RULA 2

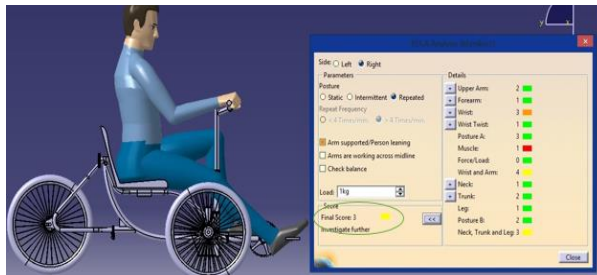


Gambar 18. Pengendara berbelok maksimal dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling depan atau belakang pada konsep 1 memiliki nilai RULA 3

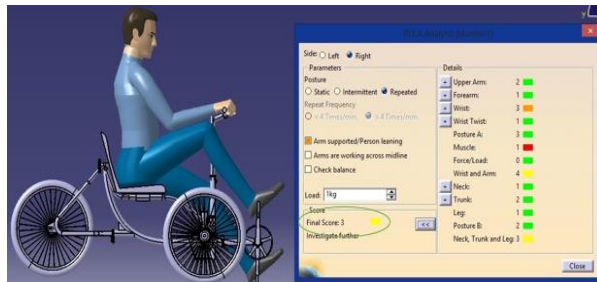


Gambar 19. Pengendara berbelok maksimal dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling atas atau bawah pada konsep 1 memiliki nilai RULA 3

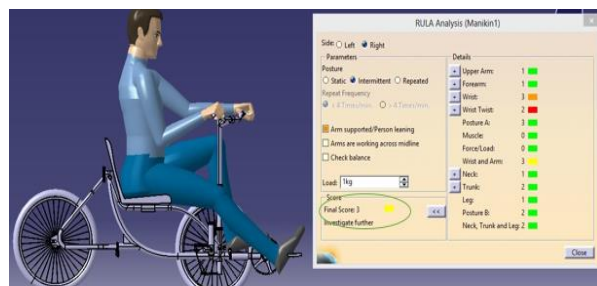
Dari Gambar 16, 17, 18, dan 19 diatas, dapat dikatakan bahwa konsep 1 ergonomis dan nyaman digunakan oleh pengendara karena memiliki nilai RULA ≤ 3 .



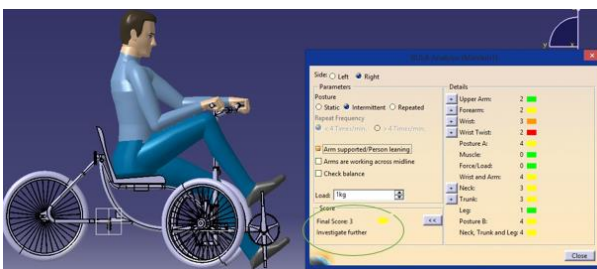
Gambar 20. Pengendara mengayuh dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling depan atau belakang pada konsep 2 memiliki nilai RULA 3



Gambar 21. Pengendara mengayuh dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling atas atau bawah pada konsep 2 memiliki nilai RULA 3



Gambar 22. Pengendara berbelok maksimal dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling depan atau belakang pada konsep 2 memiliki nilai RULA 3



Gambar 23. Pengendara berbelok maksimal dimana kaki dengan pedal sepeda pada posisi paling atas atau bawah pada konsep 2 memiliki nilai RULA 3

Dari Gambar 20, 21, 22, dan 23 diatas, dapat dikatakan bahwa konsep 2 ergonomis dan nyaman digunakan oleh pengendara karena memiliki nilai RULA ≤ 3 .

Pemilihan 4 Konsep Sepeda Pasca Stroke

Untuk memilih konsep terbaik, maka disusun sebuah model evaluasi bentuk dan ergonomi dari semua analisa dapat ditabelkan seperti berikut:

Tabel 1. Tabel Hasil Analisa pada Setiap Konsep

No.	Keterangan	Konsep Referensi	Konsep 1	Konsep 2
1.	<u>Mekanisme Gerak Sepeda</u>			
	Radius Belok (m)	2.9	1.74	2.2
2.	<u>Kinematika Anggota Tubuh</u>			
	Jangkauan Terjauh oleh Tangan pada Stang saat Belok Maksimal (mm)	564.681	634.476	568.343
3.	<u>Nilai RULA</u>			
	Saat posisi kayuhan diatas/bawah	2	2	3
	Saat posisi kayuhan didepan/belakang	2	2	3
	Saat berbelok maksimal dan posisi kayuhan diatas/bawah	3	3	3
	Saat berbelok maksimal dan posisi kayuhan didepan/belakang	3	3	3

Pemilihan konsep dilakukan dengan metode penilaian/ scoring berdasarkan kriteria seleksi sebagai berikut :

Tabel 2. Tabel *scoring* Pemilihan Konsep Sepeda pasca stroke

Kriteria Seleksi	Bobot (%)	Konsep Referensi		Konsep 1		Konsep 2	
		Rate	Bobot	Rate	Bobot	Rate	Bobot
Mekanisme Gerak Sepeda							
Radius Belok (m)	20	3	0.6	5	1	4	0.8
Kinematika Anggota Tubuh							
Jangkauan Terjauh oleh Tangan pada Stang saat Belok Maksimal (mm)	20	3	0.6	2	0.4	2	0.4
Nilai RULA							
Saat posisi kayuhan diatas/bawah	15	3	0.45	3	0.45	2	0.3
Saat posisi kayuhan didepan/belakang	15	3	0.45	3	0.45	2	0.3
Saat berbelok maksimal dan posisi kayuhan diatas/bawah	15	3	0.45	3	0.45	3	0.45
Saat berbelok maksimal dan posisi kayuhan didepan/belakang	15	3	0.45	3	0.45	3	0.45
Jumlah	100	3		3.2		2.7	
Ranking		4		1		2	
Respon				Terpilih			

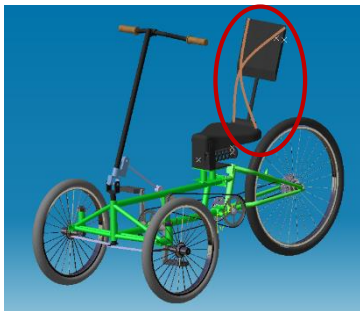
Keterangan :

- 1 = sangat kurang bagus dari konsep referensi
- 2 = kurang bagus dari konsep referensi
- 3 = sama dengan konsep referensi
- 4 = lebih bagus dari konsep referensi
- 5 = sangat lebih bagus dari konsep referensi

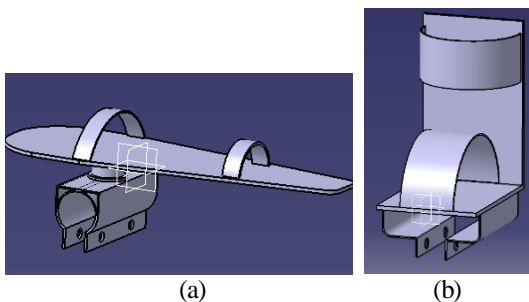
Dari pemilihan konsep yang telah dilakukan diatas, konsep sepeda *pasca stroke* yang terpilih adalah konsep 1. Selanjutnya akan dilakukan analisa kekuatan material rangka pada konsep terpilih.

Rancangan Pengamanan untuk Pasien *pasca stroke*

Konsep sepeda yang terpilih adalah konsep yang pertama seperti pada gambar 24 dibawah. Supaya pasien *pasca stroke* yang mengalami lumpuh sebagian anggota tubuh dapat menggunakan sepeda dengan aman dan nyaman maka dibutuhkan fitur pengamanan. Pengaman yang dibutuhkan adalah pengamanan untuk badan yaitu sabuk seperti gambar 24, pengaman tangan seperti gambar 25 a, dan pengaman kaki seperti terlihat pada Gambar 25b.



Gambar 24. Konsep Sepeda *Pasca stroke* yang Terpilih dengan Sabuk Pengaman



Gambar 25.(a) Pengaman Tangan (b) Pengaman Kaki

Pada pengaman kaki maupun pengaman tangan bagian bawah berupa lubang yang berfungsi sebagai tempat *bolt and nut* sehingga keduanya dapat dipasang dan dilepas di sisi kanan maupun kiri tergantung dimana posisi anggota tubuh pasien *pasca stroke* yang lumpuh.

Analisa Kekuatan Material pada Rangka Sepeda *Pasca Stroke*

Sepeda didesain agar dapat digunakan dengan aman, diperlukan analisa kekuatan material untuk memastikan bahwa rangka tersebut mampu menopang beban agar aman digunakan. Beban yang berpengaruh terhadap rangka adalah berat pengendara 100 kg dan berat rangka itu sendiri 18.8kg. Rangka menggunakan bahan St.45 dengan *yield strength* 240 MPa dan *ultimate strength* 415 MPa.

Analisa kekuatan material yang dilakukan pada rangka sepeda dengan material baja karbon (mild steel) yang memiliki sifat ulet (ductile) menggunakan Teori kegagalan Maximum Shear Stress Theory (MSST) karena teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi bila tegangan geser

maksimum yang terjadi, melewati harga tegangan geser yang diijinkan pada material.

Dalam pemakaian, sepeda kemungkinan melewati jalan bergelombang. Dalam kondisi tersebut, beban yang dialami akan berfluktuasi sehingga rangka mengalami beban dinamis. Untuk beban dinamis menggunakan *safety factor* 2,5. Metode perhitungan menggunakan konsep statika struktur metode sambungan, kemudian hasil akan dibandingkan dengan hasil analisa menggunakan *software* CATIA V5R20.

Analisa Kekuatan Material Menggunakan CATIA V5R20

Syarat keamanan desain untuk *ductile material* adalah:

$$\sigma_d \text{ maksimum} \leq \frac{S_y}{N}$$

Dimana:

S_y = Tegangan luluh (*yield strength*)

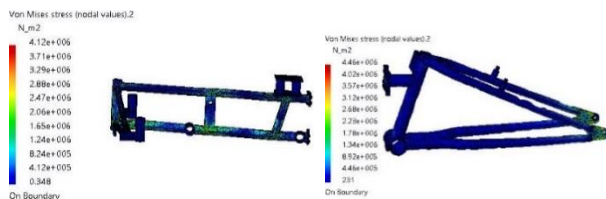
N = Faktor Keamanan

$\sigma_d \text{ maksimum}$ = Tegangan desain maksimum yang terjadi

$$\sigma_d \text{ maks} = \frac{240 \text{ MPa}}{2.5}$$

$$\sigma_d \text{ maks} = 96 \text{ MPa}$$

Analisa *software* untuk tegangan yang terjadi pada desain rangka sepeda *pasca stroke*, seperti ditunjukkan Gambar 26



Gambar 26. Hasil analisa tegangan Von Mises

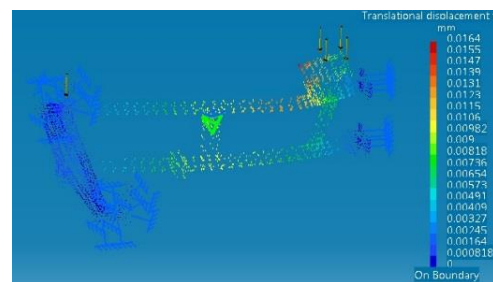
Nilai tegangan pada rangka desain akibat beban P yang didapatkan dari analisa *software* adalah 4.46 MPa, sedangkan tegangan ijin material adalah 96 Mpa, sehingga rancangan desain aman.

Selanjutnya adalah analisa regangan yang terjadi pada rangka desain. Hubungan tegangan-regangan digunakan sebagai pembanding atas regangan dan defleksi yang terjadi. Dari hasil perhitungan untuk nilai regangan dan defleksi maksimal yang diijinkan:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$240 = 210 \times 10^3 \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{240}{210 \times 10^3} = 1.143 \times 10^{-3}$$



Gambar 27. Hasil analisa regangan

Dari hasil analisa *software* pada Gambar 27, didapatkan regangan $1.64 \times 10^{-5} \text{ m} < 1.143 \times 10^{-3} \text{ m}$, sehingga nilai tersebut lebih kecil daripada regangan ijin yang diberikan dan dapat dikatakan aman.

4. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari pembahasan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dari semua (4) konsep sepeda *pasca stroke* yang baru dapat digunakan oleh penderita *pasca stroke*. Artinya ketika mengendarai sepeda, anggota tubuh pengendara tidak bersinggungan (clash) dengan komponen sepeda.
2. Dari 4 konsep sepeda *pasca stroke* yang baru ergonomis dengan nilai $RULA \leq 3$.
3. Dari semua konsep sepeda *pasca stroke* yang baru, konsep 1 terpilih berdasarkan analisa mekanisme gerak dan analisa ergonominya. Dari analisa tegangan, konsep 1 dapat dikatakan aman, karena memiliki tegangan maksimum 2.17Mpa yang lebih kecil dari tegangan ijin materialnya yaitu 48 MPa.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Agus. 2013. SEPEDA RODA 3 (TRIKE RECUMBENT), URL: <http://3abike.com/sepeda-roda-3-trike-recumbent/>
- [2] Anke, H., Snijders, and Bastiaan R.B. 2010. Theracycle-100, <URL: <http://theracycle.com/model/Theracycle-100.aspx>>
- [3] Batan, I.M.L. 2012. Desain Produk. Surabaya: Guna Widya.
- [4] Franklin, J.H. 1985. Fundamentals of Mathematics. Chicago: University of Chicago Press.
- [5] Gere, J dan Goodno, B. 2012. Mechanics of Materials. Canada: Cengage Learning.
- [6] Hibbeler, R.C. 2008. Mechanics of Materials. New York: Pearson - Prentice Hall.
- [7] Meriam, J.L dan Kraige, L.G. 1994. Mekanika Teknik. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- [8] Nurmianto, E. 2004. Ergonomi Konsep Dasar dan Aplikasinya. Surabaya: Guna Widya.
- [9] Rachmawati, E. 2010. Atasi Stroke dg Tanaman Obat. Jakarta: Penebar Swadaya.
- [10] Wahyu, G.G. 2009. Stroke Hanya Menyerang Orang Tua?. Jakarta: B-First.
- [11] Wikipedia. 2008. Recumbent Bike, URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Recumbent_bicycle



ANALISIS TINGKAT PERFORMANCE MESIN INJECTION PADA PT XYZ DENGAN METODE OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE)

Hana Catur Wahyuni, Setiawan

Prodi Teknik Industri- Fakultas Teknik- Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Jl Raya Gelam 250 Candi- Sidoarjo

Telp: (031)8051771- Fax: (031)8945333

Email: hanacatur@yahoo.co.id

ABSTRAK

Mesin merupakan salah satu alat produksi yang sangat penting dalam proses operasi suatu perusahaan. Kondisi (performance) mesin yang baik akan menghasilkan output produksi yang berkualitas sehingga mampu meningkatkan produktivitas perusahaan. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis terhadap tingkat performance agar mesin dapat berfungsi dengan optimal. Obyek penelitian adalah mesin di area injection PT XYZ. Dimana PT XYZ adalah perusahaan yang bergerak dalam bidang manufaktur dengan produk utamanya adalah sepatu. Selama ini perusahaan dihadapkan permasalahan bagaimana melakukan analisis terhadap performance mesin sehingga dapat melakukan perencanaan terkait dengan sistem perawatan mesin. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan metode overall equipment effectiveness (OEE) dan bertujuan untuk mengetahui kondisi mesin serta mencari akar permasalahan yang selama ini menghambat optimisasi penggunaan mesin. Hasil penelitian berdasarkan metode OEE menunjukkan bahwa nilai rata-rata untuk Availability ratio 72,98%; Performance ratio 74,17%; Quality ratio 98,92%; Nilai OEE 53,79%. Permasalahan yang selama ini menghambat optimalisasi mesin adalah tingginya kerugian yang disebabkan oleh breakdown sehingga menyebabkan rendahnya tingkat produktivitas yang dicapai oleh injection machine. Jadi yang menjadi prioritas untuk dilakukan perbaikan adalah mengurangi breakdown pada mesin injection.

Kata kunci: performance, availability ratio, performance ratio, quality ratio, breakdown.

1. PENDAHULUAN

Proses produksi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan oleh perusahaan dalam menghasilkan suatu produk. Selain itu, kelancaran proses produksi sangat berperan dalam menghasilkan produk yang berkualitas. Ketersediaan mesin yang baik merupakan salah satu pendukung kelancaran proses produksi. Oleh karena itu, mesin perlu mendapat perhatian khusus dari perusahaan dengan cara menjaga utilitasnya dengan selalu melakukan perawatan. Tetapi, dalam prakteknya seringkali perawatan yang dilakukan bersifat pemborosan karena tidak mampu menyelesaikan dari akar masalahnya. Kondisi seperti ini sering dijumpai dalam banyak perusahaan, akibatnya kerusakan masih selalu terjadi, sementara perusahaan selalu mengeluarkan biaya perawatan dalam operasionalnya.

PT XYZ merupakan salah satu perusahaan sepatu yang berorientasi ekspor dan terletak di wilayah Kabupaten Sidoarjo. Sebagai perusahaan yang mengeksport 90% produknya, dituntut untuk menghasilkan produk dengan kualitas tinggi. Tetapi, pada kenyataannya, PT XYZ sering menerima keluhan pelanggan terkait dengan kualitas produk yang dihasilkan. Kondisi ini terjadi karena kurang lancarnya aliran produksi akibat dari kerusakan yang sering terjadi pada beberapa mesin di area injection. Selain ini, mesin- mesin di area injection ini mempunyai nilai downtime paling tinggi dibandingkan dengan mesin di area yang lainnya.

Oleh karena itu perlu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi mesin serta mencari akar permasalahan yang selama ini menghambat optimisasi penggunaan mesin. Salah satu metode yang sesuai untuk mencapai tujuan penelitian tersebut adalah dengan metode overall equipment effectiveness (OEE), karena dapat melakukan pengukuran tingkat efektifitas mesin dengan didasarkan pada pengukuran tiga rasio utama, yaitu availability ratio, performance ratio,

dan quality ratio dengan menghapus six big losses terdiri dari: breakdown losses (kerugian waktu akibat penurunan produktivitas dan kualitas), set-up/adjustment time losses, idling and minor stop losses, reduced speed losses, reduced yield, quality defect and rework (Najima dalam Hapsari dkk, 2012).

Metode OEE mampu memberikan informasi seberapa efektif mesin dapat menjalankan tugasnya, sehingga dapat dilakukan perbaikan yang berkelanjutan (continuous improvement) dalam rangka peningkatan kinerja mesin (Betrianis dkk, 2005). Metode ini merupakan bagian utama dari sistem pemeliharaan yang banyak diterapkan oleh perusahaan Jepang, yaitu Total Productive Maintenance (TPM) (Rahmad, dkk, 2012). OEE merupakan metodologi yang menggabungkan metrik dari semua peralatan manufaktur menjadi pedoman untuk sistem pengukuran yang membantu manufaktur dan operasi tim dalam meningkatkan kinerja mesin, peralatan untuk mengurangi mesin dan peralatan cost of ownership (COO) (Malik dkk, 2013).

2. METODE PENELITIAN

Lokasi pengambilan data penelitian dilakukan pada area injection PT XYZ melalui metode wawancara, observasi dan dokumentasi. Pengolahan data dengan metode OEE dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- Menentukan Availability Ratio, dengan persamaan :

$$Availability = \frac{Operation\ time}{Loading\ time} = \frac{Loading\ time - Downtime}{Loading\ time}$$
- Menentukan Performance Ratio, dengan persamaan:

$$Performance\ rate = \frac{Amount \times Theoretical\ cycle\ time}{Operation\ time}$$
- Menentukan Quality Ratio, dengan persamaan:

$$Quality\ rate = \frac{Processed\ amount - Defect\ amount}{Processed\ amount}$$
- Menentukan nilai OEE dengan persamaan:



$$OEE (\%) = Availability (\%) \times Performance Rate (\%) \times Quality Rate (\%)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperlukan dalam proses perhitungan OEE pada area injection PT XYZ adalah data *downtime* mesin, *changeovers*, *minor stoppages*, *quality defect*, dan data *production time* serta *output* untuk periode minggu ke 2 s/d minggu ke 13. Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan metode OEE sebagai berikut:

Penghitungan Availability Ratio

Availability ratio merupakan suatu rasio dari waktu proses produksi tentang jumlah waktu total yang tersedia yang digunakan untuk proses produksi dikurangi dengan waktu kerusakan mesin yang menghambat proses produksi. Dalam hal ini, *downtime* meliputi: *breakdown*, *changeovers*, *minor stoppages* and *set up adjustment*. Perhitungan *availability ratio* sebagaimana pada penjelasan sebelumnya.

Penghitungan Performance Rate

Merupakan suatu *ratio* yang menggambarkan kemampuan dari peralatan dalam menghasilkan produk atau barang. Dalam hal ini, kita harus mengetahui dulu nilai-nilai dari *cycle time* yang diperoleh dari:

$$Cycle\ time = \frac{Availability\ ratio \times Production\ time}{Output}$$

Sehingga diperoleh :

$$Performance\ Ratio = \frac{Output \times Ideal\ cycle\ time}{Operation\ time}$$

Penghitungan Quality Ratio

Merupakan suatu rasio yang menggambarkan kemampuan peralatan dalam menghasilkan produk yang sesuai dengan *standard*. Formula yang digunakan untuk pengukuran rasio sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

Penghitungan Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Nilai OEE diperoleh dengan mengalikan ketiga rasio utama tersebut. Secara matematis formula pengukuran nilai OEE adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} OEE (\%) &= Availability (\%) \times Performance Rate (\%) \times Quality Rate (\%) \\ &= 74,50\% \times 71,17\% \times 99,03\% \\ &= 52,51\% \end{aligned}$$

Dari hasil penghitungan tersebut menunjukkan bahwa nilai OEE pada mesin *injection* adalah 52,51 %. Hal itu berarti bahwa nilai dari ketiga *ratio* yaitu *availability ratio*, *performance ratio* dan *quality ratio* tersebut masih berada dibawah nilai *standard* OEE dengan *standard world class* yaitu 85 % atau lebih. Sehingga dalam hal ini, *performance* mesin *injection* masih perlu untuk dilakukan *improvement* dalam meningkatkan nilai *performance rationya*. Setelah melakukan penghitungan dengan menggunakan metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), maka kita perlu melakukan suatu analisa untuk mengetahui tingkat produktivitas dari *injection machine* dalam periode minggu ke 02 sampai dengan minggu ke 13. Hasil penghitungan selengkapnya dan perbandingan antara hasil penghitungan dengan *standard international* sebagaimana dalam Tabel 1.

Tabel 1. OEE Mesin *Injection* Periode Minggu Ke 02 – 13

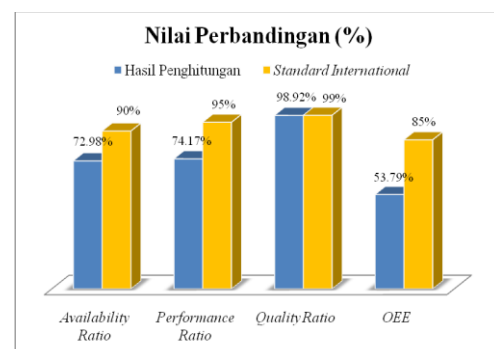
Minggu Ke	Availability Ratio	Performance Ratio	Quality Ratio	OEE
2	74,50%	71,17%	99,03%	52,51%
3	82,30%	73,28%	99,18%	59,82%
4	64,88%	68,45%	98,96%	43,95%
5	73,52%	76,27%	99,01%	55,52%
6	81,85%	74,98%	99,32%	60,95%
7	69,31%	75,52%	98,80%	51,71%
8	77,40%	83,11%	98,68%	63,47%
9	64,88%	46,79%	97,74%	29,67%
10	71,27%	79,17%	99,12%	55,93%
11	69,33%	83,26%	99,06%	57,18%
12	72,99%	75,60%	98,77%	54,50%
13	73,58%	82,41%	99,37%	60,26%
Average	72,98%	74,17%	98,92%	53,79%
Standard International	90%	95%	99%	85%

Dari hasil penghitungan tersebut menunjukkan bahwa *availability ratio* pada mesin *injection* adalah 74,50%. Nilai *ratio* tersebut menunjukkan bahwa nilai rasio antara *production time* dengan *downtime* yang terjadi selama proses produksi masih dalam kondisi yang kurang baik dikarenakan nilai *downtime* yang terlalu tinggi. Hal tersebut didukung oleh adanya nilai *standard availability ratio* dengan *standard world class* yaitu 90% atau lebih. Jadi dalam hal ini, mesin *injection* masih perlu untuk dilakukan *improvement* dalam meningkatkan nilai *availability rationya*.

Dari hasil penghitungan tersebut menunjukkan bahwa *performance ratio* pada mesin *injection* adalah 71,17%. Nilai *ratio* tersebut menunjukkan bahwa nilai rasio antara *output* yang dihasilkan dengan *cycle time* yang terjadi selama proses produksi masih dalam kondisi yang terlalu lama dikarenakan nilai *cycle time* yang terlalu tinggi sehingga waktu yang diperlukan dalam proses produksi menjadi semakin lama.

Jika nilai tersebut dibandingkan dengan nilai *standard performance ratio* dengan *standard world class* yaitu 95 % atau lebih, maka nilai *ratio* tersebut masih jauh dibawahnya. Jadi dalam hal ini, *performance* mesin *injection* masih perlu untuk dilakukan *improvement* dalam meningkatkan nilai *performance rationya*.

Dari hasil penghitungan tersebut menunjukkan bahwa *quality ratio* pada mesin *injection* adalah 98,93%. Hal itu berarti bahwa kemampuan mesin untuk menghasilkan produk yang sesuai dengan *standard* kualitas sudah cukup baik meskipun nilai tersebut masih lebih rendah apabila dibandingkan dengan nilai *standard quality ratio* dengan *standard world class* yaitu 99% atau lebih.



Gambar 1. Perbandingan Antara Hasil Penghitungan dengan *Standard International*

Dari Gambar 1 dapat diambil suatu kesimpulan bahwa tingkat produktivitas dari mesin *injection* secara umum masih berada dalam posisi yang jauh dari *standard international*. Sehingga perlu untuk dilakukan *improvement* untuk mencapai *standard* produktivitas yang ideal.

Dari Tabel 1 diatas diketahui bahwa tingkat OEE paling rendah terjadi pada minggu ke 09 yaitu bernilai 29,67%. Hal itu dikarenakan oleh:

- ✓ Jumlah *production time* yang rendah yaitu 6382 menit dengan *output* yang cukup rendah pula yaitu 9350pairs dengan nilai *downtime* yang meliputi nilai *breakdown* 1461,60 dengan tingkat *changeover* 502,64 dan *minor stoppages* 277,27 dengan total keseluruhan adalah 2241,51 menit.
- ✓ Rendahnya output yang diperoleh yaitu 6382 pairs dikarenakan tingginya nilai *breakdown* yaitu 22,90%. Sehingga menyebabkan *output* yang hilang juga semakin tinggi yaitu 3301pairs.

Dari tabel diatas juga dapat diketahui bahwa tingkat OEE paling tinggi terjadi pada minggu ke 08 yaitu bernilai 63,47 %. Hal itu dikarenakan oleh:

- ✓ Memiliki nilai *downtime* yang cukup rendah dimana nilai *downtime* tersebut meliputi nilai *breakdown* 1098,59 dengan tingkat *changeover* 439,44 dan *minor stoppages* 285,70 dengan total keseluruhan adalah 1823,73 menit.
- ✓ *Production time* yang tersedia adalah 8520 menit dengan nilai *reduce speed ratio* yang cukup rendah yaitu 25,49% yang menyebabkan *output* yang hilangpun juga semakin sedikit yaitu 4841 pairs.

4. KESIMPULAN

1. Tingkat performance mesin di area *injection* dalam periode week 02-13 dengan menggunakan metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) diperoleh nilai rata-rata untuk *Availability ratio* 72,98%; *Performance ratio* 74,17%; *Quality ratio* 98,92%; Nilai OEE 53,79%.
2. Penyebab utama untuk mesin adalah tingginya kerugian yang disebabkan oleh *breakdown* menyebabkan rendahnya tingkat produktivitas yang dicapai oleh *injection machine*. Jadi yang menjadi prioritas untuk dilakukan perbaikan adalah mengurangi *breakdown* pada mesin *injection*

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Betrianis, Suhendra R, *Pengukuran Nilai Overall Equipment Effectiveness Sebagai Dasar Perbaikan Proses Manufaktur Pada Lini Produksi*, Jurnal Teknik Industri, Vol 7 No 2, 2005, Desember, hal 91-100.
- [2] Hapsari N, Amar K, Perdana Y, *Pengukuran Efektifitas Mesin Dengan Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) Di PT Setiaji Mandiri*, Jurnal Spektrum Industri, Vol 1 No 1, 2012.
- [3] Malik N, Hamsal M, *Pengukuran Kinerja Operasional Melalui Implementasi Total Productive Maintenance Di PT XYZ*, Journal of Business and Entrepreneurship, Vol 1 No 2, Mei, 2013, hal 1-20.
- [4] Rahmad, Pratikno, Wahyudi, *Penerapan Overall Equipment Effectiveness Dalam Implementasi Total Maintenance Productive (TPM) (Studi Kasus Di Pabrik Gula PT Y)*, Jurnal Rekayasa Mesin, Vol 3 No 3, 2012, hal 431- 437.



STUDI LAPISAN PELINDUNG PADA KOMPOSIT PLASTIK-KARET TERHADAP KETAHANAN PEMAPARAN CUACA

Heru Sukanto¹⁾, Kresna Nurhadewa²⁾, Wijang Wisnu Raharjo¹⁾

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret Surakarta

²⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret Surakarta

Prodi Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta

Jalan Ir. Sutami 36A Surakarta 57126

Phone: 0271 632163

Email : masheher@uns.ac.id¹⁾, k.nurhadewa@gmail.com²⁾, m_asyain@yahoo.com¹⁾

ABSTRAK

Penelitian ini menguji beberapa jenis material yang bisa dipakai sebagai bahan pelapis pelindung yaitu cat minyak, waterproof, resin unsaturated polyester, dan resin repxoxy. Komposit polypropylene (PP)-karet yang terpapar sinar matahari secara terus menerus akan mengalami penurunan kekuatan mekanis. Proses pembuatan komposit menggunakan metode pressured sintering. Bentuk dan ukuran spesimen sesuai standar ASTM D790. Proses pemaparan cuaca berlangsung selama 3 bulan mengacu pada standar ASTM D1435. Pengujian spesimen meliputi uji foto makro, uji bending, dan uji foto SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit PP-karet mengalami degradasi perubahan warna hingga terbentuk retakan setelah proses pemaparan. Komposit PP-karet dengan lapisan pelindung hanya mengalami perubahan warna. Kekuatan bending komposit PP-karet mengalami penurunan setelah proses pemaparan. Kekuatan bending komposit mengalami penurunan sebanding dengan lama waktu pemaparan. Selama proses pemaparan 3 bulan, komposit yang lebih stabil kekuatan bendingnya adalah waterproof dengan kekuatan bending sebelum pemaparan sebesar 13,873 MPa dan setelah pemaparan sebesar 10,254 MPa. Komposit yang paling tinggi kekuatan bendingnya adalah unsaturated polyester dengan kekuatan bending sebelum pemaparan sebesar 16,283 MPa dan setelah pemaparan sebesar 11,292 MPa. Hasil pengamatan SEM pada patahan uji bending menunjukkan ikatan antara plastik dan karet mulai terlepas akibat pengaruh fotodegradasi mulai bulan pertama.

Kata kunci: polypropylene, karet, pelapisan, pemaparan cuaca, dan uji bending.

1. PENDAHULUAN

Polypropylene (PP) dan High-density polyethylene (HDPE) merupakan komoditas dari thermoplastic yang digunakan pada aplikasi industri maupun rumah tangga. Sampah dari jenis plastik PP mempunyai sumbangan 2,64% sedangkan HDPE mempunyai sumbangan 3,97% dalam sampah perkotaan. Plastik PP digunakan untuk produk plastik yang mempunyai daya regang tinggi seperti *blister* (bungkus *snack*) dan kantung plastik [1].

Plastik yang sering digunakan baik di dalam maupun di luar ruangan terbuka dan berhubungan langsung dengan sinar matahari dalam jangka waktu yang lama, dapat memberikan efek yang merugikan bagi produk plastik tersebut. Radiasi *ultra violet* dapat memutuskan ikatan kimia dalam polimer. Proses ini disebut *fotodegradasi* yang pada akhirnya menyebabkan keretakan, pengapuran, perubahan warna, dan menurunnya sifat-sifat fisik tertentu [2].

Jenis limbah yang seringkali menimbulkan masalah selain plastik ialah ban bekas. Volume limbah ban kendaraan di Indonesia dari tahun ke tahun mengalami peningkatan seiring dengan pertambahan jumlah kendaraan bermotor. Pembuangan limbah ban bekas ke lingkungan dapat menyebabkan polusi lingkungan karena ban tidak terurai secara biologis dalam tanah dan dapat menimbulkan penyakit [3].

Berdasarkan uraian di atas dapat diambil suatu kesimpulan bahwa penting dilakukan pemanfaatan limbah plastik dan karet sehingga diharapkan limbah memiliki nilai ekonomi yang tinggi. Pemanfaatan plastik dan karet salah satunya dengan dibuat komposit dari campuran plastik PP dan karet ban bekas dengan metode *sintering* dan diberi lapisan pelindung agar tahan terhadap *fotodegradasi*.

2. METODOLOGI

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi serbuk plastik PP (massa jenis: 0,91 g cm⁻³, titik cair: 175°C) yang diperoleh melalui proses *crushing*, serbuk karet (massa jenis: 1,1 g cm⁻³), dan lapisan pelindung dengan warna putih. Bahan pelapis pelindung yang digunakan meliputi cat minyak (bahan dasar *polyurethane*), cat *waterproof* (bahan dasar *polyurethane*), resin *unsaturated polyester* (tipe BQTN-157) dan resin *repxoxy* (tipe R-802).

Pembuatan Komposit

Serbuk plastik PP dan serbuk karet disaring dengan ukuran mesh 20 dan dicampur dengan perbandingan 70:30 menggunakan metode difusi pada wadah yang berbentuk silinder agar seragam. Pada proses *mixing*, ditambahkan 5% volume bola baja untuk menguraikan aglomerasi pada serbuk karet.

Proses pembuatan spesimen berlangsung dalam suhu 135°C dengan tekanan 8 bar selama 20 menit. Proses *coating* ialah proses pelapisan spesimen dengan cara *spray* menggunakan cat minyak, cat *waterproof*, resin *repxoxy*, dan resin *unsaturated polyester* masing-masing berjumlah 5 spesimen setiap jenis pelapis.

Pemaparan Cuaca

Proses pemaparan (*weathering test*) berlangsung selama 3 bulan. Proses pemaparan menggunakan standar ASTM D1435 [4].

Pengamatan Image

Foto makro dilakukan untuk mengetahui perbedaan kondisi permukaan spesimen akibat lapisan. Foto SEM digunakan untuk menganalisa morfologi komposit PP-karet setelah proses paparan dan untuk melihat penampang patah komposit.

Uji Bending

Uji bending menggunakan metode *three point bending* dengan mengacu pada standar ASTM D790 [5].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Cuaca

Komposit PP-karet dipaparkan pada alam dalam rentang bulan Desember- Februari. Berikut data klimatologi selama proses paparan cuaca berlangsung.

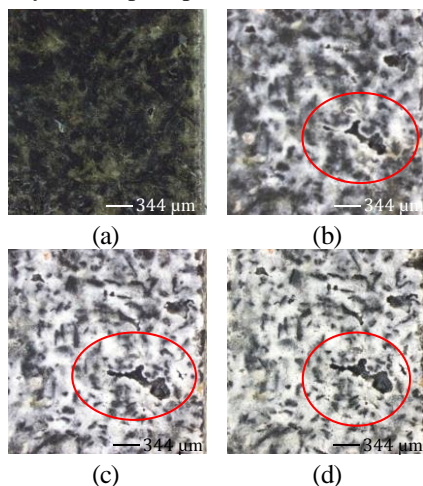
Tabel 1 memperlihatkan bahwa selama proses paparan cuaca suhu udara rata-rata tiap bulan tidak mengalami perubahan yang signifikan sehingga spesimen komposit yang diuji menerima suhu yang hampir sama.

Tabel 1. Rata-rata cuaca bulanan

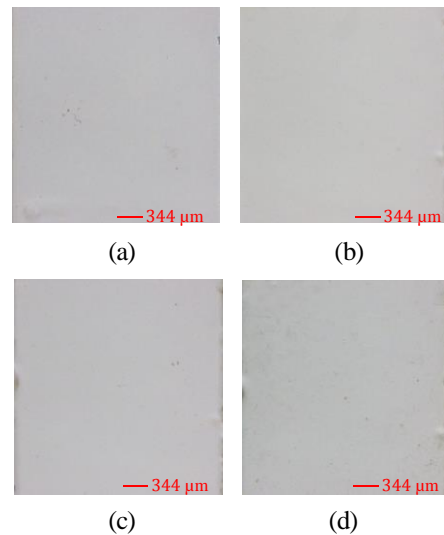
Bulan	Suhu Udara (°C)	Kelembaban Udara (%)	Penyinaran (%)
	Rata-rata	Rata-rata	Rata-rata
Desember	26,8	82,9	76,2
Januari	26,6	83,1	66,7
Februari	27,5	80,4	85,4

Karakteristik Permukaan

Hasil pengamatan foto makro pada Gambar 1 menunjukkan kondisi komposit PP-karet tanpa pelapisan sebelum menerima paparan cuaca (bulan ke-0) berwarna hitam dengan permukaan bidang rata dan halus. Pemudaran warna mulai terjadi pada bulan ke-1 dan terbentuk celah/retakan. Keretakan akan membesar hingga bulan 3 dan warna komposit pada permukaan yang terkena paparan secara langsung akan semakin memudar. Komposit PP mengalami penurunan parameter kekasaran setelah terjadi degradasi ultraviolet dan kekakuan komposit akan meningkat dengan bertambahnya waktu paparan [6].



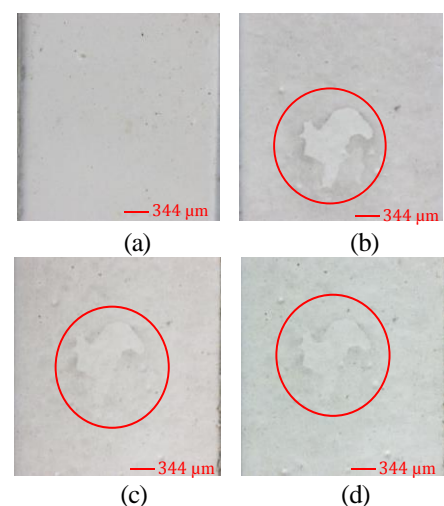
Gambar 1. Komposit PP-karet tanpa pelapisan, (a) bulan ke-0 (b) bulan ke-1, (c) bulan ke-2, (d) bulan ke-3



Gambar 2. Komposit PP-karet pelapisan cat minyak, (a) bulan ke-0 (b) bulan ke-1, (c) bulan ke-2, (d) bulan ke-3

Cat minyak terbuat dari bahan dasar *polyurethane*. Penambahan *acrylic* pada campuran *polyurethane* membuat polimer tahan akan korosi [7]. Pada Gambar 2 kondisi komposit PP-karet pelapisan cat minyak sebelum menerima paparan cuaca (bulan ke-0) berwarna putih mengkilap dengan permukaan halus dan rata. Perubahan warna terjadi mulai bulan ke-2 dengan warna sedikit lebih kusam. Perubahan warna pada cat minyak tidak terlalu terlihat hal ini karena *polyurethane* memberikan ketahanan abrasi dan stabilitas cahaya.

Waterproof berbasis *elastomeric* (polimer) mempunyai sifat elastis yang tinggi, tahan terhadap UV, tetapi kurang kuat untuk bagian yang terkena air terus menerus. Pada Gambar 3 kondisi komposit PP-karet pelapisan *cat waterproof* sebelum menerima paparan cuaca (bulan ke-0) berwarna putih. Perubahan warna terjadi mulai bulan ke-1 dengan warna lebih kusam dan timbul flek pada permukaannya. Warna semakin memudar pada bulan ke-3 dan flek meluas.

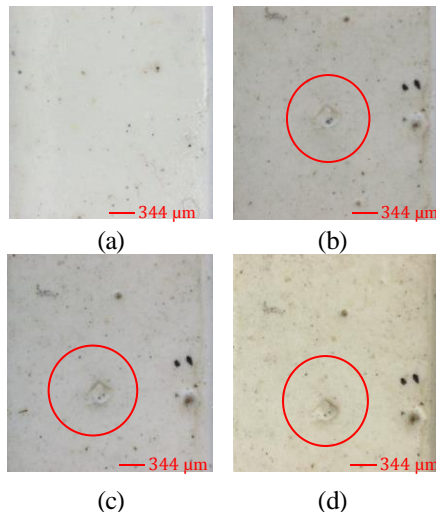


Gambar 3. Komposit PP-karet pelapisan cat *waterproof*, (a) bulan ke-0 (b) bulan ke-1, (c) bulan ke-2, (d) bulan ke-3

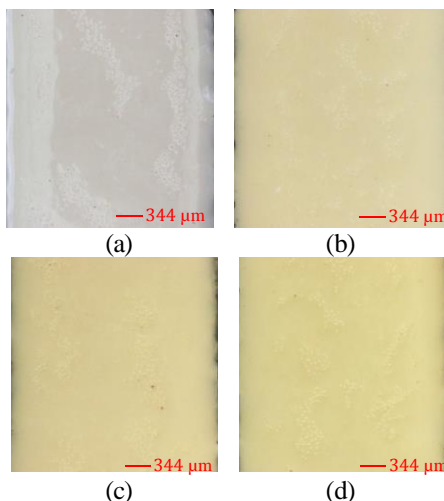
Unsaturated polyester merupakan salah satu jenis polimer *thermoset*. Radiasi *ultra violet* dapat memutuskan ikatan kimia dalam polimer. Proses ini disebut *fotodegradasi* yang pada akhirnya menyebabkan keretakan, pengapuran,

perubahan warna, dan menurunnya sifat-sifat fisik tertentu [2]. Pada Gambar 4 kondisi komposit PP-karet pelapisan resin *unsaturated polyester* sebelum menerima pemaparan cuaca (bulan ke-0) berwarna putih. Perubahan warna terjadi mulai bulan ke-1 dengan warna dan timbul flek dan *void*.

Resin *epoxy* memiliki sifat adhesi, tahan bahan kimia, tahan korosi dan fleksibilitas tetapi akan berubah warna menjadi kuning jika mengalami paparan *ultraviolet* [7]. Pada Gambar 5 kondisi komposit PP-karet pelapisan resin *repxoxy* sebelum menerima pemaparan cuaca (bulan ke-0) berwarna putih dan permukaan licin. Perubahan warna terjadi mulai bulan ke-1 dengan warna menjadi kuning. Warna semakin kuning pada bulan ke-3.



Gambar 4. Komposit PP-karet pelapisan resin *unsaturated polyester*, (a) bulan ke-0 (b) bulan ke-1, (c) bulan ke-2, (d) bulan ke-3

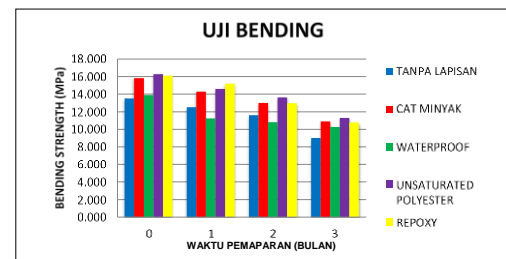


Gambar 5. Komposit PP-karet pelapisan resin *repxoxy*, (a) bulan ke-0 (b) bulan ke-1, (c) bulan ke-2, (d) bulan ke-3

Pengujian Bending

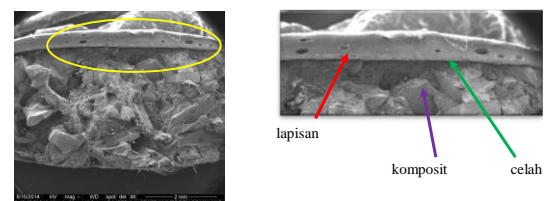
Hasil pengujian bending pada Gambar 6 menunjukkan pada proses pemaparan cuaca kekuatan bending mengalami penurunan. Kekuatan bending komposit PP-karet tanpa pemaparan (bulan ke-0) tertinggi adalah komposit dengan lapisan *repxoxy* sebesar 16,107 MPa dan terendah komposit tanpa lapisan sebesar 13,504 MPa. Pada proses pemaparan

selama tiga bulan kekuatan bending tertinggi adalah komposit PP-karet dengan lapisan *unsaturated polyester* sebesar 11,292 MPa dan kekuatan bending terkecil adalah komposit PP-karet tanpa pelapisan sebesar 9,015 MPa.



Gambar 6. Pengaruh waktu pemaparan cuaca terhadap bending komposit PP-karet

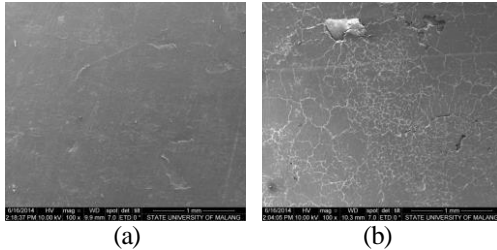
Selama proses pemaparan 3 bulan material yang stabil kekuatannya adalah material komposit PP-karet dengan lapisan *waterproof*. *Waterproof* berbasis *polyurethane* mempunyai sifat tahan terhadap UV. Penambahan *acrylic* pada campuran *polyurethane* membuat polimer tahan akan korosi [7]. *Waterproof* berbasis *elastomeric* (polimer) mempunyai sifat elastis yang tinggi, tahan terhadap UV, tetapi kurang kuat untuk bagian yang terkena air terus menerus. Pada Gambar 6 komposit PP-karet dengan lapisan *waterproof* tanpa pemaparan mempunyai kekuatan bending sebesar 13,873 MPa dan pada bulan ke-3 kekuatan bending menjadi 10,254 MPa. Pada pemaparan bulan ke-1, komposit dengan lapisan *waterproof* mengalami penurunan paling tinggi. Hal ini terlihat dari hasil pengamatan SEM pada bulan ke-1, pada Gambar 7 menunjukkan ikatan antara komposit dan lapisan mulai terlepas karena *waterproof* tidak tahan terhadap curah hujan yang tinggi (curah hujan bulan Desember 9,5 mm) dan terdapat *void* yang menyebabkan kekuatan menurun. Pada bulan Januari curah hujan 7,3 mm dan bulan Februari 6,9 mm, kondisi kekuatan bending komposit PP-karet dengan lapisan *waterproof* stabil.



Gambar 7. Foto SEM patahan *bending* komposit PP-karet lapisan *waterproof* bulan ke-1

Komposit PP akan mengalami penurunan setelah mengalami pemaparan cuaca. Pada proses pemaparan menunjukkan pengaruh radiasi *ultraviolet* yang menyebabkan perubahan struktur dan morfologi sehingga mempengaruhi kekuatan mekanik. Kekuatan mekanik komposit akan menurun jika waktu pemaparan meningkat [6]. PP sangat dipengaruhi oleh radiasi *ultraviolet*. Pemaparan sinar matahari secara langsung dapat menyebabkan penurunan sifat kekuatan pada material PP. Komposit PP-karet tanpa lapisan selama proses pemaparan berlangsung mempunyai kekuatan bending terendah karena mengalami pemutusan ikatan kimia dalam polimer plastik PP. Hal ini karena adanya efek fotodegradasi pada plastik PP. Efek fotodegradasi dapat dilihat dari hasil foto SEM pada Gambar 8. Keretakan komposit PP-karet semakin luas yang

menyebabkan kekuatan mekanik menurun. Pada Gambar 8(a) sebelum proses paparan kondisi permukaan komposit PP-karet terlihat rata tanpa adanya celah atau lubang. Keretakan mulai terlihat pada bulan 1 seperti Gambar 8(b). Kekuatan mekanik semakin berkurang seiring bertambahnya waktu proses paparan. Penurunan kekuatan bending 38% dari kondisi awal. Pada Gambar 6 komposit PP-karet tanpa paparan mempunyai kekuatan bending sebesar 13,504 MPa dan pada paparan bulan 3 kekuatan bending menurun menjadi 9,015 MPa.



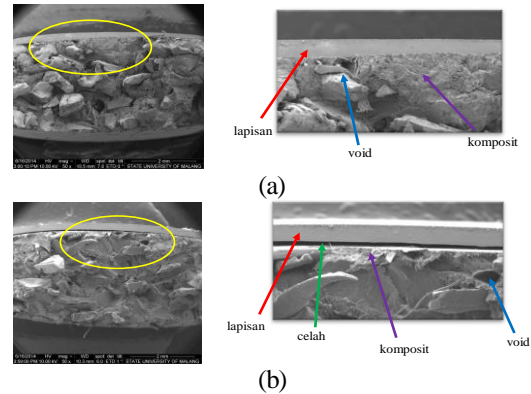
Gambar 8. Foto SEM permukaan komposit PP-karet (a) bulan ke-0 (b) bulan ke-1

Cat minyak terbuat dari bahan dasar *acrylic polyurethane*. Penambahan *acrylic* pada campuran *polyurethane* membuat polimer tahan akan korosi [7]. Pada Gambar 6 komposit PP-karet dengan lapisan cat minyak pada bulan ke-0 mempunyai kekuatan bending sebesar 15,815 MPa dan pada paparan bulan ke-3 kekuatan bending turun menjadi 10,880 MPa. Komposit PP-karet dengan lapisan cat minyak mengalami penurunan kekuatan bending sekitar 9% tiap bulannya kecuali bulan ke-3 mengalami penurunan kekuatan sekitar 16%. Hal ini terjadi karena cat minyak yang berbahan dasar *polyurethane* tidak tahan terhadap penyinaran yang cukup tinggi. Pada Gambar 9(a) ikatan komposit antara PP dan karet masih kuat dan lapisan cat masih melekat. Pada bulan ke-3 seperti Gambar 9(b) ikatan antara lapisan dan komposit mulai terlepas karena penyinaran pada bulan ke-3 cukup tinggi sehingga menyebabkan ikatan antara komposit dan lapisan semakin lemah.

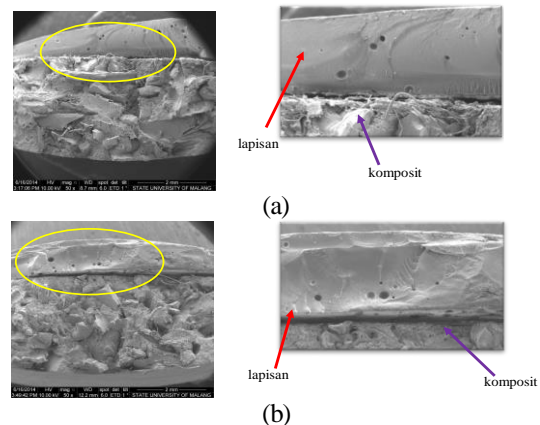
Unsaturated polyester merupakan salah jenis polimer *thermoset* yang banyak dimanfaatkan karena memiliki keseimbangan sifat mekanis, elektrik, ketahanan kimia, dan stabilitas dimensional. Kekurangan resin ini adalah menjadi getas jika diberi pembebanan suhu panas, kekuatan impact rendah, dan kekuatan puntir rendah. Komposit PP-karet dengan lapisan resin *unsaturated polyester* memiliki kekuatan bending tertinggi selama proses paparan. Pada Gambar 6 komposit PP-karet dengan lapisan *unsaturated polyester* memiliki kekuatan bending 16,283 MPa pada bulan ke-0 dan 11,292 MPa pada bulan ke-3. Kekuatan bending komposit dengan lapisan *unsaturated polyester* menurun 6-10% tiap bulannya kecuali pada bulan ke-3 kekuatan bending menurun sampai 17% karena pada bulan ke-3 terjadi penyinaran paling tinggi sehingga suhu permukaan akan panas. Hal ini dapat dilihat dari pengamatan SEM pada bulan ke-3 seperti Gambar 10(b) lapisan *unsaturated polyester* terdapat banyak void dan juga terjadi keretakan dibagian dalam lapisan sedangkan ikatan antara lapisan dan komposit mulai terlepas sehingga menyebabkan kekuatan menurun.

Repoxy adalah hasil modifikasi *bis-phenol* resin *epoxy*. Resin *epoxy* memiliki sifat adhesi, tahan bahan kimia, tahan korosi, dan fleksibilitas tetapi mempunyai kecenderungan akan menguning jika mengalami paparan *ultraviolet* [7]. Resin *epoxy* terjadi peningkatan degradasi khususnya bagian

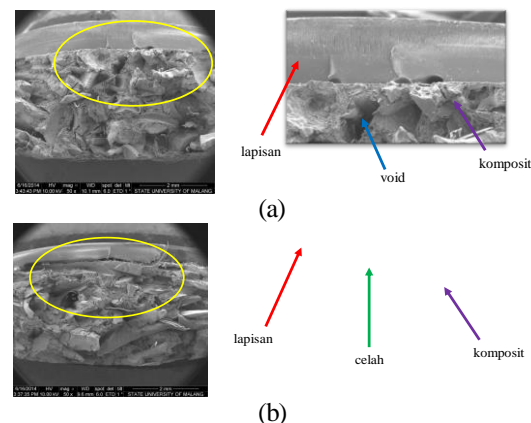
permukaan yang terkena langsung matahari selama 6 bulan [8]. Kekuatan tekuk dan tarik mengalami penurunan. Komposit PP-karet dengan lapisan resin *repoxy* pada bulan ke-0 mempunyai kekuatan bending sebesar 16,107 MPa dan pada bulan ke-3 mengalami penurunan menjadi 10,780 MPa. Penurunan kekuatan sekitar 7-10% tiap bulannya kecuali pada bulan ke-3 kekuatan bending turun sampai 20% dari bulan ke-2. Hal ini terjadi karena pada bulan ke-3 terjadi penyinaran paling tinggi. Dari pengamatan SEM pada bulan ke-3 seperti Gambar 11(b) lapisan *repoxy* terjadi keretakan dibagian dalam lapisan sedangkan ikatan antara lapisan dan komposit mulai terlepas sehingga menyebabkan kekuatan menurun.



Gambar 9. Foto SEM patahan *bending* komposit PP-karet lapisan cat minyak (a) bulan ke-1, (b) bulan ke-3



Gambar 10. Foto SEM patahan *bending* komposit PP-karet lapisan *unsaturated polyester* (a) bulan ke-1, (b) bulan ke-3



Gambar 11. Foto SEM patahan *bending* komposit PP-karet lapisan *repoxy* (a) bulan ke-1, (b) bulan ke-3

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh dan analisa data, maka dapat ditarik kesimpulan, kekuatan bending pada material komposit PP-karet akan menurun jika waktu pemaparan bertambah. Dalam proses pemaparan selama 3 bulan, komposit yang lebih stabil kekuatan bendingnya adalah material komposit PP-karet dengan lapisan *waterproof*. Kekuatan bending komposit PP-karet dengan lapisan *waterproof* sebelum pemaparan sebesar 13,873 MPa dan setelah pemaparan sebesar 10,254 MPa. Sedangkan komposit yang paling tinggi kekuatan bendingnya ialah *unsaturated polyester*. Kekuatan bending komposit PP-karet dengan lapisan *unsaturated polyester* sebelum pemaparan sebesar 16,283 MPa dan setelah pemaparan sebesar 11,292 MPa.

5. TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai dengan Dana Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi APBN UNS 2014.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sahwan, F.L., Martono, D.H., Wahyono, S., Wiyosidharmo, L.A., 2005, *Sistem Pengolahan Limbah Plastik di Indonesia*, Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol. 6 (1), pp. 311-318.
- [2] Aloma K.K., dkk., 2005, *Pengaruh Anti Oksida Terhadap Degradasi Plastik Polipropilen*, Puslitbang Iptek Bahan-BATAN, Jurnal Sains Materi Indonesia, Vol 6-No.12, pp. 29-54.
- [3] Juma, M., Koren, Z., Markos, J., Annus, J., Jelemesky, L., 2006, *Pyrolysis and Combustion of Scrap Tire, Petroleum & Coal*, Vol. 48 (1), pp. 15-26.
- [4] Anonim, 1998, ASTM D 1435, standards, *Standard Test Methode for Determining The Izod Impact Strength of Plastic*, New York.
- [5] Anonim, 1998, ASTM D 790-97, standards, *Standard Test Methode for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, New York.
- [6] Popa, I.M, dkk., 2013, *Mechanical Properties and Weathering Behavior of Polypropylene-Hemp Shives Composites*, Journal of Chemistry, Hindawi Publishing Corporation, Vol. 2013, Article ID 343068, pp 1-8.
- [7] Howarth, G.A., 2000, *Legislation-compliant Polyurethane and Epoxy Coatings*, Pigment & Resin Technology, Vol 29, pp 325-336.
- [8] Roylance, D., 1978, *Weathering of Fiber-Reinforced Epoxy Composites*, Polymer Engineering and Science, Vol. 18, No 4.



PENGARUH KEKASARAN PERMUKAAN LAPISAN ENAMEL TERHADAP KEKUATAN REKAT GESER KOMPOSIT TAMBAL GIGI

Lega Putri Utami¹⁾, kusmono²⁾

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah mada1)

Dosen Jurusan teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada2)

Jl. Grafika No.2, Yogyakarta 552811,2)

Phone: +62274521673, Fax: +622745216731,2)

Email: legaputriutami@yahoo.co.id, kusmono@ugm.ac.id

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan kekerasan permukaan tiga jenis komposit tambal gigi dan mempelajari pengaruh kekasaran permukaan enamel terhadap kekuatan rekat geser. Bahan yang digunakan 45 buah gigi premolar manusia yang telah ditanam resin kemudian direndam dalam saliva buatan pH 6,7 selama 24 jam. Setelah itu, gigi diampelas pada permukaan enamel dengan tiga ukuran kertas amplas; 80, 120 dan 600. Selanjutnya diukur kekasaran permukaan menggunakan surfcom 120A untuk mendapatkan roughness average (Ra). Tiga komposit tambal gigi yang digunakan adalah Bis-GMA/TEGDMA/clay, Solare[®]X-A3 dan Filtek[™]Z350XT sedangkan G-BOND sebagai bahan adhesive. Spesimen uji geser dibuat melalui komposit dicetak ke permukaan gigi menggunakan cetakan akrilik dengan diameter 2,5 mm dan tinggi 3 mm kemudian dikeraskan menggunakan light curing selama 1 menit. Kekuatan rekat geser ditentukan melalui uji geser menggunakan mesin universal testing machine. Sedangkan uji kekerasan digunakan metode micro vickers dimana komposit dicetak ke cetakan akrilik diameter 10 mm dan tinggi 2mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekerasan permukaan material tambal gigi tertinggi ditunjukkan oleh komposit solare (40,59 VHN), diikuti oleh komposit filtek (32,65 VHN) dan komposit Bis-GMA/TEGDMA/clay. Untuk komposit Bis-GMA/TEGDMA/clay kekuatan rekat geser tertinggi (5,15 MPa) dicapai pada ukuran kertas amplas 600. Komposit Solare[®]X-A3 dengan kekuatan rekat geser tertinggi (5,25 MPa) juga ukuran kertas amplas 600 sedangkan komposit material tambal gigi jenis Filtek[™]Z350XT kekuatan rekat tertinggi (6,43 MPa) didapatkan pada ukuran kertas amplas 80. Dapat disimpulkan bahwa kekasaran permukaan pada lapisan enamel mempengaruhi kekuatan rekat geser.

Kata kunci: kekasaran permukaan, enamel, kekuatan rekat geser, komposit

1. PENDAHULUAN

Komposit tambal gigi banyak diaplikasikan pada gigi anterior (gigi bagian depan) dan posterior (gigi bagian belakang), karena komposit tidak mudah korosi, warna yang sangat mirip dengan gigi asli, dan mempunyai sifat mekanis yang baik. Salah satu cara untuk mengevaluasi sifat mekanis bahan tambal gigi adalah melalui uji geser yang digunakan mengetahui kekuatan rekat geser antara komposit dengan permukaan gigi. Kekuatan geser merupakan ketahanan maksimum suatu material dalam menahan beban yang menyebabkan gerakan geser pada material tersebut sebelum terlepas[1]. Kekuatan rekat geser dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain umur gigi, komposisi komposit, jenis adhesive, waktu etsa, kondisi lingkungan, dan kekasaran permukaan[2]. Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan kekerasan permukaan tiga jenis komposit tambal gigi dan mempelajari pengaruh kekasaran permukaan enamel terhadap kekuatan rekat geser.

2. METODOLOGI

Spesimen yang digunakan adalah 45 buah gigi premolar manusia yang digunakan sebagai aplikasi tambal gigi. Tiga jenis komposit tambal gigi yang digunakan adalah Bis-GMA/TEGDMA/clay, Solare[®]X-A3 dan Filtek[™]Z350XT seperti terlihat pada Tabel 1 dan bahan adhesive self-etch yaitu G-BOND. Komposit Bis-GMA/TEGDMA/clay dibuat di lab sedangkan solare dan filtek merupakan jenis komposit tambal gigi komersial. Kertas amplas nomor 80, 120 dan 600

digunakan untuk mendapatkan variasi kekasaran pada permukaan enamel gigi.

Untuk persiapan spesimen, gigi di tanam ke dalam resin kemudian di rendam dengan saliva buatan pH 6,7 selama 24 jam. Seluruh spesimen di bagi menjadi 3 kelompok masing-masing untuk ukuran kertas amplas no 80, 120 dan 600 untuk mendapatkan kekasaran yang berbeda pada permukaan enamel, kemudian kekasaran permukaan enamel diukur dengan menggunakan alat ukur surfcom 120A.

Tabel 1. Komposit, manufaktur, komposisi kimia matriks dan filler serta jumlah kandungan filler

No	Komposit	Manufaktur	Shade	Matriks	Kandungan Filler (wt%)
1	Solare	GC Dental Products Corp., Tokyo, Japan	A3	UDMA	45,5
2	Filtek	3M ESPE, St. Paul, MN, USA	A3	Bis-GMA, TEGDMA, Procrlyat resins	65
3	clay	Disiapkan di lab		Bis-GMA, TEGDMA,	1

Tabel 2. Data uji kekasaran dengan berbagai no amplas

No amplas	80	120	600
Surface Roughness (Ra, μ m)	3,8	2,6	0,6

Seluruh spesimen dibagi menjadi 3 kelompok berdasarkan kekasaran sebanyak 15 buah gigi, 1 macam komposit

dengan 5 sampel gigi. Permukaan enamel yang akan diaplikasikan komposit dibersihkan kemudian diolesi dengan bahan adhesif merek G-BOND menggunakan *micro-brass* kemudian dikeringkan selama 10 detik menggunakan kompresor sebelum disinari dengan *light curing* LED B dengan selama 10 detik. Tahap selanjutnya komposit dicetak ke permukaan gigi menggunakan cetakan akrilik dengan diameter 3 mm dan tinggi 2,5 mm kemudian dikeraskan dengan cara disinari dengan *light curing* selama 1 menit dan cetakan di lepas dari komposit. Pengujian dilakukan dengan uji geser menggunakan mesin uji geser *universal testing machine* dengan kecepatan uji 0,5 mm/menit Gambar 1.



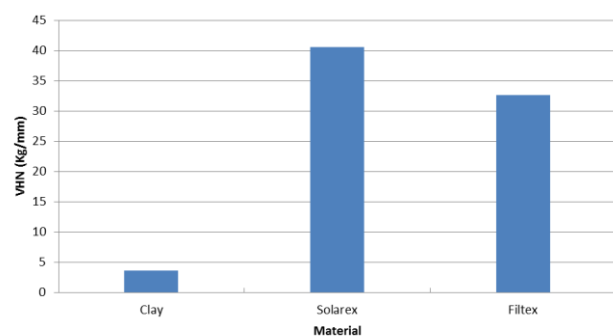
Gambar 1. Alat uji geser *Universal Testing Machine*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari hasil pengujian dianalisa statistik menggunakan uji ANOVA dan uji Tukey untuk melihat kekerasan permukaan material komposit gigi dan membandingkan kekuatan rekat geser dengan berbagai kekasaran.

Tabel 3. Nilai rerata dan simpangan baku kekerasan Vickers (VHN) permukaan komposit Bis-GMA/TEGDMA/clay, solare dan filtek.

Komposit/ Bahan	Rerata	F	Probabilitas (P)
Bis-GMA/TEGDMA/clay	3,48 ± 0,223	79,344	0,000
Solare	40,60 ± 8,417	79,344	0,000
filtek	32,65 ± 1,151	79,344	0,000

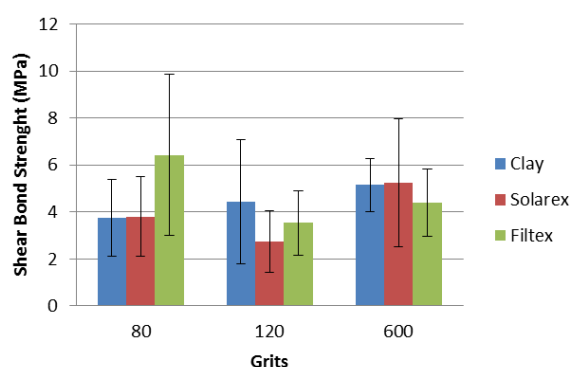


Gambar 2. Perbandingan nilai kekerasan Vickers komposit

Dari hasil analisa statistik menunjukkan adanya perbedaan kekerasan dari bahan material komposit dimana kekerasan tertinggi didapatkan pada komposit Solare diikuti oleh Filtek dan Bis-GMA/TEGDMA/clay. Bahan tambal gigi harus

memiliki nilai kekerasan dan tahan terhadap tekanan pada saat mengunyah. Dalam penelitian ini nilai kekerasan Solare lebih tinggi dibandingkan dengan Filtek dan clay. Hal ini disebabkan oleh komposit Solare termasuk golongan resin komposit *packable*. Resin komposit *packable* memiliki penguat/pengisi (*filler*) yang lebih banyak (>80% berat) sehingga bersifat kaku. Jenis penguat/pengisi (*filler*) yang digunakan adalah *Silica*, *fluoro-aluminosilicate glass* dan *pre-polymerized resin fillers*. Sifat kaku tersebut menyebabkan resin komposit ini dapat tahan terhadap deformasi plastis lokal dalam hal ini tahan terhadap beban tekan. Filtek digolongkan resin komposit *flowable* karena bahan ini mempunyai persentase jumlah bahan pengisi yang <70% berat dibanding komposit hibrid. Bahan pengisi yang digunakan pada resin komposit *flowable* sama dengan komposit lain hanya jumlah bahan pengisi yang dikurangi sehingga mempunyai kemampuan mengalir yang tinggi[3].

Enamel



Gambar 3. Perbandingan nilai kekuatan rekat geser dengan kekasaran permukaan berbeda

Dari hasil analisa statistik juga menunjukkan adanya perbedaan nilai kekuatan rekat geser dengan kekasaran permukaan dari masing-masing jenis komposit (Gambar 3). Untuk jenis komposit *clay* kekasaran terhadap kekuatan rekatnya semakin kasar permukaan maka nilai kekuatannya semakin turun. Kekuatan rekat pada grits 80 paling rendah dibandingkan dengan grits 120 dan 600. Jenis solare kekuatan rekat tertinggi dengan grits 600 diikuti 80 dan 120, sedangkan kekuatan rekat grits 80 dan 120 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Sementara kekuatan rekat pada komposit filtek pada grits 80 lebih tinggi dibandingkan dengan kekuatan rekat pada grits 120 dan 600, sedangkan kekuatan rekat pada grits 120 dengan 600 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

Adhesi merupakan mekanisme yang penting dalam bidang kedokteran gigi yaitu untuk merekatkan suatu restorasi pada permukaan gigi sehingga tidak mudah terlepas. Mekanisme adhesi pada material berbahan resin komposit secara umum meliputi tiga mekanisme dasar yang penting, yaitu (1) Perlekatan mikromekanik yang terlihat dari ikatan resin komposit dengan email menggunakan teknik etsa-asam. (2) Adhesi secara kimia pada email atau dentin dengan menggunakan *coupling agent* yang mengandung *polyacid*. (3) Mekanisme adhesi yang meliputi pembasahan, penetrasi dan pembentukan lapisan perekat pada antar muka dan substrat [4].

Pada penelitian ini, kekuatan rekat geser masing-masing komposit yaitu komposit *clay* dan solare terendah ditunjukkan dengan perlakuan kekasaran permukaan grits 80. Proses pengamplasan umumnya dilakukan dengan cara meletakkan permukaan restorasi yaitu bagian enamel ke permukaan kertas amplas yang berputar sehingga akan menghasilkan ketidak-teraturan pada permukaan enamel. Ketidak-teraturan ini berupa

undercut dan *groove* yang nantinya akan memfasilitasi ikatan mikromekanik antara restorasi dengan resin komposit[5]. Proses pengamplasan sama halnya dengan perlakuan *sandblasting*. Bahwa perlakuan *sandblasting* pada VIRK (*veneer* indirek resin komposit) juga akan menghilangkan kontaminasi pada permukaan, sehingga energi permukaan meningkat[6]. Energi permukaan yang tinggi menyebabkan bahan adhesif resin semen mudah terserap pada permukaan restorasi dan menghasilkan adhesi yang baik[7].

5. KESIMPULAN

Kekerasan Vickers tertinggi ditunjukkan oleh komposit jenis Solare diikuti oleh Filtek dan Bis-GMA/TEGDMA/clay. Kekasaran permukaan enamel gigi sangat mempengaruhi kekuatan rekat geser komposit dalam proses restorasi. Dari penelitian ini di dapat nilai kekuatan rekat geser tiga jenis komposit yaitu komposit Bis-GMA/TEGDMA/clay, komposit Solare®X-A3 dan komposit Filtek™Z350XT optimal pada kekasaran amplas 600.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Craig, R.G., dan Ward M.L., 1997, Restorative Dental Material 10th ed., Mosby. Co., Philadelphia, h. 255-289.
- [2] Ateyah, N., dan Akpata, E., 2000, Factor Affecting Shear Bond Strength of Composite Resin to Fluorosed Human Enamel, Operative Dentistry 25, 216-222.
- [3] Estafan A.M., dan Estafan, D., 2000, Mikroleakage Study of Flowable Composite Resin Systems. Compend con Educ. Dent., 21 (9) :705-12
- [4] McCabe JF., Walls AWG., 2008, Applied Dental Material Blackwell 9th ed. Blackwell: 225, 240-241.
- [5] D' Arcangelo C., dan Vanini L., 2007, Effect of Three Surface Treatment on the Adhesive Properties Indirect Resin Composite Restoration, J Adhes Dent 9, 319-326.
- [6] Soares CJ, Giannini M, Oliveria MT, Martins LRM, Paulilo LAMS., 2004, Effect of Surface Treatment of Laboratory Fabricated Composites on Microtensile Bond Strength to a Luting Resin Cement, J Appl Oral ci: 12, 45-50.
- [7] Power JM., dan Sakaguchi RL., 2006, Restorative Dental Material 12th ed., Mosby. St. Louis, h. 213-231.

EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS (EMA) UNTUK MENGETAHUI MODAL PARAMETER PADA ANALISIS DINAMIK BALOK KAYU YANG DIJEPIT DI SATU UJUNG

Oegik Soegihardjo¹⁾, Suhardjono²⁾, Bambang Pramujati³⁾, Agus Sigit Pramono⁴⁾

Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya^{1,2,3,4)}
Laboratorium Mesin Perkakas, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,
Surabaya²⁾

Kampus ITS, Keputih, Sukolilo – Surabaya 60111. Indonesia^{1,2,3,4)}

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra¹⁾

Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia¹⁾

Phone: 0062-31-2983465, Fax: 0062-31-8417658¹⁾

E-mail : oegiks@peter.petra.ac.id¹⁾, suhardjono@me.its.ac.id²⁾, pramujati@me.its.ac.id³⁾, pramono@me.its.ac.id⁴⁾

ABSTRAK

Experimental modal analysis (EMA) merupakan salah satu cara yang digunakan untuk menganalisis karakteristik dinamik suatu struktur. EMA diaplikasikan di berbagai bidang, antara lain rekayasa struktur, otomotif, disain, maupun pemesinan. Dalam EMA pengukuran gaya input (excitation force) dan respon dari struktur (frequency response function, FRF) dilakukan dalam domain waktu (time domain) yang kemudian diubah dalam domain frekuensi (frequency domain) menggunakan Fast Fourier Transform (FFT). Penelitian ini menyajikan aplikasi EMA untuk mengukur karakteristik dinamik balok kayu yang dapat digunakan sebagai penguat (stiffener) struktur berongga berbentuk kotak, ataupun rangka kapal kayu. Informasi tentang karakteristik dinamik balok kayu sangat terbatas, sehingga EMA dilakukan untuk mengetahui modal parameter kayu sebelum digunakan sebagai penguat. Eksperimen dilakukan menggunakan modal hammer untuk memberikan gaya input pada balok kayu dan akselerometer (accelerometer) untuk mengukur responnya dalam bentuk percepatan. Hasil yang diperoleh digunakan untuk mengetahui modal parameter struktur berupa frekuensi pribadi (natural frequency), bentuk modus getar (mode shape) dan rasio redaman. Balok kayu memiliki dimensi panjang 860 mm, berpenampang bujur sangkar dengan panjang sisi 50 mm. Untuk melengkapi kajian eksperimen, juga dilakukan simulasi modal analysis terhadap balok kayu menggunakan metode elemen hingga (finite element analysis). Dari empat titik yang diuji, masing-masing menghasilkan kurva fungsi transfer, kurva amplitudo dan kurva sudut fasa. Dengan menganalisis kurva-kurva tersebut, nilai modal parameter balok dapat diketahui. Nilai frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga berada di kisaran 56 Hz, 334 Hz dan 854 Hz. Rasio redaman untuk ketiga frekuensi pribadi adalah 0,0178; 0,0139 dan 0,0121. Frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga balok kayu hasil simulasi modal analysis berada di kisaran 55,37 Hz, 339,71 Hz dan 921,71 Hz. Persentase perbedaan nilai frekuensi pribadi hasil simulasi dan eksperimen untuk frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga sebesar 1,13%; 1,71% dan 7,93%. Bentuk modus getar hasil eksperimen sesuai dengan bentuk modus getar hasil simulasi. Nilai koherensi data eksperimen untuk titik-titik pengujian berkisar antara 0,80 sampai dengan 0,99. Hal ini berarti bahwa hasil pengukuran hanya dipengaruhi oleh noise yang relatif kecil.

Kata kunci: *experimental modal analysis, modal parameter, karakteristik dinamik, bentuk modus getar.*

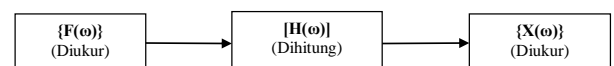
1. PENDAHULUAN

EMA merupakan salah satu cara yang sering digunakan untuk mengetahui *modal parameter* dari sebuah struktur, bila diperlukan informasi detail tentang karakteristik dinamik struktur yang bersangkutan. Sebagai contoh, untuk memonitor kondisi struktur jembatan terhadap berbagai jenis beban yang melewatinya, untuk memonitor menara, gedung bertingkat tinggi terhadap angin dan gempa, EMA merupakan cara yang efektif yang bisa dimanfaatkan dalam proses monitoring [1].

Zhang [2] menggunakan EMA untuk mengetahui karakteristik redaman pasir yang digunakan sebagai pondasi, terhadap berbagai jenis pembebanan baik *sinusoidal*, *random* maupun *impulse*. Penggunaan EMA dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui *modal parameter* dari kayu yang akan digunakan untuk penguat atau rangka sebuah struktur. Mengingat data tentang karakteristik dinamik kayu sangat terbatas dan beragamnya jenis kayu, maka kayu yang digunakan sebagai rangka ini perlu diketahui karakteristik dinamiknya berdasarkan *modal parameter* yang diperoleh

melalui EMA.

Dalam penelitian ini EMA dilakukan menggunakan sensor akselerometer untuk mengukur respon dari kayu terhadap gaya input yang berasal dari *modal hammer*. Hasil dari pengujian ini berupa kurva *frequency respon function* (FRF) maupun kurva respon struktur terhadap gaya input. EMA dengan menggunakan *modal hammer* dipilih sebagai metode yang digunakan dalam penelitian ini karena metodanya sederhana namun memberikan hasil yang baik [3]. Secara skematik EMA bisa dinyatakan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skema *experimental modal analysis*.

Gaya input $\{F(\omega)\}$ dan respon (output) struktur $\{X(\omega)\}$ adalah besaran yang diukur dalam EMA, sedangkan $\{H(\omega)\}$ yang merupakan *frequency respon function* (FRF) merupakan hasil yang dihitung berdasarkan rasio respon struktur (output) terhadap gaya input.

Hubungan antara gaya input $\{F(\omega)\}$, respon (output) struktur $\{X(\omega)\}$ dan $[H(\omega)]$ dinyatakan dalam persamaan (1).

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (1)$$

$H(\omega)$ dalam persamaan (1) adalah *compliance* (perpindahan/gaya, dalam m/N) yang besarnya bervariasi sesuai dengan frekuensi (ω). Respon struktur bisa dalam bentuk perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*) maupun percepatan (*acceleration*) [4]. Karena respon struktur dalam eksperimen ini diukur dengan akselerometer, maka respon struktur adalah percepatan, sehingga persamaan (1) disesuaikan menjadi

$$\ddot{X}(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (2)$$

$H(\omega)$ dalam persamaan (2) adalah *inertance* (percepatan/gaya, dalam ms^{-2}/N) yang besarnya bervariasi sesuai dengan frekuensi (ω).

Melalui EMA, *modal parameter* yang dapat diketahui adalah frekuensi pribadi, bentuk modus getar dan rasio redaman. Karena pengukuran dalam EMA dilakukan dalam domain waktu, maka *modal parameter* dari struktur dapat diketahui setelah data pengukuran diubah dalam domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT).

Besarnya frekuensi pribadi *angular* (ω_0) diperoleh melalui kurva amplitudo (ms^{-2}) dalam domain frekuensi. Bentuk modus getar diperoleh berdasarkan kurva fungsi transfer (FRF) dan sudut fasa (ϕ). Besarnya sudut fasa dihitung berdasarkan persamaan (3),

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{H_{Im}}{H_{Re}} \right) \quad (3)$$

Dalam persamaan (3), parameter H_{Re} dan H_{Im} adalah harga riil dan imajiner dari $H(\omega)$.

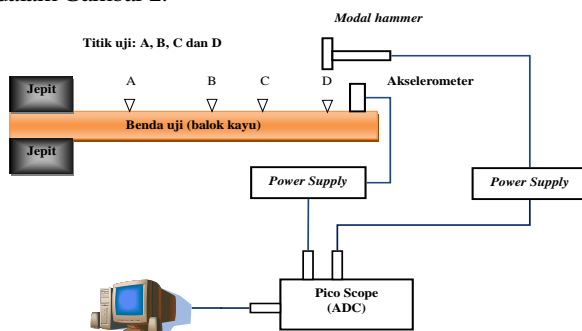
Nilai rasio redaman dari balok kayu yang diuji didapatkan dengan menghitung *loss factor* menggunakan metode *Half-power Bandwidth* [5] sebagaimana diformulasikan di persamaan (4).

$$\eta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{2\pi(f_2 - f_1)}{2\pi f_0} = 2D \quad (4)$$

Parameter η adalah *loss factor*, D adalah rasio redaman, f_0 adalah frekuensi pribadi saat amplitudo maksimum (*peak amplitude*), yaitu $a_{maks} = a(f_0)$. Parameter f_1 adalah frekuensi saat $a(f_1) = 0,707 a_{maks}$ dan f_2 adalah frekuensi saat $a(f_2) = 0,707 a_{maks}$.

2. METODOLOGI

Perangkat yang digunakan dalam eksperimen (EMA) terdiri dari beberapa komponen sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Skema peralatan eksperimen.

Titik A, B, C dan D adalah titik-titik uji yang dilakukan terhadap benda uji (balok kayu). Posisi titik-titik pengujian

sebagai berikut: posisi titik A berada 300 mm dari ujung kiri balok kayu, posisi titik B berada 210 mm dari titik A, posisi titik C berada 90 mm dari titik B, sedangkan titik D berada 130 mm dari titik C. Titik D berjarak 130 mm dari ujung kayu yang tidak dijepit.

Modal hammer digunakan untuk memberi gaya input terhadap balok kayu, sedangkan akselerometer digunakan untuk mengukur respon balok kayu (output) berupa percepatan. Posisi *modal hammer* berubah sesuai dengan posisi titik pengujian, yaitu di titik A, B, C maupun D. Posisi akselerometer diletakkan di salah satu ujung kayu yang tidak dijepit.. Posisi akselerometer tidak mengalami perubahan selama pengujian berlangsung.

Power supply memberikan suplai daya pada *modal hammer* maupun akselerometer. ADC (*analog to digital converter*) merubah data analog menjadi data digital agar data dapat diolah dengan komputer.

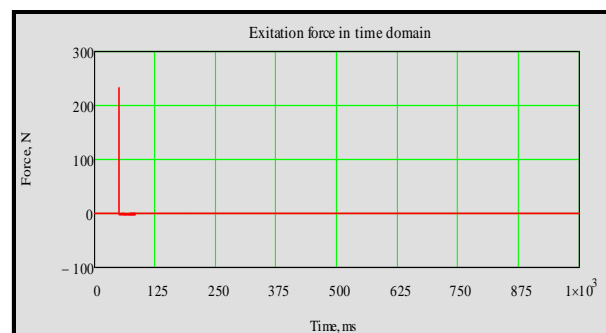
Data hasil pengujian berupa gaya input dari *modal hammer* dan respon balok kayu dalam bentuk percepatan akan disimpan di komputer dalam bentuk domain waktu. Untuk memperoleh harga dari *modal parameter*, data pengukuran dalam domain waktu diubah menjadi data dalam domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transform* (FFT).

Langkah-langkah eksperimen adalah:

1. Menyiapkan peralatan eksperimen.
2. Melakukan pengujian untuk mengukur gaya input dari *modal hammer* dan respon balok kayu dalam bentuk percepatan (dalam domain waktu) di titik A, B, C dan D. Untuk tiap titik pengujian, dilakukan minimal sepuluh kali pengujian.
3. Mengolah data pengujian dalam domain waktu menjadi data dalam domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transform* (FFT).
4. Mengetahui dan menghitung *modal parameter* (frekuensi pribadi, bentuk modus getar dan rasio redaman).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

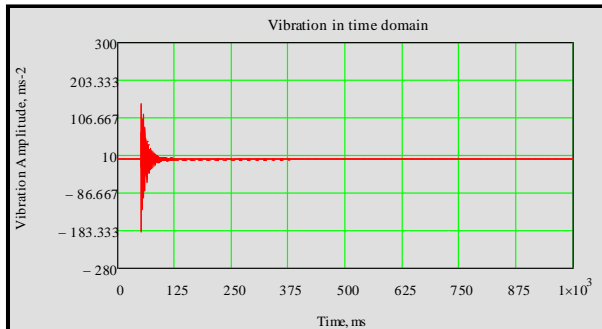
Dalam EMA *modal parameter* yang dapat diketahui/dihitung dari data pengujian dalam domain waktu yang sudah diubah menjadi domain frekuensi. Data pengujian berupa gaya input (gaya eksitasi) dan respon balok kayu dalam domain waktu di salah satu titik uji, yaitu titik A dapat dilihat di Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Gaya input di titik uji A dalam domain waktu

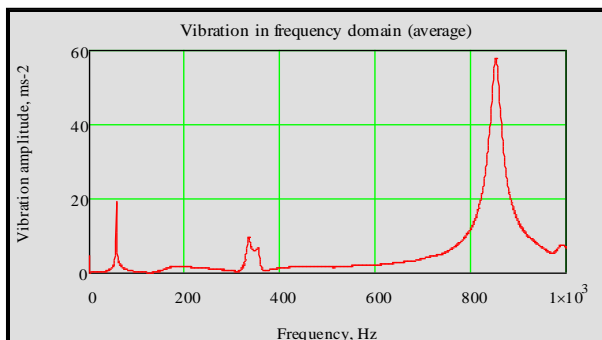
Melalui data pengujian yang sudah dirubah menjadi domain frekuensi, dapat disusun beberapa kurva antara lain kurva amplitudo getaran, kurva fungsi transfer, kurva sudut

fasa dan kurva koherensi. Kurva amplitudo dan kurva fungsi transfer dari salah satu titik pengujian, yaitu titik A dapat dilihat di Gambar 5 dan Gambar 6. Kurva-kurva tersebut disusun berdasarkan rata-rata dari enam data pengukuran di titik A.

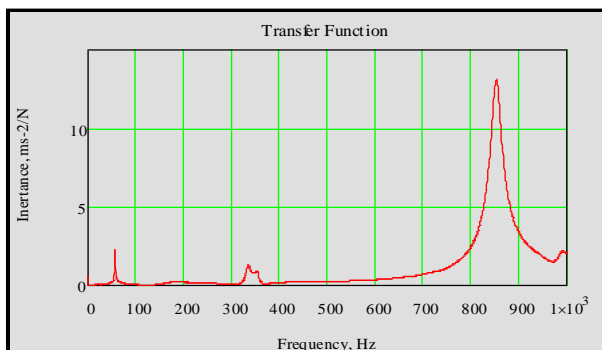


Gambar 4. Respon kayu (percepatan) di titik uji A dalam domain waktu.

Melalui data pengujian yang sudah dirubah menjadi domain frekuensi, dapat disusun beberapa kurva antara lain kurva amplitudo getaran, kurva fungsi transfer, kurva sudut fasa dan kurva koherensi. Kurva amplitudo dan kurva fungsi transfer dari salah satu titik pengujian, yaitu titik A dapat dilihat di Gambar 5 dan Gambar 6. Kurva-kurva tersebut disusun berdasarkan rata-rata dari enam data pengukuran di titik A.



Gambar 5. Kurva amplitudo getaran titik uji A dalam domain frekuensi.



Gambar 6. Kurva fungsi transfer (*inertance*) titik uji A dalam domain frekuensi.

Modal parameter dalam bentuk frekuensi pribadi (Hz) dapat diketahui melalui kurva amplitudo getaran sebagaimana pada Gambar 5, dengan melihat nilai frekuensi (sumbu x) pada tiap *peak amplitude*. Melalui Gambar 5, besarnya

frekuensi pribadi balok kayu bisa diketahui berdasarkan posisi *peak amplitude*, yang berada di frekuensi 56 Hz, 334 Hz dan 852 Hz. Dengan demikian dalam rentang pengujian yang dilakukan, yaitu pada rentang 0-1000 Hz, terdapat tiga nilai frekuensi pribadi balok kayu.

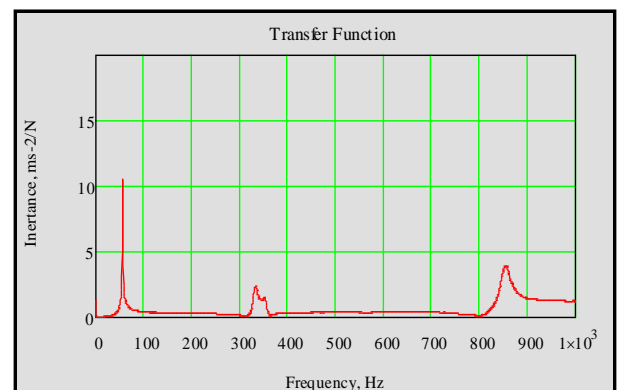
Frekuensi pribadi dari balok kayu juga dapat diketahui berdasarkan posisi *peak amplitude* dari kurva amplitudo getaran balok kayu di tiga titik pengujian lainnya, yaitu titik B, C dan D. Nilai frekuensi pribadi di titik pengujian lainnya juga memberikan nilai yang tidak jauh berbeda dengan nilai frekuensi pribadi yang diperoleh di titik pengujian A. Nilai frekuensi pribadi yang diperoleh dari ke empat titik pengujian, yaitu titik A, B, C, D dan nilai frekuensi pribadi yang diperoleh dari simulasi *modal analysis* dengan metode elemen hingga dicantumkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Frekuensi pribadi balok kayu di titik A, B, C, D dan simulasi *modal analysis*.

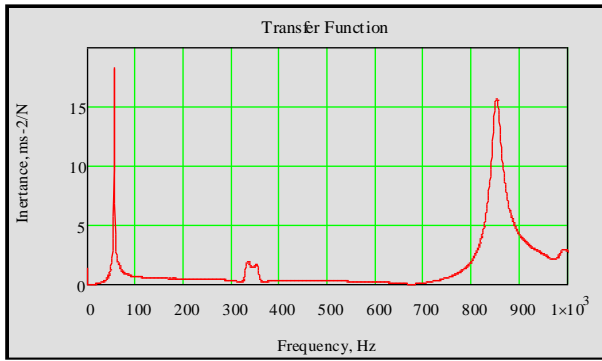
Titik Uji	Frekuensi Pribadi 1 (Hz)	Frekuensi Pribadi 2 (Hz)	Frekuensi Pribadi 3 (Hz)
A	56	334	852
B	56	332	854
C	56	333	852
D	56	328	852
Simulasi	55,37	339,71	921,71
Perbedaan frekuensi pribadi (eksperimen dan simulasi)	Persen	Persen	Persen
	1,13	1,71	7,93

Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil pengukuran di empat titik uji memberikan hasil yang hampir sama. Hasil simulasi dengan metode elemen hingga sebagaimana tercantum di Tabel 1, memberikan nilai frekuensi pribadi sedikit berbeda dengan hasil pengujian. Namun demikian hasil simulasi menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil pengujian. Persentase perbedaan antara hasil pengukuran dan hasil simulasi untuk frekuensi pribadi 1, 2 dan 3 sebesar 1,13%, 1,71% dan 7,93%.

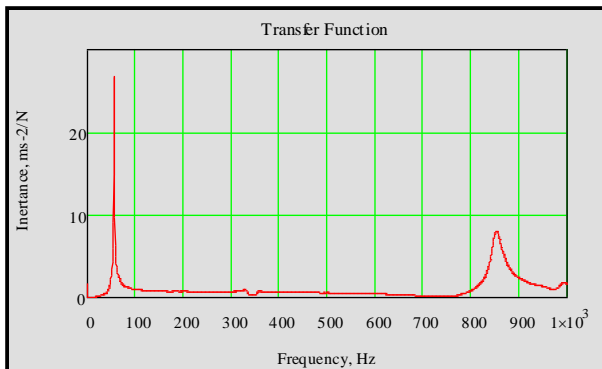
Kurva fungsi transfer balok kayu (*inertance*, ms⁻²/N) di titik pengujian B, C dan D dapat dilihat di Gambar 7 sampai dengan Gambar 9.



Gambar 7. Kurva fungsi transfer balok kayu titik uji B dalam domain frekuensi.

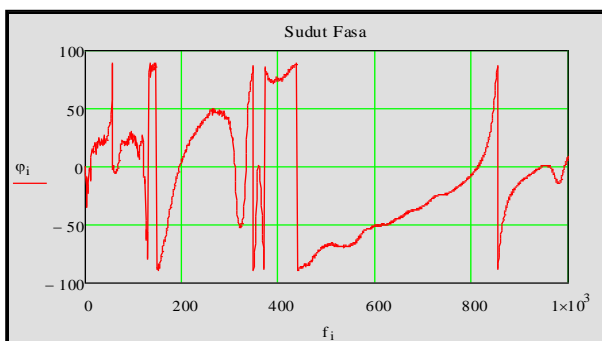


Gambar 8. Kurva fungsi transfer balok kayu titik uji C dalam domain frekuensi.



Gambar 9. Kurva fungsi transfer balok kayu titik uji D dalam domain frekuensi.

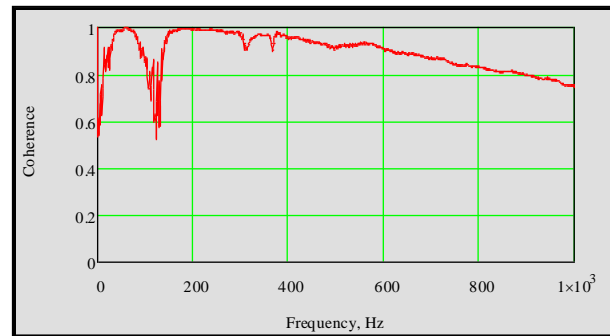
Selain kurva amplitudo getaran dan kurva fungsi transfer, dari data pengujian yang sudah dirubah menjadi domain frekuensi, juga dapat disusun kurva sudut fasa dan kurva koherensi. Kurva sudut fasa digunakan untuk menentukan arah getaran pada titik yang diukur, sehingga bentuk modus getarnya dapat digambarkan, sedangkan kurva koherensi untuk melihat kualitas hasil pengukuran, dengan rentang nilai mulai 0 (sangat jelek) sampai dengan 1 (sangat baik). Kurva sudut fasa dan kurva koherensi di titik uji A dapat dilihat di Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Kurva sudut fasa titik uji A.

Dari kurva amplitudo getaran (Gambar 5), kurva fungsi transfer (Gambar 6), kurva sudut fasa (Gambar 10) dan kurva koherensi (Gambar 11), tersebut dapat diketahui nilai frekuensi pribadi (Hz), *inertance* (ms^{-2}/N), sudut fasa (derajat), koherensi dan rasio redaman di tiap titik pengujian. Berbagai nilai yang dapat diketahui dan dihitung dari data eksperimen

(EMA), dicantumkan pada Tabel 2.



Gambar 11. Kurva koherensi titik uji A.

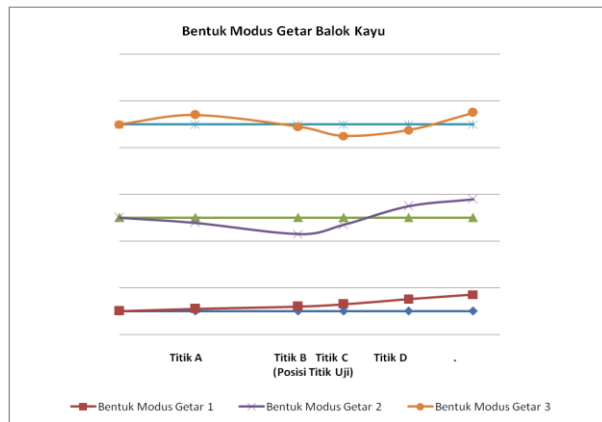
Tabel 2. Nilai-nilai hasil uji balok kayu di empat titik pengujian

Titik Uji	Terminologi	Frekuensi Pribadi 1	Frekuensi Pribadi 2	Frekuensi Pribadi 3
A	Frekuensi, (Hz)	56	327	852
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	2,2775	0,5213	13,0200
	Sudut Fasa, (derajat)	88,72	-42,65	81,79
	<i>Coherence</i>	0,99	0,97	0,81
	Rasio Redaman	0,0178	0,0134	0,0129
B	Frekuensi (Hz)	56	328	854
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	10,5900	1,4110	3,9565
	Sudut Fasa, (derajat)	69,55	-43,73	-71,53
	<i>Coherence</i>	0,99	0,96	0,80
	Rasio Redaman	0,0178	0,0135	0,0117
C	Frekuensi (Hz)	56	326	852
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	18,2530	0,6202	15,7230
	Sudut Fasa, (derajat)	45,20	-37,17	-85,72
	<i>Coherence</i>	0,99	0,98	0,87
	Rasio Redaman	0,0178	0,0150	0,0117
D	Frekuensi (Hz)	56	328	853
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	26,6820	0,9350	7,9787
	Sudut Fasa, (derajat)	67,29	87,28	-87,72
	<i>Coherence</i>	0,99	0,99	0,95
	Rasio Redaman	0,0178	0,0137	0,0123

Nilai koherensi dari berbagai titik pengujian berada pada rentang 0,80 sampai dengan 0,99. Hal tersebut mengindikasikan bahwa hasil pengukuran hanya dipengaruhi oleh *noise* yang relatif kecil.

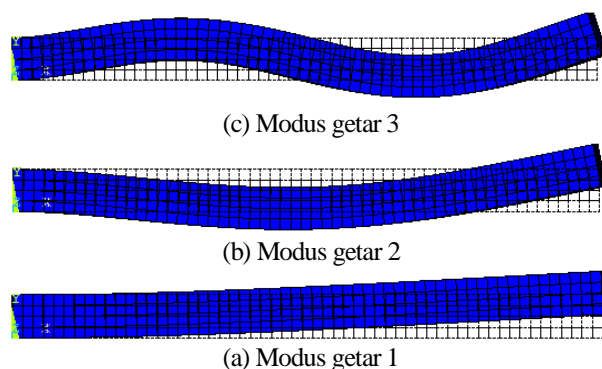
Bentuk modus getar disusun berdasarkan nilai *inertance*

(ms^{-2}/N) dari kurva fungsi transfer (Gambar 6) dan kurva sudut fasa (Gambar 10). Bentuk modus getar 1 (untuk frekuensi pribadi 1), bentuk modus getar 2 (untuk frekuensi pribadi 2) dan modus getar 3 (untuk frekuensi pribadi 3) hasil eksperimen dapat dilihat di Gambar 12.



Gambar 12. Bentuk modus getar balok kayu hasil eksperimen.

Bentuk modus getar 1 (untuk frekuensi pribadi 1), bentuk modus getar 2 (untuk frekuensi pribadi 2) dan modus getar 3 (untuk frekuensi pribadi 3) hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 13. Bentuk modus getar 1, 2, dan 3 hasil eksperimen (Gambar 12) maupun bentuk modus getar 1, 2, dan 3 hasil simulasi (Gambar 13) menunjukkan hasil yang serupa.



Gambar 13. Bentuk modus getar balok kayu hasil simulasi.

Bentuk modus getar hasil simulasi (Gambar 13) dilakukan dengan *modal analysis simulation* menggunakan *software Ansys 12*. Simulasi *modal analysis* dilakukan sebagai data pembandingan dalam eksperimen, sekaligus bermanfaat untuk memberikan gambaran secara cepat terhadap fenomena yang sedang diuji. Simulasi dan eksperimen semestinya memberikan hasil dengan *trend* yang sama.

4. KESIMPULAN

EMA dapat digunakan untuk mengetahui nilai *modal parameter* yang diperlukan untuk menentukan karakteristik dinamik dari balok kayu yang diuji, berupa frekuensi pribadi, bentuk modus getar maupun rasio redaman. Tiga nilai frekuensi pribadi balok kayu hasil EMA ada di kisaran 56 Hz, 334 Hz dan 852 Hz. Simulasi yang dilakukan untuk memberikan data pembandingan, menghasilkan tiga frekuensi

pribadi di kisaran 55,37 Hz, 339,71 Hz dan 921,71 Hz. Persentase perbedaan nilai frekuensi pribadi hasil simulasi dan eksperimen untuk frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga sebesar 1,13%; 1,71% dan 7,93%.

Tiga bentuk modus getar dari balok kayu yang diuji juga dapat diketahui dari eksperimen yang dilakukan. Ke tiga bentuk modus getar hasil eksperimen juga sesuai dengan hasil simulasi.

Eksperimen yang dilakukan memiliki nilai koherensi antara 0,80 sampai dengan 0,99 di ke empat titik yang diuji, yaitu titik A, B, C dan D. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil pengukuran dipengaruhi oleh *noise* yang relatif kecil.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rainieri, C., Fabbrocino, G. and Cosenza, E., Automated Operational Modal Analysis as Structural Health Monitoring Tool: Theoretical and Applicative Aspects, Key Engineering Materials Vol. 347 (2007) pp 479-484, Trans Tech Publications, Switzerland.
- [2] Zhang, X.J. and Aggour, M.S., Damping Determination of Sands Under Different Loadings., Paper No. 364., Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd, 1996.
- [3] Carne, T.G. and Stasiunas, E.C., Lessons Learned in Modal Testing – Part 3: Transient Excitation for Modal Testing, More Than Just Hammer Impacts, Experimental Techniques, May/Juni 2006, pp 69-79.
- [4] Koenigsberger, F. and Tlustý, J., Machine Tool Structures., Volume 1, 1st edition, Pergamon Press Ltd., 1970.
- [5] Zaveri, K., Modal Analysis of Large Structures – Multiple Exciter Systems., 1st edition, 2nd print, Bruel & Kjaer, November 1984.

STUDI PERTUMBUHAN BUTIR PRIOR AUSTENIT AKIBAT PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN SELAMA PEMANASAN AWAL BAJA HSLA

Richard A.M. Napitupulu^{*})

Prodi Teknik Mesin, Universitas HKBP Nommensen, Medan, 20234

^{*}richard_alf@yahoo.com

ABSTRAK

Pengontrolan mikrostruktur akhir (ferit) yang baik merupakan salah satu cara yang efektif untuk mendapatkan baja karbon dengan sifat mekanis yang baik. Struktur butir yang diinginkan pada mikrostruktur akhir bergantung pada ukuran butir awal (prior austenit) yang terbentuk selama proses pemanasan awal, dimana untuk mendapatkan butir ferit super halus, maka harus terbentuk butir prior austenit halus saat proses pemanasan awal (reheating). Untuk itu perlu suatu perhatian khusus pada pertumbuhan butir prior austenit pada proses pemanasan awal agar diperoleh ukuran mikrostruktur akhir yang memberikan sifat mekanis yang maksimal. Pada penelitian ini baja HSLA dipanaskan kembali pada temperatur 960°C, 1060°C dan 1120°C dengan variasi waktu tahan 10, 30 dan 60 menit pada laju pemanasan 7,5°C/menit untuk mengamati karakteristik pertumbuhan butir austenit. Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa ada hubungan antara temperatur pemanasan dan waktu tahan terhadap pertumbuhan butir austenit dan kekerasan yang terjadi. Semakin tinggi temperatur pemanasan maka butir austenit yang terjadi akan semakin besar dan waktu tahan 30 menit juga menghasilkan butir austenit yang semakin besar. Namun jika melihat hubungan dari besar dan sifat (kekerasan) butir austenit yang terbentuk maka temperatur pemanasan 1060°C dan waktu tahan 10 menit akan menghasilkan butir austenit yang lebih sesuai untuk mengalami proses perlakuan/pembentukan selanjutnya.

Kata kunci: Pertumbuhan, Prior Austenit, Temperatur, Waktu Tahan, Baja HSLA.

1. PENDAHULUAN

Walaupun banyak usaha yang telah dilaksanakan untuk memperoleh material-material baru, baja merupakan suatu material yang layak dan paling banyak digunakan pada saat ini. Dengan komposisi kimia dan sejarah proses termomekanik dalam proses produksinya yang sangat mempengaruhi kehebatan sifat mekaniknya, besi dan baja masih merupakan material alloy yang paling banyak digunakan di industri. Baja HSLA merupakan material yang paling tersebar luas dalam penggunaannya, disebabkan kemampuannya untuk dirubah melalui pendinginan cepat dan menghasilkan suatu fasa yang amat keras yaitu martensit. Disebabkan kekompleksitasan dari mikrostruktur pada baja HSLA, sifat-sifat karakteristiknya akan selalu menetap secara empiris.

Pengontrolan mikrostruktur yang baik merupakan salah satu cara yang efektif untuk mendapatkan baja HSLA dengan sifat mekanis yang baik. Struktur butir yang diinginkan pada mikrostruktur akhir bergantung pada butir yang terbentuk selama proses pemanasan awal dan pembentukannya (deformasi), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, maka harus terbentuk butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal^[1]. Penelitian yang berawal dari *prior austenit* (besar butir austenit saat *reheating* sebelum mengalami deformasi) memiliki peran penting dimana ukuran butir *prior austenite* akan menentukan ukuran butir setelah rekristalisasi dan pertumbuhan butir setelah baja mengalami deformasi^[2,3].

Pada suatu logam dengan fasa tunggal seperti pada baja dengan fasa austenit laju pertumbuhan butir^[4] rata-rata D bertambah dengan bertambahnya waktu, akan tergantung mobilitas batas butir dan energi perpindahan batas butir. Jika diasumsikan radius rata-rata dari seluruh batas butir adalah sebanding dengan diameter butir rata-rata, maka energi rata-rata pertumbuhan butir sebanding dengan $2\gamma / D$, sehingga $\dot{u} = \alpha M \frac{2\gamma}{D} = dD/dt$ dimana α adalah konstanta

proporsionalitas. Laju pertumbuhan butir adalah berbanding terbalik terhadap D dan akan meningkat cepat dengan meningkatnya temperatur karena meningkatnya mobilitas batas butir, M . Jika $D = D_0$ pada $t = 0$, maka $D^2 = D_0^2 + Kt$ dimana $K = 4 \alpha M \gamma$.

Persamaan pertumbuhan butir hasil penelitian Beck, et al. menunjukkan nilai besar butir selama pertumbuhan butir normal pada kondisi anil isothermal adalah $d^n - d_0^n = C \cdot t$, dimana d merupakan diameter butir akhir, d_0 diameter butir awal, t waktu anil, n dan C konstanta yang tergantung dari komposisi paduan dan temperatur anil. Dari persamaan Beck diatas, dengan memasukkan nilai C sebagai persamaan Arrhenius terhadap fungsi temperatur, maka kita dapat menyatakannya dalam bentuk $d^n - d_{\text{Rex}}^n = C \cdot t$, dimana C adalah suatu konstanta yang mengikuti persamaan Arrhenius dan dinyatakan sebagai $C = A \cdot \exp(Q/RT)$, sehingga persamaan Beck diatas dapat dinyatakan dengan $d^n - d_{\text{Rex}}^n = A \cdot \exp(Q/RT) \cdot t$ dimana Q adalah energi aktivasi^[1]. Sehingga dari persamaan di atas tampak bahwa d ditentukan oleh ukuran *prior austenit* dan pada tahap pertumbuhan butir, besar butir austenit akhir ditentukan oleh d_{rek} .

Saat ini, dalam aplikasi di industri, diameter *prior austenit* (d_0) sebagai dasar perhitungan hanya didapatkan melalui *trial-error* dengan memanaskan baja hingga temperatur *reheating*, dengan kondisi yang ada pada industri, sehingga ada beberapa faktor yang diabaikan seperti kecepatan pemanasan (*heating rate*), lama pemanasan, dan waktu tahan. Akibatnya perhitungan besar butir *prior austenit* tidak konsisten, yang mengakibatkan perhitungan besar butir austenit setelah proses canai panas tidak tepat dan sifat mekanis tidak sesuai dengan yang diharapkan. Untuk itu dibutuhkan suatu sistem yang dapat mengontrol mikrostruktur baja HSLA selama proses pemanasan awal (*reheating*). Sistem tersebut dicapai dengan berbagai studi pembuatan model transformasi dan perilaku butir pada proses perlakuan panas^[1,4,5] sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas proses canai panas.

Besar butir pada mikrostruktur akhir ditentukan oleh butir *prior austenit* pada proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, dibutuhkan butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal^[2,3,6].

Berbagai penelitian yang terkait dengan pertumbuhan butir austenit masih perlu terus dilakukan dengan memasukkan semua variabel yang terkait salah satunya adalah variabel empiris sewaktu proses pemanasan awal. Pada proses pemanasan awal berbagai variabel yang dapat dikontrol antara lain adalah temperatur pemanasan, waktu tahan, laju pemanasan, dan tekanan ruang. Oleh sebab itu perlu adanya suatu pengamatan pengaruh dari variabel-variabel tersebut terhadap pertumbuhan butir austenit.

Penelitian ini adalah untuk melihat pertumbuhan butir austenit akibat pengaruh temperatur pemanasan dan waktu tahan pada laju pemanasan yang konstan dan tekanan ruang (tidak vakum). Pendekatan dilakukan secara empiris, melalui percobaan eksperimental di laboratorium yang kemudian akan dirumuskan dalam suatu model menyeluruh melalui hubungan temperatur pemanasan, waktu tahan dan laju pemanasan terhadap besar butir austenit serta pengaruh dari unsur paduan. Diharapkan kedepannya akan diketahui model pertumbuhan besar butir *prior austenit* yang tepat.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Bahan yang diteliti adalah baja HSLA Gr A.572 berbentuk lembaran komersil dengan ketebalan 6 mm yang diperoleh dari industri baja dalam negeri. Adapun komposisi unsur bahan dapat dilihat pada Tabel 1.

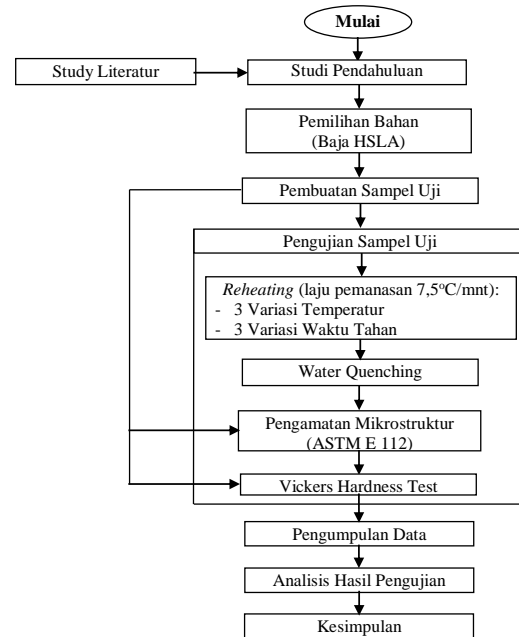
Tabel 1. Komposisi Baja HSLA (% Berat)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	N
0,12	0,266	0,645	0,009	0,005	0,034	0,028	0,011	0,0037

Sampel dipotong dari lembaran baja HSLA dengan ukuran 120x50x6 mm³. Kemudian sampel dipanaskan pada temperatur 1060°C, dimana dari hasil perhitungan berdasarkan teori Irvine, seluruh unsur paduan sudah larut dalam temperatur tersebut. Setiap sampel dipanaskan dengan temperatur pemanasan yang berbeda (960°C, 1060°C dan 1120°C) dengan laju pemanasan yang konstan (7,5°C/menit). Setelah sampel sampai pada temperatur pemanasan yang dituju, masing-masing sampel ditahan selama 10, 30 dan 60 menit lalu setiap sampel didinginkan dengan mencelupkan ke dalam air.

Kemudian setiap sampel dipotong menjadi ukuran 25 x 10 x 6 mm³, untuk selanjutnya dilakukan proses mounting. Setelah di amplas dan di etsa pada larutan pikral 4%, kemudian dilakukan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik dan pengujian kekerasan dengan menggunakan *Vickers Hardness Machine*. Selengkapnya dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada gambar 1 berikut.

Untuk mengetahui besar butir austenite, dilakukan perhitungan butir austenite dengan standar ASTM E112 dari 5 lokasi pada 1 sampel, kemudian diambil rata-ratanya. Begitu juga untuk mengetahui kekerasannya, dilakukan uji vickers dengan beban 1 kgf pada 5 lokasi dari 1 sampel, kemudian diambil rata-ratanya.

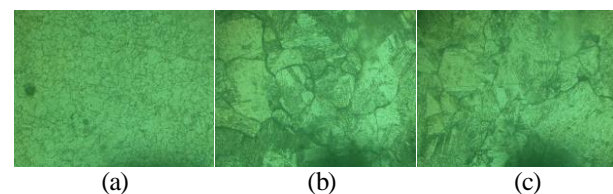


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

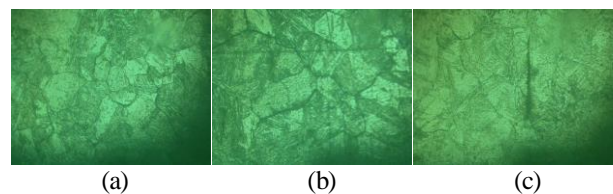
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Dari hasil uji metalographi, diperoleh butir austenit yang cukup jelas untuk dilakukan pengamatan dan perhitungan besar butir. Adapun hasil pengamatan butir dapat dilihat pada Gambar 2, 3 dan 4 berikut ini. Begitu juga dengan kekerasannya dapat dilihat pada Tabel 2.

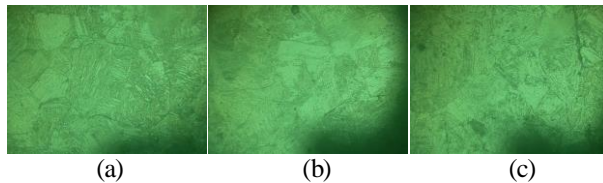


Gambar 2. Butir austenit hasil pemanasan pada suhu 960°C, laju pemanasan 7,5°C/ menit dan waktu tahan a). 10 menit b). 30 menit c) 60 menit, kemudian didinginkan cepat di dalam air (400x)



Gambar 3. Butir austenit hasil pemanasan pada suhu 1060°C, laju pemanasan 7,5°C/menit dan waktu tahan a). 10 menit b). 30 menit c) 60 menit, kemudian didinginkan cepat di dalam air (400x)

Adapun data pada Tabel 2 diatas dapat digambarkan sebagai grafik hubungan temperatur pemanasan dan besar butir untuk masing-masing waktu tahan serta grafik hubungan temperatur pemanasan dan kekerasan butir untuk masing-masing waktu tahan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5 dan 6 berikut ini.

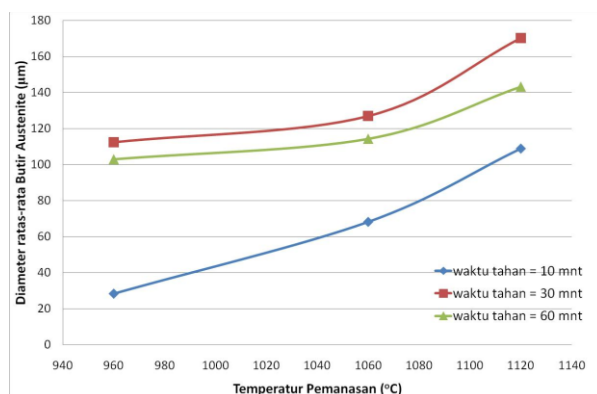


Gambar 4. Butir austenit hasil pemanasan pada suhu 1120°C, laju pemanasan 7,5°C/menit dan waktu tahan a). 10 menit b). 30 menit c) 60 menit, kemudian didinginkan cepat di dalam air (400x)

Tabel 2. Besar butir austenite dan kekerasannya ketika di reheating pada 1060°C

No	Waktu Tahan (menit)	Temperatur Pemanasan (°C)	d _{rata-rata} (μm)	HV
1	10	960	28,45	350,36
2	10	1060	68,26	371,2
3	10	1120	108,9	317,3
4	30	960	112,51	277,45
5	30	1060	127,04	305,04
6	30	1120	170,34	237,94
7	60	960	102,99	313,3
8	60	1060	114,37	310,56
9	60	1120	143,27	249,68

Adapun data pada Tabel 2 diatas dapat digambarkan sebagai grafik hubungan temperatur pemanasan dan besar butir untuk masing-masing waktu tahan serta grafik hubungan temperatur pemanasan dan kekerasan butir untuk masing-masing waktu tahan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5 dan 6.

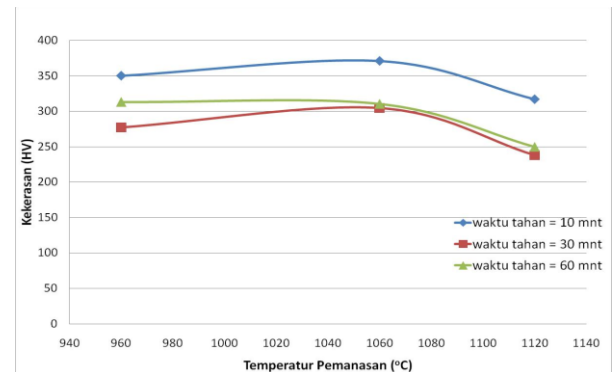


Gambar 5. Grafik hubungan temperatur pemanasan dan rata-rata besar butir austenit untuk masing-masing waktu tahan.

Pembahasan

Dari hasil foto struktur mikro sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2, 3 dan 4, dapat dilihat bahwa batas butir austenit yang muncul cukup jelas, sehingga dapat diperkirakan besar butir (diameter) butir austenit yang terjadi dengan menggunakan metode *circular intercept* sesuai dengan standar ASTM112. Dari gambar juga terlihat bahwa butir yang terjadi memiliki bentuk equiaxed dengan arah yang sembarang. Sementara itu mekanisme proses pertumbuhan butir karena adanya pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil dengan proses difusi kemungkinan dapat dilihat pada Gambar 4a, dimana terdapat butir kecil

diantara dua buah butir besar yang memungkinkan butir kecil terdifusi oleh butir besar. Hal ini dapat terjadi karena pada batas butir memiliki atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi bebasnya yang tinggi dengan cara mengurangi luas permukaan batas butir, sehingga terjadi migrasi batas butir dari butir kecil menuju butir besar. Hal ini sesuai dengan teori pematangan Zener^[8].



Gambar 6. Grafik hubungan waktu tahan dan kekerasan butir austenit untuk masing-masing laju pemanasan.

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan maka besar butir austenit akan semakin besar pada semua waktu tahan dengan kecenderungan yang hampir sama pada waktu tahan 30 dan 60 menit. Hal ini sesuai dengan teori Beck yang dikembangkan oleh Sellars dan kemudian oleh Arrhenius^[1,7] dimana jika temperatur dan waktu pemanasan semakin besar akan meningkatkan difusi karbon pada saat pembentukan inti austenit sehingga butir austenit yang dihasilkan menjadi lebih besar. Selain itu, dari Gambar 5 dapat dilihat pada seiring dengan kenaikan waktu tahan besar butir austenit akan meningkat mulai dari waktu tahan 10 dan 30 menit namun menurun kembali pada waktu tahan 60 menit. Jika mengacu kepada Gambar 5, dapat diduga bahwa waktu tahan tertentu mempengaruhi homogenitas elemen/paduan terlarut. Pada waktu tahan 10 dan 30 menit menit kemungkinan yang dapat terjadi adalah karbida/paduan (partikel fasa kedua) yang terlarut dan menyebar pada struktur awal tidak sebanyak yang terjadi pada waktu tahan 60 menit. Sedangkan pada waktu tahan 60 menit, karbida/paduan terlarut mulai mengelompok pada batas butir sehingga mengurangi migrasi batas butir dan menghambat proses pertumbuhan butir^[8]. Untuk itu perlu pengamatan yang lebih lanjut terkait dengan masalah ini.

Sementara itu dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa temperatur pemanasan dan waktu tahan berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik (kekerasan) yang terjadi. Semakin tinggi temperatur pemanasan maka akan terjadi penurunan sifat mekanik. Hal ini disebabkan karena besar butir austenit yang terjadi semakin besar sehingga kekerasannya juga semakin menurun. Untuk masing-masing temperatur pemanasan pada waktu tahan 10 ke 30 menit, terjadi penurunan sifat mekanik (kekerasan) namun meningkat lagi pada waktu tahan 60 menit. Hal itu dapat dipahami karena semakin lama waktu penahanan akan membuat unsur karbida/paduan lebih terlarut secara homogen sehingga memungkinkan dislokasi-dislokasi yang terjadi pada proses sebelumnya terlepas/terurai dari butir/batas butir, dimana unsur paduan yang menahan terurainya garis-garis dislokasi tersebut sudah terlarut/tersebar lebih merata.



4. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah:

1. Temperatur pemanasan mempengaruhi proses pertumbuhan butir dimana semakin besar temperatur pemanasan maka diameter rata-rata butir austenit yang terjadi akan semakin kecil.
2. Waktu tahan juga mempengaruhi proses pertumbuhan butir austenite, dimana pada waktu tahan 10 ke 30 menit diameter rata-rata butir austenite semakin besar, dan pada waktu tahan 60 menit diameter rata-rata butir austenite menurun.
3. Temperatur pemanasan dan waktu tahan berpengaruh signifikan terhadap kekerasan butir austenit yang terjadi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan DP2M DIKTI melalui hibah fundamental 2014 sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C.M Sellars, "The Physical Metallurgy of Hot Working", *Proc. Int. Conf.on Hot Working and Forming Processes*, Sheffield, England, 1980, hal. 3-15.
- [2] I.V.Samarasekera and E.B.Hawbolt, "Overview of Modelling the Microstructural State of Steel Strip During Hot Rolling" *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, July-August 1995, pp 157-165
- [3] C.M Sellars, "Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels", *Mat Science Seminar, Sheffield, England*, 1982.
- [4] P.A.Manohar, D.P Dunne, T Chandra and C.R. Killmore (1995, September) "Grain Growth Prediction in Microalloyed Steel", *ISIJ International*, Vol 36, 1996, hal. 194 – 200.
- [5] D. Priadi, R.A.M. Napitupulu and E.S. Siradj, "Austenite grain growth calculation of 0.028% Nb steel", *Journal of Mining and Metalurgy B*, ISSN 1450-5339, University of Belgrade, Serbia, 15 Mei 2011, hal. 199 – 209.
- [6] D. Priadi, R.A.M. Napitupulu and E.S. Siradj, "Austenite Grain Growth Calculation during Hot Rolling of 0.028% Nb Steel", *Journal of Materials Science and Engineering A*, USA, October 2011, hal. 678 – 683.
- [7] Manohar P.A. et. al., "Five Decades of the Zener Equation". *ISIJ International*, Vol.38, No. 9. 1998.
- [8] K. C. Russel, *Precipitate Coarsening and Grain Growth in Steels*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JENIS CAIRAN DIELEKTRIK TERHADAP MRR, EWR DAN VWR PADA TEGANGAN 340 VOLT DAN 580 VOLT DENGAN PROSES *DRILLING* EDM MENGGUNAKAN SPARK GENERATOR TIPE RELAKSASI (RC)

Susiswo¹⁾, Suhardjono²⁾ dan Bambang Pramujati³⁾

Program Magister Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS¹⁾

Laboratorium Mesin Perkakas, Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember^{1,2,3)}

e-mail: siswosumarto@gmail.com¹⁾, suhardjono@me.its.ac.id²⁾

ABSTRAK

Proses EDM termasuk pemessinan non konvensional yang sekarang ini telah banyak digunakan dan diaplikasikan pada industri manufaktur. Keunggulan dari pemessinan non konvensional dibandingkan dengan konvensional adalah pahat (elektroda) tidak harus lebih keras dari pada benda kerja, dapat memessin benda kerja dengan bentuk yang kompleks dan hasil pemessinan mempunyai kepresisian dan ketelitian yang tinggi. Unjuk kerja (Performansi) proses EDM sangat dipengaruhi oleh parameter pemotongan, diantaranya tegangan dari catu daya (Power Supply), breakdown Voltage, Arus (ignition current), dan cairan dielektrik. Cairan dielektrik dan tegangan sangat berperan pada performansi, produktivitas maupun unjuk kerja kualitas proses pemessinan. Dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik cairan dielektrik terhadap performansi proses drilling berdasarkan material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR) dan volumetric wear ratio (VWR). Pada penelitian proses EDM drilling ini dititik-beratkan pada pengaruh penggunaan jenis cairan dielektrik yaitu solar, kerosene, bio solar, minyak jagung, minyak kelapa, minyak matahari, minyak sawit dan minyak canola terhadap performansi proses drilling EDM ditinjau dari MRR, EWR dan VWR. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan Mesin EDM spark generator tipe relaksasi (R-C) pada material hardened tool steel SKD 11 dengan kekerasan 55-60 HRC. Variabel tetap yang digunakan adalah kapasitor 340 μ F, elektroda tungsten dan tegangan dipilih 340 Volt dan 580 Volt. Berdasarkan penelitian ini didapat bahwa pada tegangan 340 volt menghasilkan nilai MRR tertinggi 4,06 mm³/menit untuk cairan dielektrik solar dan terendah 2,32 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak canola. Pada tegangan 580 volt didapat nilai MRR tertinggi 5,88 mm³/menit untuk cairan dielektrik solar dan terendah 4,24 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak bunga matahari. Pada tegangan 340 volt didapat nilai EWR tertinggi 0,34 mm³/menit untuk cairan dielektrik solar dan terendah 0,22 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak sawit dan pada tegangan 580 volt didapat nilai EWR tertinggi 0,50 mm³/menit pada cairan dielektrik minyak solar dan terendah pada cairan dielektrik minyak bunga matahari dengan nilai 0,29 mm³/menit. VWR didapat hasil untuk tegangan 340 volt tertinggi 12,36 pada cairan dielektrik minyak sawit dan terendah 9,87 pada cairan dielektrik minyak kelapa sedangkan pada tegangan 580 volt terdapat nilai tertinggi 14,8 pada cairan dielektrik minyak kelapa dan terendah 11,54 pada cairan dielektrik Solar. VWR sebagai kontrol proses dimana semakin tinggi nilai VWR berarti semakin tinggi volume material benda kerja yang terbuang atau semakin sedikit terjadi keausan pada elektroda.

Kata kunci: Cairan Dielektrik, EDM Drilling, MRR, EWR, VWR.

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Penggunaan proses pemessinan non konvensional sekarang ini banyak diaplikasikan dilingkungan industri manufaktur. EDM mempunyai keunggulan dibandingkan dengan mesin konvensional, utamanya pahat (elektroda) tidak harus lebih keras dari pada benda kerja. Selain dari pada itu EDM dapat memessin benda kerja dengan bentuk yang kompleks serta hasil pemessinan mempunyai kepresisian dan ketelitian yang tinggi. Unjuk kerja (Performansi) proses EDM sangat dipengaruhi oleh parameter pemotongan, diantaranya tegangan dari catu daya (Power Supply), breakdown Voltage, arus (ignition current), dan cairan dielektrik. Cairan dielektrik dan tegangan sangat berperan baik pada performansi produktivitas maupun unjuk kerja kualitas proses pemessinan, khususnya untuk mesin EDM.

Tujuan dan manfaat

Tujuan penelitian ini adalah melakukan percobaan eksperimental Pengaruh beberapa Jenis cairan dielektrik

terhadap unjuk kerja (performansi) mesin *Prototipe Bench EDM Drilling Machine* berdasarkan tinjauan MRR, EWR dan VWR. Manfaat penelitian ini adalah didapatkannya cairan dielektrik yang murah mudah didapat dan mempunyai performansi baik kuantitas maupun kualitas pemessinan EDM yang tinggi.

Review penelitian terdahulu

Berikut berbagai penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti mengenai karakteristik dan variable-variable yang berpengaruh pada proses *Electric Discharge Machining*.

Penelitian terhadap pengaruh material elektroda yang berbeda terhadap laju pembuangan material (*Material Removal Rate*) telah dilakukan oleh Prajapati [2], Elektroda yang dipakai adalah jenis grafit, kuningan dan tembaga. Dengan menggunakan material benda kerja EN-9 dan variasi *pulse on-time*, *pulse off-time* dan arus yang dipakai. Didapat hasil menunjukkan bahwa elektroda grafit mempunyai MRR lebih tinggi dibanding dua elektroda lain, dan elektroda kuningan mempunyai kekasaran permukaan lebih baik.

Penelitian untuk mengetahui pengaruh penggunaan jenis

elektroda terhadap kekasaran permukaan material benda kerja telah dilakukan oleh Abdul Latief et.al[4], electrode yang digunakan adalah elektroda kuningan, tembaga dan variabel yang divariasikan adalah *pulse on time*, *pulse off time*, arus dan tegangan selanjutnya mendapatkan hasil benda kerja dengan kekerasan permukaan yang paling kecil adalah pada elektroda tembaga.

Telah dilakukan penelitian mengenai Prototipe *Labscale EDM Dilling Machine* oleh Suhardjono[3] dalam membuat rangkaian relaksasi untuk membangkitkan percikan bunga api listrik (*spark*) ternyata cairan dielektrik sangat berpengaruh terhadap spark gap untuk tegangan power supply yang sama dan hasil rancangan berfungsi dengan baik sehingga masih perlu disempurnakan dengan penelitian lebih lanjut dengan beberapa parameter dan aspek.

2. METODOLOGI

Untuk memudahkan pelaksanaan penelitian ini, metode yang digunakan adalah sebagai berikut:

Pengujian eksperimen.

Mempersiapkan material benda kerja untuk percobaan proses pemesinan pada mesin *EDM drilling* (Prototipe *Labscale EDM Dilling Machine*), percobaan dilakukan dengan parameter konstan yaitu kapasitor 340 μ F, elektroda tungsten 3,2 mm, tegangan 340 volt dan 580 volt. Percobaan dilakukan pada delapan cairan dielektrik yaitu solar, kerosene, biodiesel, minyak jagung, minyak sawit, minyak kelapa, minyak bunga matahari dan minyak *canola*. Sebelum dilakukan percobaan terlebih dahulu menimbang benda kerja dan elektroda dilanjutkan proses drilling *EDM*, kemudian menimbang benda kerja dan elektroda kembali setelah proses selesai untuk mengetahui berat benda kerja dan elektroda yang terbuang atau tererosi, termasuk mengukur waktu proses pelaksanaan *drilling*.

Kegiatan percobaan dilakukan di Laboratorium Mesin Perkakas Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya, dengan menggunakan mesin *EDM* dengan *spark generator* tipe relaksasi (R-C)



Gambar 1. Spark generator Relaksasi



Gambar 2. Bak Penampung Cairan Dielektrik

Setting percobaan pada mesin

Tegangan Suplay	340 Volt dan 580 Volt
Kapasitor	340 μ F
Resistor	3,1 ohm
Elektrode	tungsten diameter = 3.2 mm
Polaritas Elektrode	(+) benda kerja; (-) elektrode
Cairan dielektrik	Solar, bio solar, kerosene, minyak jagung, minyak sawit, minyak kelapa, minyak canola dan minyak Bunga matahari.
Benda Kerja	Baja SKD 11 dikeraskan

Pengumpulan data hasil pengukuran

Pengambilan data pada pengujian dibagi menjadi 3 tahap yaitu pengambilan data pada saat proses *drilling* dan pengambilan data setelah proses *drilling*.

- Pengambilan data sebelum proses *drilling* dimulai yaitu menimbang benda kerja dan elektroda
- Pengambilan data saat proses *drilling*: pencatatan data waktu *drilling* hingga tembus.
- Pengambilan data setelah proses *drilling*: penimbangan benda kerja dan elektroda setelah proses *drilling* selesai dengan menggunakan neraca digital Mettler Toledo Tipe Monoblock AB204-S dengan ketelitian 0.0001 gr

3. TEORI DASAR

EDM merupakan proses pemesinan dimana prinsip kerjanya memanfaatkan loncatan bunga api listrik yang terjadi antara benda kerja dan pahat (elektroda). Antara benda kerja dan elektroda dialiri/direndam cairan dielektrik yang pada dasarnya sebagai media isolator pada tegangan rendah dan diatas tegangan breakdown berubah sifat sebagai konduktor. Untuk memungkinkan terjadinya proses loncatan bunga api listrik maka harus terjadi beda tegangan yang melampaui *breakdown voltage* yaitu tegangan minimum yang digunakan untuk merusak cairan dielektrik sehingga tembus, yang mengakibatkan loncatan bunga api listrik. *Breakdown voltage* sendiri tergantung kepada:

- a) Jarak gap antara elektroda dan benda kerja
- b) Sifat isolator cairan dielektrik
- c) Tingkat polusi yang terjadi pada cairan dielektrik.

Rumus-rumus elektrik EDM tipe relaksasi;

Arus pelepasan energi listrik (I_d):

$$I_d = \frac{V_C}{(R_l + R_s)} = \frac{V_C}{R_l s} \quad (1)$$

Dimana, V_C adalah tegangan kapasitor

R_l adalah tahanan elektroda

R_s adalah tahanan saluran ion

$R_l s$ adalah tahanan total dari bagian peloncatan bunga api listrik

Energi Spark E:

$$E = \frac{1}{2} C V_b^2 \quad (2)$$

Dimana, C adalah kapasitans dari kapasitor

V_b adalah tegangan breakdown

Cairan dielektrik

Cairan dielektrik sangat berpengaruh terhadap hasil percobaan *drilling EDM* ini, apabila cairan dielektrik

mempunyai kekuatan dielektrik besar akan menghasilkan *MRR* dan *EWR* yang besar, begitu sebaliknya, sedangkan spesifikasi kekuatan dielektrik seperti dalam Tabel 1.

Tabel 1. Dielectric Strength

Nama Dielektrik	solar	kerosen	biosolar	m. Kelapa	m. sawit	m. mt. hari	m. jagung	m. canola
Dielectric Strength (KV/2,5mm)	70	50	70	29,17	22	26,17	37,5	35
Viscosity (centistoke)	1 - 5	2,5	4 - 7	29	28	31,87	38	38,7

Teori perhitungan *Material Removal Rate (MRR)*, *Electode Wire Rate(EWR)* dan *Volumetric Wear Ratio (VWR)*

$$MRR = \frac{\text{massa benda kerja sebelum pemesian (gr)} - \text{massa benda kerja sesudah pemesian (gr)}}{\rho \left(\frac{gr}{mm^3} \right) \text{ material benda kerja x waktu pemesian (menit)}} \quad (3)$$

$$EWR = \frac{\text{massa elektroda sebelum pemesian (gr)} - \text{massa elektroda sesudah pemesian (gr)}}{\rho \left(\frac{gr}{mm^3} \right) \text{ material elektroda x waktu pemesian (menit)}} \quad (4)$$

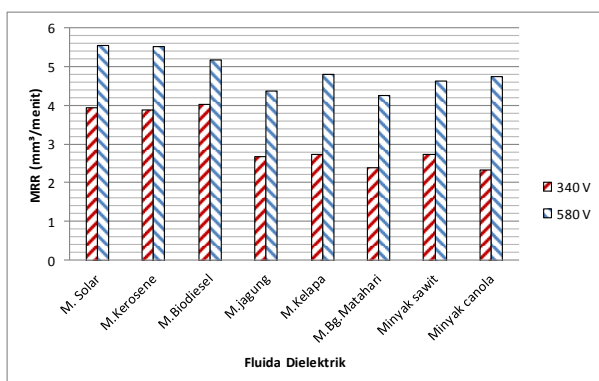
$$VWR = \frac{MRR}{EWR} \quad (5)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut tabel hasil olah data dari perhitungan rumus (3), (4) dan (5).

Tabel 2. Olah data untuk *MRR*, *EWR* dan *VWR*

No	Tegangan (Volt)	Dielektrik	MRR (mm ³ /Menit)				EWR (mm ³ /Menit)				VWR
			Percobaan			Average	Percobaan			Average	
	1		2	3	1		2	3			
1	340	Solar	4.0155	3.9463	3.8957	3.9525	0.3313	0.3475	0.368	0.3489	11.3284
2		Kerosene	3.4409	4.5222	3.7154	3.893	0.3822	0.4252	0.3121	0.3732	10.4319
3		Biodiesel	4.1350	4.0533	3.8628	4.017	0.3037	0.2874	0.4149	0.3353	11.9792
4		Minyak Jagung	2.3726	2.9546	2.7531	2.693	0.2626	0.2923	0.2395	0.2648	10.1716
5		Minyak Kelapa	2.7378	2.8886	2.5592	2.729	0.2512	0.2977	0.2807	0.2765	9.8669
6		Minyak Matahari	2.4144	2.1901	2.5367	2.380	0.2318	0.2459	0.2293	0.2357	10.1007
7		Minyak Sawit	2.8559	2.6338	2.7092	2.733	0.2286	0.2149	0.2197	0.2211	12.3626
8		Minyak Canola	2.3091	2.5823	2.0833	2.325	0.2926	0.1867	0.2151	0.2315	10.0442
1	580	Solar	5.9221	6.6362	5.1022	5.887	0.5104	0.5676	0.4513	0.5098	11.5481
2		Kerosene	6.1412	5.4547	4.9741	5.523	0.4097	0.3666	0.6187	0.4650	11.8781
3		Biodiesel	5.2277	5.2977	5.0591	5.195	0.4940	0.3066	0.4007	0.4004	12.9730
4		Minyak Jagung	4.3113	4.0318	4.7939	4.379	0.3106	0.3554	0.2822	0.3161	13.8547
5		Minyak Kelapa	4.737	4.9722	4.7532	4.821	0.3124	0.3454	0.3198	0.3259	14.7938
6		Minyak Matahari	4.4061	4.1072	4.2264	4.247	0.2865	0.2994	0.2856	0.2905	14.6181
7		Minyak Sawit	4.6553	4.5517	4.6599	4.622	0.3059	0.3109	0.3381	0.3183	14.5218
8		Minyak Canola	4.7342	4.6549	4.5926	4.661	0.3534	0.3228	0.312	0.3294	14.1487



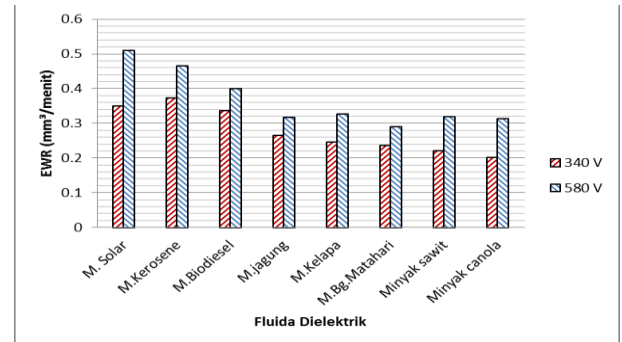
Gambar 4. Grafik MRR untuk beberapa jenis cairan dielektrik

Pembahasan

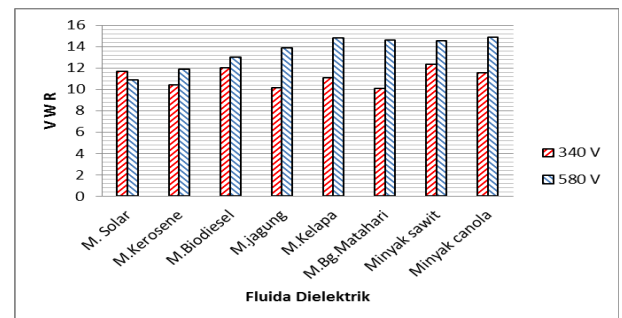
Material Removal Rate (MRR)

Pada Gambar 4 diperlihatkan bahwa pada tegangan 340 volt cairan dielektrik solar, biosolar dan kerosene besaran nilai MRR mengikuti pola besaran kekuatan dielektrik, tetapi pada minyak jagung, minyak kelapa, minyak sawit, minyak matahari dan minyak canola tidak sesuai pola besaran

kekuatan dielektrik, hal ini karena adanya polutan, ini yang menyebabkan tidak normalnya proses spark, karena pengaruh polutan yang terdapat diantara benda kerja dan elektroda, sehingga tegangan menjadi berkurang menyebabkan arus tidak optimal dan berdampak pada besaran nilai MRR dan EWR.



Gambar 5. Grafik EWR untuk beberapa jenis cairan dielektrik



Gambar 6. Grafik VWR untuk beberapa jenis cairan dielektrik

Pada tegangan 580 volt biosolar tidak mengikuti pola besaran *dielectric strength* hal ini terlihat pada Gambar 4, biodiesel menghasilkan MRR lebih rendah dari kerosene padahal *dielectric strength* biodiesel lebih besar dari kerosene. Hal ini akibat pengaruh polutan cairan dielektrik yang mempengaruhi kualitas sparknya. Hal yang sama terjadi pada minyak jagung dan minyak matahari dimana hasil MRR nya tidak mengikuti besaran pola *dielectric strength*, karena pengaruh polutan.

Electrode Wear Rate (EWR)

Pada tegangan 340 volt cairan dielektrik kerosene, minyak jagung, minyak kelapa, minyak matahari dan minyak sawit nilai *EWR* mengikuti pola besaran kekuatan dielektrik, tetapi pada cairan dielektrik solar, biosolar dan minyak canola tidak sesuai pola besaran kekuatan dielektrik, hal ini karena adanya polutan yang menyebabkan tidak normalnya proses spark, karena pengaruh polutan yang terdapat diantara benda kerja dan elektroda (gap), sehingga tegangan menjadi tidak maksimal menyebabkan arus tidak optimal dan berdampak pada turunnya besaran nilai EWR.

Pada tegangan 580 volt, solar, kerosene dan minyak sawit besaran nilai EWR mengikuti pola besaran *dielectric strength* hal ini terlihat pada gambar 5, akan tetapi biodiesel, minyak jagung, minyak kelapa, minyak matahari dan minyak canola tidak mengikuti pola besaran *dielectric strength*. Cairan dielektrik biodiesel terlihat menghasilkan EWR lebih rendah dari pada cairan dielektrik kerosene padahal *dielectric*



strength biodiesel lebih besar dari kerosene, hal yang sama terjadi pada cairan dielektrik minyak jagung, minyak kelapa, minyak matahari dan minyak canola dimana cairan dielektrik minyak sawit mempunyai dielectric strength lebih rendah. Hal ini akibat pengaruh polutan cairan dielektrik yang mempengaruhi kualitas sparknya. Akibatnya minyak jagung, minyak kelapa, minyak matahari dan minyak canola menghasilkan *EW*R yang tidak mengikuti besaran pola dielectric strength.

Untuk tegangan 340 Volt

Performansi	Terendah	Tertinggi
MRR (mm ³ /menit)	Minyak Canola 2,32	Solar 4,06
EW (mm ³ /menit)	Minyak sawit 0,22	Solar 0,34

Untuk tegangan 580 Volt

Performansi	Terendah	Tertinggi
MRR (mm ³ /menit)	Minyak Matahari 4,24	Solar 5,88
EW (mm ³ /menit)	Minyak Matahari 0,29	Solar 0,50

Performansi	Tegangan	Terendah	Tertinggi
VWR	340 Volt	Minyak Matahari 10,10	Minyak Sawit 12,36
VWR	580 Volt	Solar 11,54	Minyak Sawit 14,80

4. KESIMPULAN

Pengaruh tegangan dan variasi cairan dielektrik terhadap performansi *EDM Drilling Machine* dengan spark generator tipe relaksasi RC menghasilkan:

- *MRR* untuk tegangan 340 volt dengan nilai tertinggi 4,06 mm³/menit untuk cairan dielektrik solar dan terendah 2,32 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak *canola*. Pada tegangan 580 volt didapat nilai *MRR* tertinggi 5,88 mm³/menit untuk cairan dielektrik solar dan terendah 4,24 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak bunga matahari.
- *EW*R yang tertinggi pada tegangan 340 volt adalah 0,34 mm³/menit untuk cairan dielektrik solar dan terendah adalah 0,22 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak sawit. Sedangkan pada tegangan 580 volt didapat nilai *EW*R tertinggi 0,50 mm³/menit untuk cairan dielektrik minyak solar dan yang terendah adalah cairan dielektrik solar dengan nilai *EW*R 0,29 mm³/menit.
- *VWR* tertinggi pada tegangan 340 volt adalah 12,36 untuk cairan dielektrik minyak sawit dan terendah 9,87 untuk cairan dielektrik minyak kelapa, sedangkan pada tegangan 580 volt *VWR* tertinggi 14,8 pada cairan dielektrik minyak kelapa dan terendah adalah 11,54 untuk cairan dielektrik Solar. Jadi semakin tinggi *VWR* berarti semakin tinggi volume material benda kerja yang terbuang tetapi hanya sedikit terjadi keausan elektroda.
- Minyak mineral (Solar, Bio-solar dan kerosene) memberikan performansi produktivitas atau *MRR* yang tinggi, sedangkan minyak nabati memberikan keausan elektroda atau *EW*R yang rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pandey, P.C. and H.S.Shah, 1980, *Modern Machining Processes*. New Delhi: McGraw-Hill.
- [2] Prajapati, H.B. and H.R. Prajapati (2013), "Parametric Analysis of Material Removal Rate and Surface Roughness of Electro Discharge machining on EN 9". *Modern Engineering and Emerging Technology*, 2013. 1(1).
- [3] Suhardjono (2010), "Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Tegangan Terhadap Spark Gap Pada Proses EDM Sinking", Pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9, Palembang, Indonesia.
- [4] Abdul Latif dkk (2008), *Effects of Surface Roughness Using Different Electrodes on Electrical Discharge Machining (EDM)*, Faculty of Mechanical Engineering Universiti Malaysia Pahang.



PENINGKATAN SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS PERMUKAAN BAJA TAHAN KARAT AISI 410 DENGAN TEKNIK PLASMA HELIUM-METANA

Wahyu Anhar¹⁾, Viktor Malau²⁾, Tjipto Sujitno³⁾

Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada^{1,2)}

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator - BATAN³⁾

Jalan. Grafika No.2, Yogyakarta 555281, Indonesia^{1,2)}

Telp: (0274) 521673, Fax: (0274) 521673^{1,2)}

Jalan. Babarsari No.21, Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281, Indonesia³⁾

Telp: (0274) 488435, 484436, Fax: (0274) 487824³⁾

E-mail : wahyu.anhar@poltekba.ac.id¹⁾

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan kekerasan dan ketahanan aus pada permukaan baja tahan karat AISI 410 dengan lapisan helium-metana. Baja tahan karat AISI 410 digunakan sebagai bahan peralatan potong dan non-cutting pada peralatan bedah. Penggunaan baja tahan karat AISI 410 sebagai peralatan potong dan non-cutting diharapkan memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang baik. Kelemahan baja tahan karat AISI 410 adalah kekerasan dan ketahanan aus yang masih rendah, sehingga kedua sifat tersebut perlu ditingkatkan. Peningkatan kekerasan dan ketahanan aus permukaan baja tahan karat AISI 410 dapat dilakukan dengan teknik plasma chemical vapor deposition (CVD) menggunakan campuran gas helium-metana. Campuran gas helium-metana dilapiskan pada baja tahan karat AISI 410 pada temperatur 300 °C, tekanan 1,6 mbar dengan variasi waktu pelapisan yaitu 1, 2, 3, 4 dan 5 jam. Perbandingan campuran helium-metana adalah 76% helium dan 24% metana. Pengujian kekerasan menggunakan pengujian kekerasan mikro Vickers dengan beban penekanan 10 gram dan waktu penekanan 10 detik. Pengujian keausan menggunakan wear testing machine dengan beban 2,12 kg, kecepatan abrasi 0,25 m/s dan waktu abrasi 10 detik. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, didapatkan peningkatan kekerasan pada permukaan baja tahan karat AISI 410. Untuk raw material sebesar 184,3 VHN meningkat hingga mencapai kekerasan tertinggi sebesar 287,5 VHN yang dicapai pada waktu pelapisan 4 jam atau kekerasan permukaan meningkat 1,5 kali kekerasan raw material. Penambahan waktu pelapisan setelah waktu optimalnya menyebabkan penurunan kekerasan permukaan. Hasil uji keausan juga menunjukkan peningkatan ketahanan aus. Specific abrasion raw material sebesar $2,587 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ mencapai specific abrasion terendah sebesar $2,511 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ yang dicapai pada waktu pelapisan 4 jam. Penambahan waktu pelapisan melewati waktu optimalnya menyebabkan kenaikan specific abrasion permukaan.

Kata kunci: kekerasan, specific abrasion, AISI 410, plasma helium-metana.

1. PENDAHULUAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan kekerasan dan ketahanan aus pada permukaan baja tahan karat AISI 410 dengan lapisan helium-metana. Baja tahan karat AISI 410 digunakan sebagai bahan peralatan potong dan non-cutting pada peralatan bedah [1]. Penggunaan baja tahan karat AISI 410 sebagai peralatan potong dan non-cutting diharapkan memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang baik. Kelemahan baja tahan karat AISI 410 adalah kekerasan dan ketahanan aus yang masih rendah, sehingga kedua sifat tersebut perlu ditingkatkan. Peningkatan kekerasan dan ketahanan aus permukaan baja tahan karat AISI 410 dapat dilakukan dengan teknik plasma chemical vapor deposition (CVD) menggunakan campuran gas helium-metana.

Sifat permukaan baja tahan karat AISI 410 dapat ditingkatkan dengan menyeragamkan komposisi kimia, perbaikan mikrostruktur dan pengurangan pengkasaran karbida menggunakan laser surface-melting (LSM). Angka kekerasan pada permukaan meningkat menjadi 350 VHN [2]. Pada proses plasma CVD, pelapisan dapat dilakukan pada temperatur rendah berkisar 200°C. Penggunaan gas sebagai bahan pelapis menghasilkan lapisan yang lebih baik, dapat diaplikasikan pada substrat dengan bentuk permukaan yang rumit dan menghasilkan ketebalan lapisan yang merata [3]. Jumlah aliran metana berpengaruh terhadap pelapisan permukaan dengan plasma CVD. Laju pelapisan akan meningkat karena pengurangan jumlah aliran metana. Selain itu, jumlah aliran metana yang rendah akan mengurangi pembentukan grafit

[4]. Pelapisan permukaan menggunakan plasma CVD-RF dengan bahan pelapis acetylene-nitrogen dipengaruhi jumlah perbandingan kedua gas pelapis. Penurunan jumlah acetylene terhadap nitrogen menyebabkan penurunan kekasaran permukaan dan penurunan angka kekerasan. Penambahan tekanan pelapisan diatas 40 Pa (0,3 Torr) menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan dan tegangan sisa [5]. Pelapisan permukaan menggunakan plasma CVD-DC dengan bahan pelapis acetylene-hidrogen dilakukan pada tekanan 15 Torr dan temperatur 180°C. Substrat adalah tungsten (W) dan aluminium (Al). Pada kedua substrat terbentuk lapisan karbon dengan ikatan sp^2 dan sp^3 , tetapi pada substrat tungsten lebih banyak terdapat sp^3 . Selain itu, permukaan substrat tungsten menghasilkan lapisan lebih merata [6]. Pelapisan permukaan menggunakan plasma CVD dengan bahan pelapis acetylene, hidrogen dan helium dapat dilakukan pada tekanan atmosfer. Pelapisan dilakukan pada tekanan 800 Torr, temperatur antara 155 sampai dengan 200°C. Pelapisan menggunakan parameter tersebut menghasilkan lapisan karbon dengan komposisi 43% sp^2 dan 57% sp^3 [7].

2. METODOLOGI

Persiapan benda uji

Benda uji adalah baja tahan karat AISI 410. Komposisi kimia pada baja tahan karat AISI 410 seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Bentuk benda uji adalah lingkaran pejal dengan

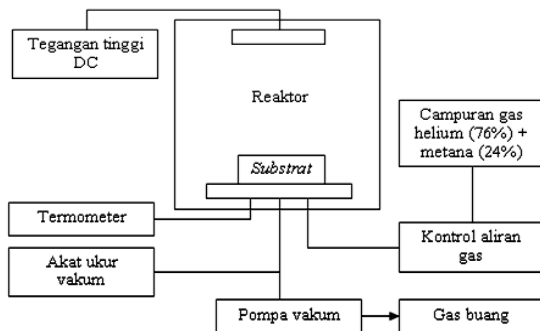
ukuran diameter 14 mm dan tebal 4 mm. Benda uji dilakukan pemolesan sebelum dilakukan pelapisan dan pengujian. Pemolesan menggunakan amplas dengan urutan kekasaran amplas (*grid*) 220, 400, 600, 800, 1000, 1500 hingga 2000. Langkah *finishing* pemolesan, benda uji dipoles menggunakan kain beludru (*velvet*) dengan pasta *metal polish* dan alkohol 96%. Khusus sebelum benda uji dilakukan pelapisan, dibersihkan kembali menggunakan *ultrasonic cleaner* milik PSTA-BATAN Yogyakarta dengan larutan alkohol 96% selama 15 menit.

Tabel 1. Komposisi kimia baja tahan karat AISI 410

Unsur	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Fe
Jumlah (%)	0,12	0,34	0,03	0,02	0,43	0,21	12,83	85,90

Pelapisan benda uji

Proses pelapisan menggunakan alat plasma CVD milik PSTA-BATAN Yogyakarta. Bahan pelapis menggunakan campuran gas helium dan gas metana. Perbandingan gas helium dengan gas metana adalah 76% helium dan 24% metana. Temperatur pelapisan adalah 300°C, tekanan pelapisan 1,6 mbar dan waktu pelapisan 1, 2, 3, 4, dan 5 jam. Pelapisan diawali dengan mengalirkan gas nitrogen dengan tekanan 1 mbar selama 5 menit tanpa dilakukan pemberian arus listrik. Tujuan pengaliran gas nitrogen untuk mendesak oksigen keluar dari reaktor. Perhitungan waktu pelapisan dimulai setelah temperatur mencapai 300°C dan tekanan mencapai 1,6 mbar.



Pengujian kekerasan mikro Vickers

Pengujian mikro Vickers menggunakan alat Matsuzawa digital micro hardness tester MMT-X7 milik PSTA-BATAN Yogyakarta. Pengujian dilakukan dengan beban 10 gram dan waktu indentasi selama 10 detik. Sebelum dilakukan pengujian kekerasan mikro Vickers pada benda uji, alat terlebih dahulu dilakukan kalibrasi. Proses kalibrasi menggunakan *standardized test block Asahi* dengan kode *block 74145*. Beban yang diberikan sebesar 200 gr dengan waktu indentasi 10 detik. Berdasarkan hasil kalibrasi alat didapatkan faktor koreksi sebesar 1,2.

Pengujian keausan

Pengujian keausan menggunakan alat Oghosi high speed universal wear testing machine (tipe OAT-U) milik Laboratorium Bahan Teknik UGM. Pengujian keausan menggunakan beban 2,12 kg, *abrasion speed* 0,25 m/s dan waktu pengujian 10 detik. Benda uji dibuatkan *holder* dari resin berbentuk segi 4 dengan ukuran 30 × 20 cm. Pengukuran panjang dan lebar *sliding* diukur dengan menggunakan bantuan mikroskop optik dengan perbesaran lensa 100 ×. Perhitungan *specific abrasion* menggunakan persamaan 1 [8].

Untuk perhitungan volume terabrasi dapat menggunakan persamaan 2.

$$W_s = 1,5 \times \frac{W}{P \times l} \quad (1)$$

dimana:

W_s : *specific abrasion* (mm³/kg. m)

W : volume terabrasi (mm³)

P : beban (kg)

l : jarak abrasi (m), diukur menggunakan bantuan mikroskop

$$W = B \cdot \left\{ r^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{b}{2r} \right) - \left(\frac{b}{2} \right) \sqrt{r^2 - \left(\frac{b^2}{4} \right)} \right\} \quad (2)$$

dimana:

B : tebal *disk* (mm)

r : jari-jari *disk* (mm)

b : panjang abrasi (mm)

Apabila panjang abrasi terlalu kecil dibandingkan dengan ukuran diameter *disk*, maka dapat menggunakan persamaan 3 untuk menghitung volume terabrasi.

$$W = \frac{B \times b^3}{12 \times r} \quad (3)$$

Perhitungan kedalaman difusi

Jarak difusi terhadap proses pelapisan dapat dihitung dengan persamaan 4 [9].

$$x = \sqrt{D \times t} \quad (4)$$

dimana:

x : kedalaman difusi (m)

D : koefisien difusi (m²/s)

t : waktu (detik)

Perhitungan koefisien difusi dapat menggunakan persamaan 5.

$$D = D_o \cdot \exp \left(- \frac{Q_d}{R \cdot T} \right) \quad (5)$$

dimana:

D_o : koefisien difusi pada keadaan standar (m²/s)

Q_d : energi aktivasi (KJ/mol)

R : konstanta gas (8,314 J/mol.K)

T : temperatur absolut (K)

Penelitian ini menggunakan data D_o sebesar $6,2 \times 10^{-7}$ m²/s, Q_d sebesar 80 KJ/mol, waktu 4 jam dan temperatur 300°C.

Pengamatan SEM dan uji EDS

Pengamatan SEM dan uji EDS menggunakan alat JEOL JSM-6510LA milik LPPT UGM. Benda uji dipotong melintang menggunakan *Isomet low speed saw Buehler* milik Laboratorium Bahan Teknik UGM dengan ketebalan potongan 5 mm. Benda uji yang telah dipotong dibuatkan *holder* dari resin untuk memudahkan pemegangan pada waktu pemolesan. Benda uji dilakukan pemolesan dengan amplas *grid* 1500. Setelah dilakukan pemolesan, benda uji dietsa menggunakan campuran larutan HNO₃ dan HCl. Perbandingan campuran larutan etsa adalah 50% HNO₃ dan 50% HCl.

Pengujian kekasaran permukaan

Pengujian kekasaran permukaan menggunakan alat *Surfcom* 120A milik Laboratorium Bahan Teknik UGM.

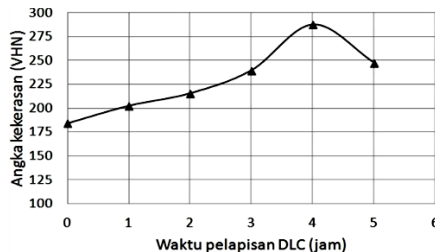
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekerasan permukaan

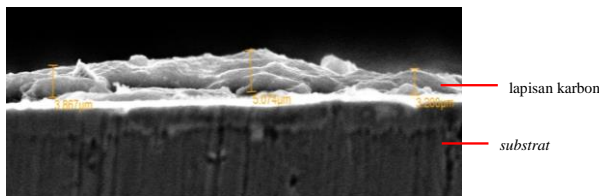
Gambar 2 menunjukkan pengaruh waktu pelapisan terhadap angka kekerasan permukaan baja tahan karat AISI 410. Angka kekerasan *raw material* baja tahan karat AISI 410

adalah 184,3 VHN. Tekanan pelapisan 1,6 mbar menghasilkan angka kekerasan tertinggi sebesar 287,5 VHN pada waktu pelapisan 4 jam. Penambahan waktu pelapisan menyebabkan penurunan angka kekerasan.

Peningkatan angka kekerasan permukaan baja tahan karat AISI 410 karena telah terbentuk lapisan karbon pada permukaan baja tahan karat AISI 410 dengan ketebalan lapisan berkisar 4,047 μm . Bentuk lapisan seperti ditunjukkan Gambar 3.

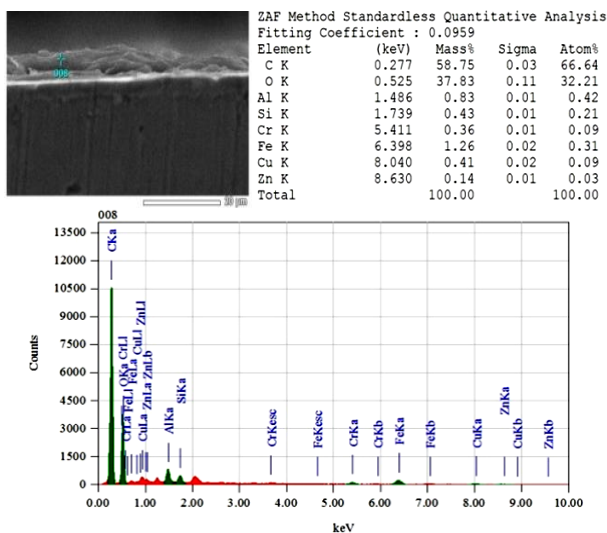


Gambar 2. Pengaruh waktu pelapisan terhadap angka kekerasan



Gambar 3. Lapisan karbon pada permukaan *substrat* (tekanan pelapisan 1,6 mbar; waktu 4 jam)

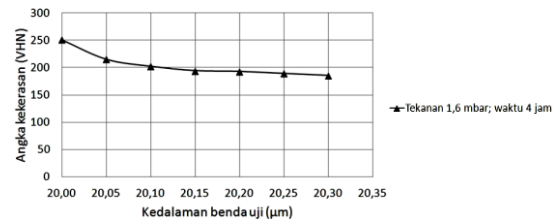
Berdasarkan uji EDS seperti pada Gambar 4, lapisan yang terbentuk adalah lapisan karbon (dominan grafit). Terdapat unsur karbon sebesar 58,75% pada lapisan. Penambahan unsur karbon pada permukaan baja tahan karat AISI 410 meningkatkan kekerasan permukaan. Selain itu, antara lapisan dengan *substrat* telah terjadi difusi karena terdapat unsur Fe sebesar 1,26% di daerah lapisan. Penambahan waktu pelapisan menyebabkan lapisan mulai berbentuk *amorf* secara teratur sehingga terjadi penurunan kekerasan [10]. Pada pembentukan lapisan karbon *amorf*, atom karbon tidak hanya terikat dalam lembaran-lembaran kisi heksagonal (grafit) tetapi juga mulai terikat dalam susunan kisi tetrahedral (intan).



Gambar 4. Komposisi unsur pada lapisan

Kekerasan potongan melintang

Uji kekerasan potongan melintang Gambar 5 menunjukkan bahwa kekerasan *raw material* dicapai pada kedalaman 20,3 μm dari permukaan. Permukaan *substrat* mengalami peningkatan kekerasan karena atom karbon terdifusi ke dalam baja tahan karat AISI 410. Kedalaman pengujian kekerasan potongan melintang dimulai dari 20 μm karena berdasarkan Gambar 6 perbandingan ukuran indentor terhadap kedalaman dimulai berkisar $\sim 20 \mu\text{m}$. Berdasarkan persamaan 4 dan 5 didapatkan kedalaman difusi atom karbon sebesar 21,32 μm . Hasil eksperimen sebesar 21,3 μm mendekati hasil perhitungan kedalaman difusi.



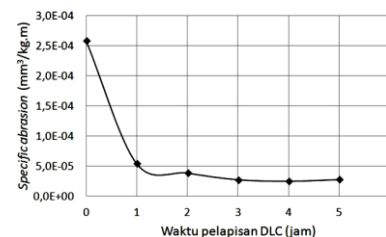
Gambar 5. Angka kekerasan terhadap kedalaman benda uji



Gambar 6. Perbandingan ukuran indentor terhadap kedalaman benda uji

Ketahanan aus permukaan

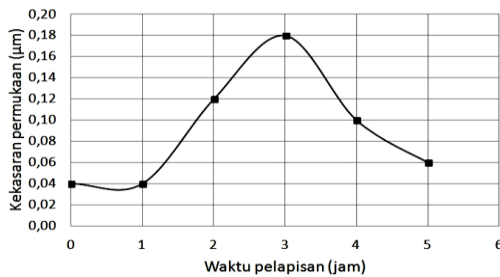
Gambar 7 menunjukkan terjadi peningkatan ketahanan aus pada baja AISI 410. Ketahanan aus ditunjukkan dengan penurunan angka *specific abrasion*. *Specific abrasion* pada *raw material* baja AISI 410 adalah $2,587 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$. Tekanan pelapisan 1,6 mbar menghasilkan *specific abrasion* terkecil $2,511 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ untuk waktu pelapisan 4 jam. Angka kekerasan mempengaruhi ketahanan aus pada permukaan benda uji, sehingga kenaikan angka kekerasan akan menurunkan *specific abrasion* [10].



Gambar 7. Pengaruh waktu pelapisan terhadap *specific abrasion*

Berdasarkan uji kekasaran permukaan seperti Gambar 8, angka kekasaran permukaan *raw material* adalah 0,04 μm . Angka kekasaran permukaan tertinggi sebesar 0,18 μm untuk waktu pelapisan 3 jam. Penambahan waktu pelapisan

menurunkan angka kekasaran permukaan. Awal pelapisan akan menghasilkan angka kekasaran permukaan yang lebih tinggi daripada angka kekasaran *substrat*. Penambahan waktu pelapisan menyebabkan penambahan ketebalan lapisan sehingga menurunkan angka kekasaran permukaan [11]. Kekasaran permukaan yang terjadi untuk semua waktu pelapisan berkisar dan di bawah $0,1 \mu\text{m}$ menyebabkan keausan yang terjadi adalah keausan *adhesive* ditandai adanya bekas goresan (*striation*) sepanjang jalur gesekan dan juga disertai keausan abrasi [12].



Gambar 8 Pengaruh waktu pelapisan terhadap kekasaran permukaan

4. KESIMPULAN

Pelapisan dengan teknik plasma CVD helium-metana dapat menghasilkan lapisan karbon pada permukaan baja tahan karat AISI 410. Berdasarkan uji kekerasan permukaan terjadi peningkatan angka kekerasan. *Raw material* memiliki angka kekerasan sebesar 184,3 VHN meningkat menjadi 287,5 VHN untuk waktu pelapisan 4 jam. Penambahan waktu pelapisan menyebabkan penurunan angka kekerasan permukaan. Hasil uji keausan juga menunjukkan peningkatan ketahanan aus ditandai dengan penurunan *specific abrasion*. *Raw material* memiliki *specific abrasion* sebesar $2,587 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ menurun menjadi $2,511 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$ untuk waktu pelapisan 4 jam. Penambahan waktu pelapisan menyebabkan peningkatan *specific abrasion*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASTM F 899-95, *Standard Specification for Stainless Steel Billet, Bar, and Wire for Surgical Instruments*.
- [2] Krishna, B.V., Bandyopadhyay, A., *Surface modification of AISI 410 stainless steel using laser engineered net shaping (LENSTM)*, Materials and Design 30, 2009, hal. 1490-1496.
- [3] Oohira, *Characteristics and applications of DLC films*, NTN Technical Review No.77, 2009, hal. 90-95.
- [4] Viana, G.A., Motta, E.F., da Costa, M.E.H.M., Freire Jr., F.L., Marques, F.C., *Diamond-like carbon deposited by plasma technique as a function of methane flow rate*, Diamond & Related Materials 19, 2010, hal. 756-759.
- [5] Tzeng, S.S., Fang, Y.L., Chih, Y.K., Hu, Y.G., Hsu, J.S., Wu, C.L., Wu, G.W., *Surface characterization and nanomechanical properties of diamond-like carbon films synthesized by RF plasma enhanced chemical vapor deposition*, Thin Solid Films 519, 2011, hal. 4870-4873.
- [6] Vaghri, E., Khalaj, Z., Ghoranneviss, M., Borghei, M., *Characterization of Diamond-Like Carbon Films Synthesized by DC-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*, Journal Fusion Energy 30, 2011, hal. 447-452.
- [7] Ladwig, A.M., Koch, R.D., Wenski, E.G., Hicks, R.F., *Atmospheric plasma deposition of diamond-like carbon coatings*, Diamond & Related Materials 18, 2009, hal. 1129-1133.
- [8] Manual Book of Oghosi, High Speed Universal Wear Testing Machine (Type OAT-U), Tokyo Testing Machine MFG Co Ltd.
- [9] Callister Jr.W.D, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, edisi kelima, John Wiley and Sons Inc., New York, 2001.
- [10] Shen L.R., Wang, K., Tie, J., Tong, H.H., Chen, Q.C., Tang, D.L., Fu, R.K.Y., Chu, P.K., *Modification of high-chromium cast iron alloy by N and Ti ion implantation*, Surface & Coatings Technology 196, 2005, hal. 349-352.
- [11] Salvadori, M.C., Martins, D.R., Cattani, M., *DCL coating roughness as a function of film thickness*, Surface & Coatings Technology 200, 2006, hal. 5119-5122.
- [12] Jiang, J., Arnell, R.D., *The effect of substrat surface roughness on the wear of DLC coatings*, Wear 239, 2000, hal. 1-9.

STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK KEAUSAN PERMUKAAN AKIBAT MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION

Yusuf Kaelani¹⁾, Muhammad Hasry²⁾

Jurusan Teknik Mesin^{1,2)}

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Jalan. Arif Rahman Hakim Gedung C, Surabaya 60111, Indonesia^{1,2)}

Phone: 0062-31-5922941, Fax: 0062-31-5922941^{1,2)}

E-mail : y_kaelani@me.its.ac.id¹⁾, muhammad.hasry@yahoo.com²⁾

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji karakteristik keausan akibat gesekan ke segala arah (*Multi-directional Contact Friction*). Keausan yang timbul karena gesekan satu arah memiliki pola berbeda dengan gesekan dua arah, dan karakteristik keausannya berbeda pula dengan gesekan ke segala arah. Penelitian ini secara eksperimentasi menguji wear rate material Ultra High Molecular Weight Poly-Ethylene (UHMWPE) yang kontak secara terus menerus dengan stainless steel ke berbagai arah lintasan. Metodologi yang dilakukan adalah dengan menggunakan tribometer Pin-on-Disk. Disamping disk yang berputar pada sumbunya, pin juga berputar pada sumbunya. Lintasan yang dibentuk oleh sebuah titik dipermukaan pin (permukaan kontak pin-disk) dikaji kinematika lintasannya. Ratio putaran disk-pin mempengaruhi lintasan dan arah dan besar kecepatan titik tersebut. Variasi rasio disk-pin disesuaikan dengan spesifikasi mesin yaitu 6.7, 10.7 dan 16.5. Kondisi kontak permukaan divariasikan pula yaitu kondisi *dry* dan *lubricated*. Beban gaya normal kontak dibuat tetap 40 N. Jarak lintasan relatif kontak antara pin dengan disk sebesar 600 meter. Berat material aus selanjutnya dicatat dengan menghitung selisih berat massa sebelum dan sesudah pengujian. Dengan data volume aus inilah akan dianalisa *specific wear rate*. Selanjutnya permukaan kontak diambil fotomikro untuk dianalisa mekanisme keausan yang dialami material pin. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan terlihat bahwa gesekan *Multi-Directional* akan menghasilkan keausan yang lebih besar dibanding gesekan satu arah (*Uni-Directional Friction*). *Specific wear rate* material secara kualitatif akan tinggi apabila didalam variasi gerakan mengalami berhenti. Besar *specific wear rate* material akan semakin meningkat seiring dengan berubahnya rasio kecepatan dari 6.7 menjadi 10.7 (dari $3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ menjadi $3.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$). Namun, laju keausan akan mengalami penurunan ketika rasio kecepatan berubah dari 10.7 menjadi 16.5 ($3.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$). Dari analisa polygon vector pada ratio 10.7 tersebut terdapat bagian titik yang mengalami kecepatan nol berulang-ulang. Fotomikro menunjukkan bekas lintasan aus akibat proses abrasi. Tidak ditemukan mekanisme adhesi ataupun fatigue.

Kata kunci: *Multi-directional Contact Friction, Specific Wear Rate, Pin-on-disk Tribometer dan Kinematika Lintasan*

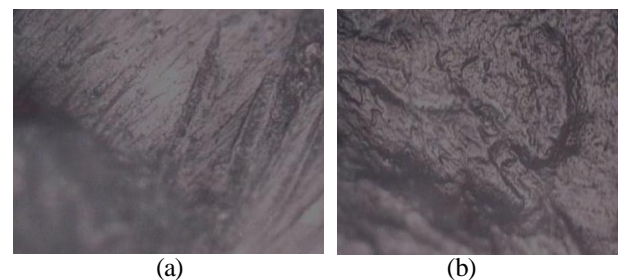
1. PENDAHULUAN

Latar belakang penelitian ini dilakukan adalah bahwa pada studi sebelumnya, Kaelani beserta Dwitarina W telah mengkaji keausan yang terjadi pada material polimer resin akrilik yang biasa digunakan untuk gigi palsu (*dental prosthesis*). Pada penelitian ini komposit resin akrilik yang ditambah dengan serat fiber diuji kontak dengan material sama dengan arah kontak satu arah (*uni directional*) dan bolak-balik (*reciprocating*). Hasil uji yang diperoleh menjelaskan bahwa karakteristik keausan yang terjadi pada material polimer memiliki kesamaan pola dengan keausan yang terjadi pada kontak permukaan logam dengan logam. Fotomikro yang diperoleh pada penelitian tersebut menyimpulkan proses abrasi dan adhesi dalam bentuk delaminasi permukaan. Wear rate menunjukkan harga yang berbeda. Kontak gesekan *reciprocating* memiliki laju keausan yang lebih tinggi dari pada gesekan satu arah. Selanjutnya, pada penelitian tersebut menyimpulkan bahwa delaminasi yang timbul pada ujung lintasan diduga akibat fenomena *stick-slip*. Fotomikro yang diperoleh pada penelitian tersebut menyimpulkan proses abrasi dan delaminasi.

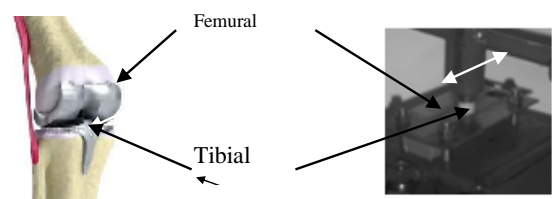
Sifat delaminasi ini muncul berawal dari *adhesive wear*, dan selanjutnya didukung adanya ketidakmenyatuan serat fiber dengan resin.

Pada makalah lain, Yusuf Kaelani beserta Devieka Andesi dan Femi Adisurya menulis dalam penelitiannya tentang kajian

tribologi material Hydroxyapatite terhadap permukaan logam pada sendi tulang buatan. Didalam penelitian ini, model prosthesis sendi lutut femoral berupa pelat stainless steel sedangkan tibial berupa material polimer hydroxiapatite.



Gambar 1. (a) Abrasi pada Polimer Akrilik (b) Delaminasi pada Akrilik



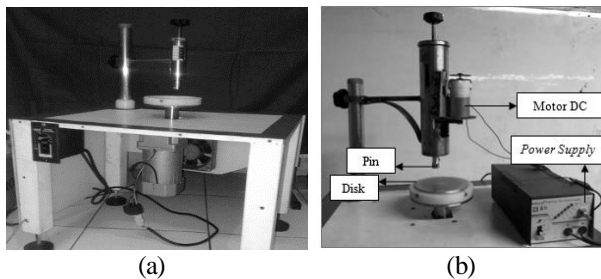
Gambar 2. Model Knee Joint Prosthesis dan Reciprocating Tribometer

Hasil penelitian ini memberikan harga specific wear rate hydroxyapatite dengan beberapa prosentase komposisi resin. Sifat brittle material tidak menunjukkan gejala delaminasi. Kesimpulan angkat adalah bahwa dominasi keausan disebabkan mekanisme abrasive wear.

Gesekan yang ke segala arah (multi-directional) pada bio-mechanic pada khususnya dan pada permesinan pada umumnya sangat mungkin terjadi. Dental prosthesis (gigi palsu) lebih banyak mendapatkan beban gesekan ke segala arah. Dari sinilah penelitian ini dilakukan dengan mengkaji multi-directional contact friction tanpa menghadirkan serat fiber yang diduga kuat memperburuk mekanisme delaminasi.

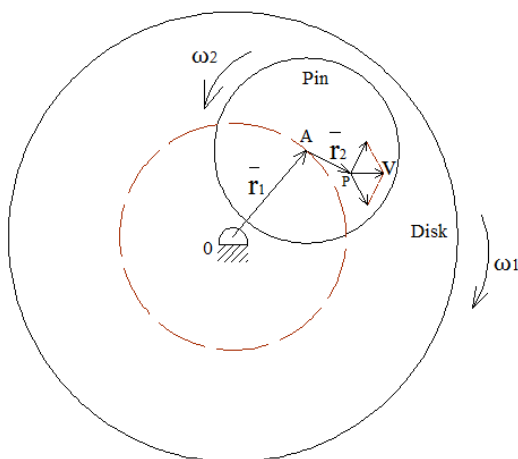
2. METODOLOGI

Tribometer multi-directional contact friction yang digunakan adalah modifikasi uni-directional contact friction tribometer. Load cell pada tribometer satu arah dibuat pin berotasi pada sumbunya. Disaat disk berputar (ω_1 -Clockwise) pin juga ikut diputar (ω_2 -Counter Clockwise) oleh motor DC tambahan. Apabila motor pin tidak diaktifkan maka tribometer bekerja uni-directional.

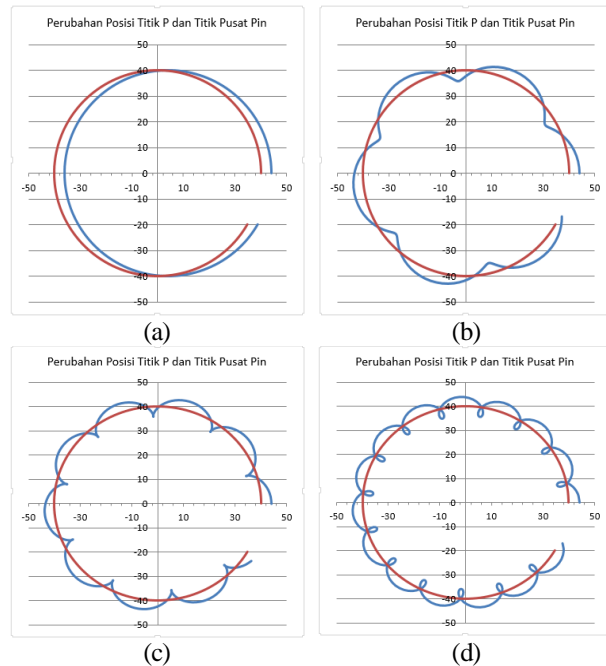


Gambar 3. (a) Tribometer Uni-Directional (b) Tribometer Multi-Directional (Modifikasi)

Kinematika lintasan titik kontak pada Multi-directional (MD) tribometer dapat dijelaskan dibawah ini. Pin diposisikan berjarak r_1 dari pusat putaran disk. Bilasebuah titik P yang berada pada pin berjarak r_2 dari pusat putaran pin dan selanjutnya pin diputar maka akan ada empat kemungkinan pola lintasan. Pola I adalah bila pin tidak berotasi Gambar 5a. Gerakan pin akan menyerupai gerakan satu arah. Pola dengan variasi ratio putaran pin terhadap disk rendah, menengah dan tinggi diilustrasikan Gambar 5b, 5c dan 5d.



Gambar 4. Skema posisi Disk dan Pin



Gambar 5. Empat Pola lintasan MD Tribometer (a)

Spesimen uji dipilih Ultra High Molecular Weight Poly-ethylene (UHMWPE). Alasan pemilihan material ini adalah penggunaan yang sering dijumpai pada material prosthesis. Beban normal spesimen dibuat konstan 4 kg (40 N) dan jarak lintasan tempuh kontak pin (sumbu pin) terhadap disk dibuat 600 meter. Radius r_1 diberikan harga 4 cm dan $r_2 = 0.5$ cm. Gambar 5(a),(b), (c), dan (d) mengilustrasikan lintasan yang dialami titik P dengan variasi ratio putaran pin/disk. (putaran motor DC (a) $\omega_{pin} = 0$, (b) $\omega_{pin} = 6.7 \times \omega_{disk}$, (c) $\omega_{pin} = 10.7 \times \omega_{disk}$, dan (d) $\omega_{pin} = 16.5 \times \omega_{disk}$). Specimen uji pin yang telah diuji diukur massa dan volume keausannya dengan menimbang sebelum dan sesudah pengujian. Ratio putaran pada pengujian ini dipakai sebagai berikut: Rasio 0, 6.7, 10.7, dan 16.5

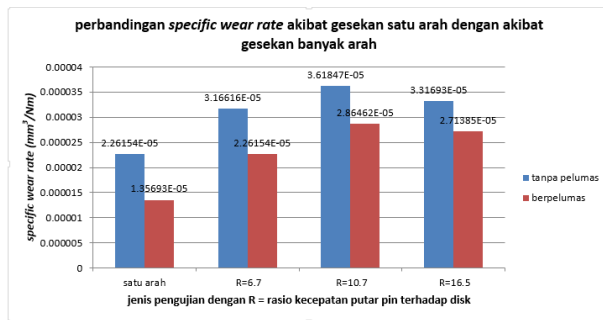
Selanjutnya perubahan volume akibat keausan kontak permukaan diukur dengan menimbang perubahan berat sebelum uji dan setelah uji. Hubungan antara beban normal (W), volume aus (V), jarak lintasan (L), dan kekerasan permukaan (H) dengan laju keausan adalah sebagai berikut. $V/L = k W/H$ dimana k adalah wear coefficient.

Karakter kontak dan mekanisme keausan dikaji dari bekas jejak kontak. Pengambilan foto mikro dilakukan hingga perbesaran 400 kali.

Pengujian keempat pola dilakukan juga terhadap kontak dengan menghadirkan pelumas. Selanjutnya volume aus masing-masing kondisi pengujian dibandingkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa pola lintasan sangat mempengaruhi keausan material polimer yang significant. Gesekan uni satu arah menunjukkan volume aus yang paling kecil. Gesekan multi directional dengan ratio $\omega_2/\omega_1 = 10.7$ menunjukkan tingkat keausan yang paling besar, lebih besar dari gesekan rasio 6.7 dan 16.5. Dengan memasukkan data rerata wear volume ke persamaan dasar specific wear rate coefficient, maka harga laju keausan masing-masing volume fraksi sebagai berikut.



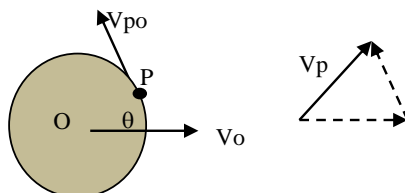
Gambar 6. Grafik Specific Wear Rate Berbagai Ratio

Dari pengujian kondisi tanpa pelumasan, specific wear rate dengan ratio putaran 6.7 sebesar $3.16 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, ratio 10.7 sebesar $3.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, dan ratio 16.5 sebesar $3.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Untuk pengujian dengan pelumasan, diperoleh specific wear rate dengan ratio putaran 6.7 sebesar $2.26 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, ratio 10.7 sebesar $2.86 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, dan ratio 16.5 sebesar $2.71 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

Untuk pengian uni directional (ratio putaran = 0) pada pengujian tanpa pelumasan, didapat specific wear rate untuk material UHMWPE sebesar $2.26 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ dan sebesar $1.35 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ pada kondisi dengan pelumasan.

Diskusi

Besarnya volume keausan pada ratio 10.7 diduga diakibatkan oleh fenomena stick-slip kontak permukaan. Fenomena stick-slip ini dapat dijelaskan dari sisi kinematika yang dialami oleh titik P. Bila kecepatan absolut titik P (pada posisi sudut θ terhadap sumbu X positif) dinotasikan V_p , kecepatan sumbu pin relatif terhadap disk V_o dan kecepatan relative titik P terhadap sumbu pin V_{po} , maka poligon vektor posisi tersebut sebagai Gambar 7 berikut.



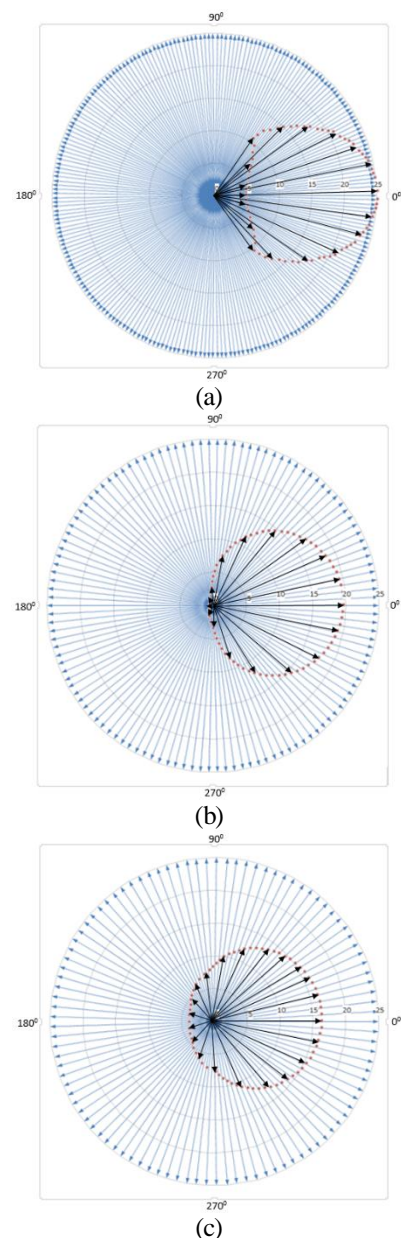
Gambar 7. Skema Permukaan Kontak Pin, Titik P dan Poligon Kecepatan

Bila posisi P bergerak satu lingkaran penuh maka vektor kecepatan untuk masing-masing ratio diilustrasikan pada Gambar 8. Lingkaran merah yang menghubungkan ujung-ujung vektor resultan menunjukkan variasi besaran kecepatan. Pada ratio 6.7 tersebut (Gambar 8a) arah vektor kecepatan P selalu mengarah ke kanan dengan besaran yang relative besar. Pada gambar 7.b, besaran vektor bervariasi dari maksimum di sumbu X positif hingga minimum di sudut θ sama dengan 90° hingga 270° . Pada range sudut ini titik P relative diam. Selanjutnya P bergerak lagi dengan arah vektor ke kanan.

Pada gambar 8(c) (ratio putaran 16.5), vektor kecepatan P mengarah ke semua arah. Pada ratio ini titik P tidak pernah mengalami kecepatan nol (berhenti). Sehingga fenomena stick-slip tidak terjadi pada kondisi pengujian ini. Oleh karena itu volume aus yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan ratio 10.7.

Fenomena stick-slip sering kali terjadi pada gerak gesekan

reciprocating. Pada ujung lintasan gerak reciprocating memiliki kedalaman yang lebih besar dibandingkan pada titik-titik di sepanjang lintasan. Pada ujung-ujung lintasan, kontak permukaan memiliki kecepatan nol. Contact friction berubah dari kinetic ke static dan ke kinetic lagi dalam waktu yang relatif singkat. Perubahan inilah bagi material lunak (UHMWPE) memicu terjadi mekanisme fatigue wear dan delaminasi lapisan atas. Hal ini terjadi pula pada ratio 10.7 (gambar 8(b)). Apabila dilihat pola gerakan titik P tersebut, kontak permukaan kinetic ke static dan ke kinetic lagi dalam waktu relatif singkat juga terjadi. Perbedaan terletak pada perubahan arah kecepatan. Pada Multi Direction ini perubahan arah vektor kecepatan lebih perlahan. Perubahan yang perlahan ini dapat menghindari fatigue wear.

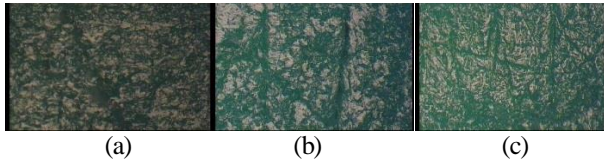


Gambar 8. Berbagai Arah Kecepatan yang Dialami Titik P: (a) Ratio 6.7 (b) Ratio 10.7 (c) Ratio 16.5

Foto mikro perbesaran 400 kali hasil permukaan kontak menunjukkan mekanisme wear lebih didominasi keausan abrasi. Sekilas tidak ada perbedaan yang mendasar pada proses keausan. Jejak abrasi masing-masing foto terlihat jelas.

Pada ratio 10.7 (Gamabr 9b) memberi informasi bahwa permukaan asperities yang telah mengalami kontak lebih luas dibandingkan dengan asperities ratio lainnya. Hal ini meyakinkan bahwa stick-slip pada ratio tersebut benar terjadi meskipun intensitas dan efeknya kecil.

Goresan material debris ke segala arah terlihat jelas pada Gambar 9c. Pengaruh pengujian multi-directional sangat kuat. Pada gambar, asperities dengan gejala pengelupasan ataupun pengaruh fatigue tidak terlihat jelas. Keausan yang terjadi meninggalkan asperities yang relative lebih halus dibandingkan dengan ratio yang lebih rendah (Gambar 9b dan 9c).



Gambar 9. Foto Mikro Permukaan Kontak Perbesaran 400x: (a) Ratio 6.7 (b) Ratio 10.7 (c) Ratio 16.5

Fotomikro permukaan kontak gesekan dengan pelumasan kurang memberi informasi tambahan mengenai fenomena didiskusikan diatas. Hal ini disebabkan karena sifat material polyethylene yang mudah menyerap cairan sehingga jejak abrasi berwarna lebih gelap Gambar 10.



Gambar 10. Foto Mikro Perbesaran 400x Permukaan Kontak dengan Pelumasan (a) Ratio 6.7 (b) Ratio 10.7 (c) Ratio 16.5

4. KESIMPULAN

Hasil dari penelitian yang telah dilakukan terlihat bahwa gesekan Multi-Directional akan menghasilkan keausan yang lebih besar dibanding gesekan satu arah (Uni-Directional Friction). Specific wear rate material secara kualitative akan tinggi apabila didalam variasi gerakan mengalami berhenti. Besar specific wear rate material akan semakin meningkat seiring dengan berubahnya rasio kecepatan dari 6.7 menjadi 10.7 (dari $3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ menjadi $3.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$). Namun, laju keausan akan mengalami penurunan ketika rasio kecepatan berubah dari 10.7 menjadi 16.5 ($3.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$). Dari analisa polygon vector pada ratio 10.7 tersebut terdapat bagian titik yang mengalami kecepatan nol berulang-ulang. Fotomikro menunjukkan bekas lintasan aus akibat proses abrasi. Tidak ditemukan mekanisme adhesi ataupun fatigue.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kaelani Y. Dwitarina, Laju Keausan (Specific Wear Rate) Material Resin Akrilik dengan Penambahan Serat Penguat pada Dental Prosthesis, Proceeding SNTTM XI, UGM, Yogyakarta, Oktober. , (2012)
- [2] Kaelani, Yusuf, (2011), Kajian Tribologi Material Disk pada Groningen Mandibular Prosthesis, Preceeding SNTTM X, 884-892, (2011)

- [3] P.S.M. Barbour, D.C. Barton, J. Fisher, The influence of contact stress on the wear of UHMWPE for total replacement hip prostheses, *Wear*, Volumes 181-183, Part 1, February 1995, Pages 250-257
- [4] Bin-Bin Jia, Thong-Sheng Li, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Chong, Tribological Behaviour of Several Polymer-polymer Sliding Combination under Dry Friction and Oil-Lubricated Condition, *Wear*, Volume 262, Issues January 2007, Pages 1353-1359
- [5] Margam Chandrasekaran, Lee Yong Wei, Krishna Kumar Venkateshwaran, Andrew William Batchelor, Nee Lam Loh, Trybology of UHMWPE Tested Against Stainless Steel Counterface in Unidirectional Sliding in Presence of Model Sinovial Fluids (part 1) *Wear*, Volume 223, Issues 1-2, December 1998, Pages 13-21
- [6] T. Sawano, T. Murakami, Y. Sawae, Evaluation of wear resistance of ultra-high molecular weight polyethylene for joint prostheses in the multi-directional pin-on-plate tester, *Tribology and Interface Engineering, Series*, Volume 48, 2005, Pages 161-169.



RANCANG BANGUN *RIVET JOINT MACHINE* DENGAN METODE *FUNCTIONAL MODELLING* PADA PERANCANGAN KONSEPTUAL

Beni Tri Sasongko¹⁾, Taufiq Hidayat²⁾, Muslim Mahardika³⁾

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada^{1,2,3)}

Jalan. Grafika No.2, Yogyakarta 55281. Indonesia^{1,2,3)}

Phone: +6285643593838¹⁾

E-mail: beni_trisasongko@yahoo.com¹⁾, taufiq_cnc@yahoo.co.id²⁾, muslim_mahardika@yahoo.com³⁾

ABSTRAK

Rivet joint machine merupakan mesin perkakas yang digunakan dalam proses pengelingan pada sambungan produk kerajinan aluminium. Penelitian ini melakukan proses perancangan dan manufaktur *rivet joint machine* dengan metode yang sederhana, dimana difokuskan pada spesifikasi mesin perkakas dengan teknologi skala produksi. Pada penelitian ini perancangan dilakukan dengan menggunakan metode *functional modelling*, sehingga solusi konsep yang dihasilkan dalam perancangan konseptual menjadi lebih optimal. Penelitian ini dilaksanakan melalui lima tahapan proses; perancangan konseptual, manufaktur, perakitan, alignment, dan pengujian hasil pengelingan. Pengujian hasil penekanan paku keling yang terbuat dari bahan aluminium pada dua buah plat dengan variasi diameter paku keling 3 mm, 4 mm, dan 5 mm dilakukan menggunakan mesin uji tarik untuk memperoleh nilai kekuatan tarik, dimana untuk paku keling diameter 3 mm, 4 mm, dan 5 mm masing-masing menghasilkan kekuatan tarik sebesar 10,24 kg/mm², 12,7 kg/mm², 13,2 kg/mm².

Kata kunci: *rivet joint machine*, *functional modelling*, perancangan konseptual, kuat tarik, dan kuat geser.

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini, pertumbuhan ekonomi nasional semakin meningkat. Hal ini mendorong dalam pemenuhan kebutuhan primer, sekunder, maupun tersier. Untuk memenuhi kebutuhan masyarakat tersebut, industri manufaktur memegang peranan penting dalam penyediaan barang-barang yang berkualitas. Dalam industri manufaktur, sistem mekanisasi terus dikembangkan untuk menekan biaya produksi dan menjaga keseragaman kualitas produk.

Dengan perkembangan sistem mekanisasi, di mana teknologi mesin menjadi kunci utamanya, menjadikan proses produksi lebih efektif dan efisien. Sistem mekanisasi dalam proses manufaktur tidak hanya ditemui dalam skala industri-industri berskala besar, namun sistem ini dapat diterapkan juga dalam industri kecil menengah. Dengan penerapan sistem mekanisasi, produk-produk industri kecil menengah diharapkan tidak hanya memenuhi kebutuhan lokal, namun produk tersebut juga diharapkan mampu bersaing dengan produk industri besar karena adanya standarisasi produk hasil sistem mekanisasi. Pada akhirnya, sistem ini dapat mendorong dunia usaha kecil menengah untuk mengembangkan usaha menjadi lebih maju, sehingga kesejahteraan dapat dinikmati pada berbagai lapisan masyarakat.

Salah satu contoh usaha kecil menengah yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah industri pengecoran aluminium di daerah Giwang kota Yogyakarta, yang menjadi sentral untuk kerajinan aluminium dengan produk berupa alat-alat rumah tangga. Saat ini, industri tersebut sebagian besar dilakukan dalam skala menengah, dengan sector local dan daerah di luar Yogyakarta sebagai daerah pemasarannya. Dengan menggunakan bahan dasar aluminium bekas, para pengrajin membuat panci, wajan, ketel, cetakan kue, dan peralatan rumah tangga lainnya melalui tahapan proses yang berupa proses peleburan bahan aluminium, penuangan ke cetakan, serta proses *finishing*. Proses-proses tersebut sebagian besar pengerjaannya masih menggunakan alat bantu atau mesin yang sangat sederhana bahkan ada beberapa dari proses akhir tersebut masih dengan

menggunakan tenaga manusia. Pengelingan adalah merupakan salah satu tahapan dari proses finishing yang mana sangat menentukan kualitas dari produk yang dihasilkan. Kualitas dari produk hasil *finishing* sangat berpengaruh terhadap nilai jual dari produk yang dihasilkan.

Dari hasil pengamatan dan survei yang telah penulis lakukan, beberapa proses yang dikerjakan secara manual menyebabkan hasil akhir yang kurang baik dari segi kualitas maupun kuantitas. Perkembangan terkini salah satu proses akhir yang berupa pemasangan pegangan pada wajan di "WL Aluminium" masih dilakukan dengan teknik manual, dimana paku keling dipukul menggunakan tenaga manusia sehingga menyebabkan hasil yang tidak konsisten, kurang rapi, dan kekuatan kelingnya juga kurang bisa diandalkan.

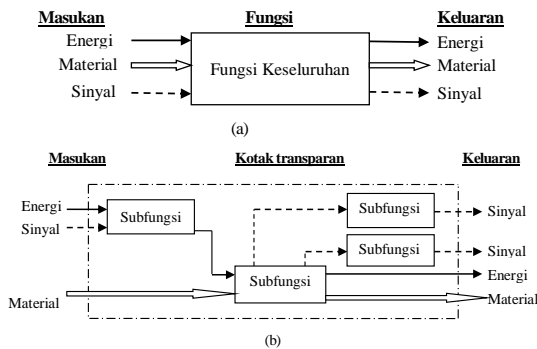
Dari uraian permasalahan yang dihadapi pengrajin aluminium di Giwang tersebut, memberikan ide untuk memperbaiki sistem kerja untuk mendapatkan kesempurnaan sistem produksi. Salah satu alternatif solusi adalah mengganti cara pengelingan yang semula masih secara manual dengan menggunakan mesin yang mana akan dapat memberikan harapan besar untuk perbaikan kualitas produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, desain alat pengelingan perlu dikaji lebih lanjut.

Penelitian ini dilakukan untuk membuat rancang bangun sebuah *rivet joint machine*. Pada penelitian ini meliputi lima tahapan proses yaitu; perancangan konseptual, manufaktur, perakitan, alignment dan pengujian hasil pengelingan. Metode untuk merancang bangun mesin tersebut menggunakan metode-metode perancangan yang sederhana dengan proses manufaktur yang mudah dan cepat sehingga dapat meminimalkan biaya. Dengan adanya *rivet joint machine* bertenaga hidrolik yang akan dibuat tersebut diharapkan hasil akhir dari proses pengelingan akan terlihat lebih rapi, konsisten, dan sambungan kekuatan kelingnya bisa diandalkan.

Menurut Stone dan Wood (2000), menjelaskan bahwa *functional modelling* merupakan langkah awal yang dilakukan dalam melakukan proses perancangan suatu produk atau alat. Metode perancangan ini pada tahap awal dimulai dengan

cara memformulasikan fungsi proses produk secara keseluruhan, kemudian dilakukan pendetailan fungsi untuk mempermudah penyelesaian solusi konsepnya [1].

Raffaelli *et al* (2007) menjelaskan bahwa suatu produk digambarkan melalui sebuah kotak hitam yang gunanya untuk mengidentifikasi fungsi utama dari sebuah sistem [2]. Pahl *et al* (2007) menambahkan bahwa struktur dalam suatu sistem yang dibangun untuk menunjukkan masukan dan keluaran yang berupa: energi, material, dan sinyal akan dikonversi didalam fungsi utama tersebut [3].



Gambar 1. Struktur *functional modelling*, (a) Model sistem fungsi keseluruhan, (b) Model sistem subfungsi

Linsey *et al.* (2005) menyatakan bahwa *functional modelling* sangat dibutuhkan dalam hal proses perancangan produk atau alat yang gunanya untuk membangun suatu konsep rancangan [4]. Magrab *et al.* (2010) menambahkan bahwa keseluruhan fungsi produk dibagi kembali dalam suatu hierarki subfungsi dengan cara melakukan dekomposisi, sehingga mengakibatkan fungsi sistem terbagi menjadi suatu bagian yang lebih detail dan saling terkait satu sama lainnya, dan dimana hubungan dari setiap fungsi akan menjadi suatu acuan solusi yang akan diperoleh [5].

Menurut Pahl *et al.* (2007) bahwa tahapan dari proses perancangan secara keseluruhan mencakup berbagai hal, diantaranya: perencanaan, konsep perancangan, *embodiment design*, perancangan detail. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perancangan konseptual merupakan bagian awal dari proses perancangan secara keseluruhan suatu produk. Dengan demikian dari konsep perancangan tersebut dapat diperoleh suatu konsep yang kemudian dapat didetailkan untuk proses pembuatan produk awal [3].

Tumer dan Stone (2001) menerangkan bahwa pembuatan struktur dari suatu sistem dan subfungsi harus memakai kata kerja dan kata benda yang baku, yang disebut dengan *functional basis*. Dalam hal ini untuk menggambarkan konsep perancangan yang berupa fungsi aliran masuk dan keluar harus mengacu pada *functional basis* tersebut [6].

Pada perancangan dan pembuatan *rivet joint machine* yang dilakukan ini mempunyai beberapa tujuan yang ingin dicapai, yaitu membuat konsep perancangan yang mudah dan sederhana, serta dapat memberikan gambaran yang detail mengenai aliran proses kerja dan komponen yang membangun mekanisme *rivet joint machine*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk membuat *rivet joint machine* dengan tingkat kekuatan hasil pengelingan yang baik dengan waktu proses manufaktur yang cepat dan biaya pembuatan mesin yang sesuai dengan kualitas mekanisme komponen yang digunakan.

Perancangan dan pembuatan *rivet joint machine* ini diharapkan bisa memberikan manfaat bagi proses produksi UKM, diantaranya adalah mengurangi ketergantungan

terhadap tenaga manusia khususnya dalam proses pengelingan dikarenakan kualitas produk hasil tenaga manusia cenderung tidak bisa konsisten. Sehingga dengan penggunaan mesin tersebut, kualitas produksi dapat terjaga yaitu dengan hasil pengelingan yang rapi, kuat, dan seragam. Selain itu, dengan penerapan parameter-parameter permesinan baru dalam proses pengelingan dapat menekan biaya dan waktu produksi.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahapan proses dalam mencapai tujuan penelitian. Kelima tahapan proses tersebut adalah perancangan konseptual, manufaktur, perakitan, *alignment*, dan pengujian hasil pengelingan.

Perencanaan pembuatan *rivet joint machine* dilakukan dengan menganalisa besarnya gaya yang dibutuhkan dalam melakukan proses pengelingan serta menganalisa keunggulan dan kelemahan dari mesin tersebut. Kemudian dilakukan pembuatan spesifikasi perancangan sebagai acuan rancangan, sehingga dapat meminimalkan kesalahan yang dapat ditimbulkan pada saat proses perencanaan maupun proses manufaktur. Melakukan identifikasi permasalahan yang timbul dalam perancangan secara abstrak, sehingga proses perancangan dapat dilakukan secara sederhana.

Pembuatan fungsi keseluruhan ini dilakukan untuk mengetahui sistem kerja yang ada pada *rivet joint machine*. Pembuatan subfungsi pada *rivet joint machine* dilakukan dengan membuat dekomposisi untuk dapat membagi mekanisme yang ada pada *rivet joint machine*, sehingga dapat dibagi menjadi empat mekanisme yaitu; mekanisme benda kerja, mekanisme sumbu x, mekanisme struktur rangka, dan mekanisme sistem kontrol.

Pemilihan solusi alternatif untuk membangun mekanisme pada setiap subfungsi dan memilih kombinasi dari solusi alternatif mekanisme yang terpilih untuk membangun konsep mekanisme mesin. Konsep yang terbangun dari kombinasi solusi alternatif kemudian dievaluasi yang terkait dengan permasalahan yang diidentifikasi pada spesifikasi perancangan. Adapun beberapa kriteria yang perlu dievaluasi dalam konsep adalah; prinsip kerja, fungsi mesin, keamanan, produksi, kualitas, perakitan, pengoperasian, perawatan, dan biaya. Setelah dievaluasi diperoleh solusi konsep yang merupakan bentuk akhir dengan dimensi secara keseluruhan untuk mengetahui skala ukuran mesin yang akan dibuat.

Proses manufaktur dilakukan dengan menggunakan mesin perkakas konvensional didasarkan atas pertimbangan biaya proses pengerjaan yang relatif lebih murah dibandingkan dengan mesin perkakas non-konvensional untuk jumlah produksi yang terbatas. Kemudian dilakukan proses perakitan untuk menggabungkan komponen-komponen mekanik yang dihasilkan dari proses manufaktur. Proses *alignment* dilakukan untuk menyesuaikan kelurusan mekanisme penekanan paku keling.

Pengujian hasil penekanan paku keling yang terbuat dari bahan aluminium pada dua buah plat dengan variasi diameter paku keling 3 mm, 4 mm, dan 5 mm dilakukan menggunakan mesin uji tarik untuk memperoleh nilai kekuatan tarik dari hasil pengelingan tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perancangan konseptual ada beberapa alternatif solusi untuk membangun mekanisme kerja *rivet joint machine* diantaranya:

Tabel 1. Pilihan solusi untuk membangun mekanisme *rivet joint machine*

No	Fungsi	Solusi		
		1	2	3
1	Sistem penggerak	Motor AC 3 phase	Servo motor	Stepper motor
2	Sistem transmisi daya	Sabuk gigi	Roda gigi	Flexible sleeve coupling
3	Sistem kontrol	Programmable Logic Controller (PLC)	Supervisory Control Data And Acquisition (SCADA)	Proportional Integral Derivative (PID)
4	Sistem tenaga penggerak silinder	Pneumatic	Hidraulic	Mekanik
5	Struktur rangka	Block	Profil I	Plat

Dari beberapa solusi alternatif yang sesuai dengan fungsi prinsip kerja *rivet joint machine* pada perancangan konseptual (tabel 1), dipilih alternatif solusi sebagai berikut:

- Sistem penggerak: Motor AC 3 phase
Berdasarkan kebutuhan yang sesuai spesifikasi perancangan, setelah dilakukan penilaian secara teknik dan secara ekonomi dipilih sistem penggerak menggunakan motor AC 3 phase. Dilihat dari segi teknik, motor AC 3 phase memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan Servo motor dan Stepper motor, diantaranya: mempunyai kehandalan tinggi, lebih mudah perawatannya, memberikan rasio daya terhadap berat yang cukup tinggi, dan pada keadaan normal mempunyai efisiensi yang cukup tinggi. Dilihat dari segi ekonomi motor AC harganya relatif lebih murah dan cukup banyak tersedia dipasar.
- Sistem transmisi daya: *Flexible sleeve coupling*
Berdasarkan kebutuhan yang sesuai spesifikasi perancangan, sistem transmisi daya dipilih menggunakan *Flexible sleeve coupling* dikarenakan mampu memberikan toleransi terbatas dengan adanya *misalignment* pada poros motor dan pompa misalnya pada saat mengalami bearing atau pemuaiian. Selain itu, *Flexible sleeve coupling* juga mampu menahan suhu lingkungan atau gesekan kopling, serta dapat menerima gaya guncangan dan getaran. Jika dibandingkan dengan sistem transmisi daya menggunakan sabuk gigi dan roda gigi, keduanya membutuhkan ruang konstruksi yang luas dan potensi terjadi *backlash* cukup besar.
- Sistem kontrol: *Programmable Logic Controller* (PLC)
Berdasarkan kebutuhan yang sesuai spesifikasi perancangan, sistem kontrol dipilih menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) karena sistem operasi digital ini mempunyai ukuran yang lebih kecil atau sederhana, lebih mudah dalam hal *programming* maupun *re-programming*, serta harganya relatif lebih bisa terjangkau dibandingkan jika menggunakan *Supervisory Control Data And Acquisition* (SCADA) dan *Proportional Integral Derivative* (PID).

- Sistem tenaga penggerak: *Hidraulic*
Berdasarkan kebutuhan yang sesuai spesifikasi perancangan, sistem tenaga penggerak dipilih menggunakan *Hidraulic* karena dilihat dari segi penempatan transmisi tenaganya lebih fleksibel, serta gaya yang relatif sangat kecil dapat digunakan untuk menggerakkan atau mengangkat beban yang sangat besar dengan cara mengubah sistem perbandingan luas penampang silinder. Apabila menggunakan *Pneumatic* akan mudah terjadi kebocoran serta dapat menimbulkan suara bising, sedangkan apabila menggunakan mekanik harus memperhatikan posisi porosnya dalam hal penempatan posisi tenaga transmisinya sehingga lebih rumit.
- Stuktur rangka: Profil I
Berdasarkan kebutuhan yang sesuai spesifikasi perancangan, struktur rangka dipilih menggunakan profil I dikarenakan dilihat dari segi teknik profil I mempunyai keunggulan dalam kemudahan rancangan dan proses manufakturnya, serta mempunyai kekuatan yang cukup untuk membangun rangka *rivet joint machine*. Dilihat dari segi ekonomi profil I harganya relatif murah dan biaya proses manufakturnya tidak terlalu mahal.

Kombinasi dari solusi yang terpilih digunakan untuk membangun konsep mekanis, sehingga mekanisme yang terbangun merupakan solusi yang terpilih dari beberapa kombinasi yang sesuai dengan kebutuhan spesifikasi perancangan *rivet joint machine*. Solusi konsep dari perancangan konseptual *rivet joint machine* digambarkan secara keseluruhan untuk menggambarkan fungsi dalam susunan konsep mekanisme konstruksi *rivet joint machine*, yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rivet joint machine

Tahapan proses perancangan, manufaktur, perakitan, dan *alignment* dihasilkan sebuah *rivet joint machine* dengan sistem kontrol menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC). Dengan spesifikasi tinggi permesinan 120 cm, lebar 50 cm.

Pengujian hasil penekanan *rivet* yang terbuat dari bahan aluminium pada dua buah plat dengan menggunakan mesin uji tarik untuk memperoleh nilai kekuatan tarik dengan variasi diameter *rivet* 3 mm, 4 mm, dan 5 mm, dimana masing-masing menghasilkan kekuatan tarik sebesar 10,24 kg/mm², 12,7 kg/mm², 13,2 kg/mm².

4. KESIMPULAN

Rivet joint machine yang dihasilkan adalah mesin skala produksi dengan hasil pengelangan yang relatif lebih rapi, kuat, dan konsisten dibandingkan dengan pengelangan yang



masih dilakukan secara manual. Pengembangan teknologi dari sistem ini terletak pada kemampuan kerja yang multi fungsi, ketahanan, dan kemudahan operasi.

Dengan alternatif solusi sistem penggerak yang dipilih menggunakan motor AC 3 phase, sistem transmisi daya menggunakan *flexible sleeve coupling*, sistem kontrol menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC), sistem tenaga penggerak silinder menggunakan *hidraulic*, dan struktur rangka menggunakan profil I, dihasilkan sebuah *rivet joint machine* yang mampu melakukan pengelangan pada dua buah plat menggunakan *rivet* yang terbuat dari bahan aluminium, dengan variasi diameter *rivet* 3 mm, 4 mm, dan 5 mm, dimana masing-masing menghasilkan kekuatan tarik sebesar 10,24 kg/mm², 12,7 kg/mm², 13,2 kg/mm².

Berdasarkan dari hasil penelitian yang terkait dengan metode perancangan yang dilakukan, disarankan untuk melakukan inovasi rancang bangun pada mesin perkakas lain yang dapat berguna untuk meningkatkan mutu produk yang dihasilkan khususnya dalam industri berskala kecil menengah.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Stone, R., B. dan Wood, K., L. 2000. Development of functional basis for design. *Journal of Mechanical Design*. 122 (4) 359-370.
- [2] Raffaeli, R., Germani, M., Garziosi, S. dan Mandorli, F. 2007. Development of multi layer change propagation tool for modular products. *International conference on engineering design*. Paris. ICED. 07/307.
- [3] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., dan Grote, K.H. 2007. Engineering design: Systematic approach. Ed. Ke-3. *Springer*. London.
- [4] Linsey, J., S., Green, M., G., Wie, M., V., Wood, K., L., dan Stone, R. 2005. Functional representation in conceptual design: A first study in experimental design and evaluation. *Proceedings of the 2005 American society for engineering education annual conference & exposition*.
- [5] Magrab, E., B., Gupta, S. K., McCluskey, F., P. dan Sandborn P., A. 2010. Integrated product and process design and development: The product realization process. *CRC Press, Taylor and Francis Group*. Boca Raton.
- [6] Tumer, I., Y dan Stone, R., B. 2001. Mapping function to failure mode during component development. *J. Research engineering design*. DET 2001-DFM21173.

PENGARUH METODE Pengerjaan Dingin dan *BLASTING ABRASIVE* TERHADAP KARAKTERISTIK MATERIAL BIOMEDIS

Mirza Pramudia¹⁾, Khamdi Mubarok²⁾

Fakultas Teknik Universitas Trunojoyo Madura^{1,2)}

Jl. Raya Telang, Kecamatan Kamal, Bangkalan, Madura 16912, Indonesia^{1,2)}

Phone: 031-3011146, Fax: 031-3011506^{1,2)}

E-mail: mirza_ub@yahoo.com¹⁾, khamdi_m@yahoo.com²⁾

ABSTRAK

Material baja tahan karat austenitik (*austenitic stainless steel*) merupakan material implan biomedis dengan beberapa keunggulan antara lain non magnetik, mampu bentuk, serta memiliki ketahanan korosi yang sangat baik. Salah satu jenis material baja tahan karat austenitik yang berpotensi untuk dikembangkan di dunia kedokteran adalah *nickel free austenitic stainless steel*. Material *nickel free austenitic stainless steel* memiliki komposisi kandungan nitrogen yang sangat tinggi sehingga berakibat pada tingginya kekuatan tarik dan kekuatan fatik material. Kekuatan mekanik material *nickel free austenitic stainless steel* dapat ditingkatkan dengan menggunakan metode beberapa metode antara lain pengerjaan dingin dan *blasting abrasive*. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa pengaruh kombinasi metode deformasi dingin dan *blasting abrasive* terhadap struktur mikro, kekerasan, dan fase material hasil pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* tidak mengubah fase material, namun kombinasi metode tersebut meningkatkan kekerasan dan mengubah struktur butiran material *nickel free austenitic stainless steel*. Peningkatan kekerasan terjadi seiring dengan derajat deformasi dingin. Proses pengerjaan dingin mampu menimbulkan dislokasi pada struktur butiran yang ditandai dengan terjadinya slip sedangkan proses *blasting abrasive* menghasilkan struktur butiran halus (*grain refinement*) sehingga mampu meningkatkan kekerasan material pada kedalaman tertentu dari permukaan spesimen. Nilai kekerasan tersebut akan mengalami penurunan hingga mencapai nilai kekerasan tertentu sesuai dengan nilai kekerasan sebelum perlakuan *blasting abrasive*.

Kata kunci: pengerjaan dingin, *blasting abrasive*, *nickel free austenitic stainless steel*

1. PENDAHULUAN

Biomaterial plat penyambung tulang pada umumnya terbuat dari paduan kobal, paduan titanium, dan baja tahan karat. Paduan kobal (*cobalt alloys*) mempunyai sifat tahan terhadap keausan, tahan korosi, dan bersifat non-magnetik. Logam jenis ini pada umumnya digunakan pada aplikasi pada implan gigi (*dental implant*), peralatan penyambung tulang bahu dan tulang pinggul, serta material pengganti lutut [1]. Pembuatan plat penyambung tulang dari paduan kobal memerlukan biaya yang tinggi sehingga penggunaannya terbatas. Paduan titanium (*titanium alloys*) memiliki sifat tahan terhadap korosi, kekuatan yang tinggi, dan *biocompatible*. Logam titanium banyak digunakan pada aplikasi pada implan gigi, aplikasi trauma tulang, dan juga aplikasi penyambung tulang pinggul dan lutut. Pada umumnya, material titanium yang digunakan sebagai implan dibuat dari titanium murni/*commercially pure titanium* (CP-Ti) dan paduannya (Ti-6Al-4V). Kelemahan dari logam titanium adalah tidak ekonomis, sifat ketahanan terhadap aus yang rendah, dan memungkinkan untuk terjadi difusi oksigen ke dalam titanium selama proses fabrikasi yang dapat mengakibatkan penggetasan pada logam titanium [2].

Baja tahan karat merupakan material yang banyak digunakan dalam dunia kedokteran terutama sebagai biomaterial implan plat penyambung tulang manusia. Material jenis ini memiliki beberapa keuntungan antara lain bersifat *biocompatible*, memiliki tingkat kekakuan yang baik, serta tahan terhadap serangan korosi. Salah satu jenis implan biomaterial yang saat ini sedang dikembangkan sebagai alat bantu dalam proses penyembuhan dan pemulihan tulang adalah *nickel-free austenitic stainless steel* [3]. Material *nickel-free austenitic stainless steel* merupakan salah satu jenis material implan

dengan tingkat kekuatan yang rendah apabila dibandingkan dengan material implan logam yang terbuat dari *cobalt alloys* dan *titanium alloys*. Biomaterial *nickel-free austenitic stainless steel* memiliki komposisi unsur nikel yang sangat rendah, sehingga bersifat aman bagi tubuh manusia. Implan dengan kandungan nikel yang sangat tinggi berpotensi untuk menimbulkan bahaya bagi tubuh manusia dikarenakan nikel bersifat *toxic* dan dapat menimbulkan reaksi yang bersifat alergi pada kulit manusia [4].

Kekuatan mekanik *nickel-free austenitic stainless steel* dapat ditingkatkan dengan beberapa metode antara lain pengerjaan dingin dan *blasting abrasive*. Pengerjaan dingin bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanik material secara total dengan menggunakan prinsip dislokasi butiran. Proses dislokasi butiran akan menyebabkan terjadinya pengerasan regangan yang berakibat pada peningkatan kekuatan mekanik material. Metode *blasting abrasive* merupakan metode peningkatan kekuatan mekanik dengan menggunakan prinsip dislokasi butiran pada permukaan material. Metode ini dilakukan dengan menumbukkan pasir silika dengan diameter butiran tertentu yang bersifat abrasif pada permukaan logam dengan kecepatan yang sangat tinggi [5-6]. Partikel abrasif akan bergerak menuju nozel akibat perbedaan tekanan. Partikel tersebut bercampur dengan udara yang terkompresi sehingga partikel abrasif tersebut keluar dari nozel dengan kecepatan tertentu. Energi yang dihasilkan oleh partikel abrasif akan menyebabkan derajat deformasi pada butiran substrat yang terdapat pada permukaan logam. Deformasi pada substrat akan mengakibatkan penghalusan butiran pada substrat tersebut

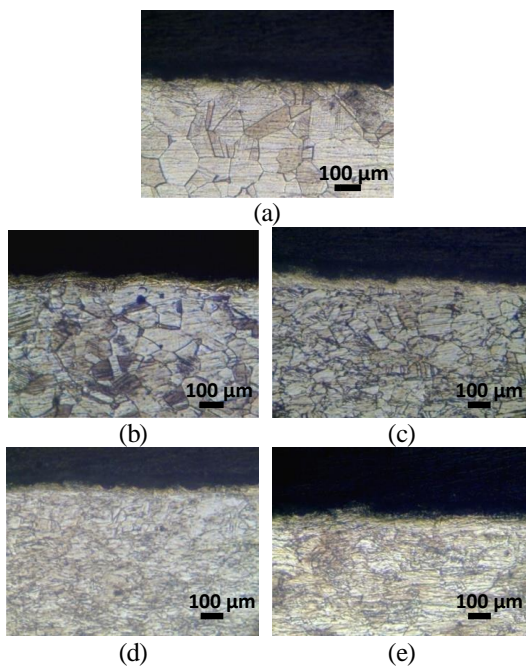
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh metode pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* terhadap karakteristik material *nickel-free austenitic stainless steel*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja tahan karat Biodur 108. Material ini memiliki komposisi kimia (54.54% Fe, 21.85% Mn, 20.43% Cr, 0.95% N, 0.67% Mo, dan 0.025% Ni) dengan dimensi spesimen 15 mm x 15 mm x 13 mm. Proses pengerjaan dingin dilakukan pada suhu ruangan dengan derajat deformasi sebesar 15%, 30%, 45%, dan 54%. Material ditekan dengan menggunakan beban penekanan yang berbeda-beda sesuai dengan persentase derajat deformasi yang telah direncanakan. Hasil proses pengerjaan dingin kemudian diproses dengan perlakuan *blasting abrasive* menggunakan pasir silika berdiameter 0,5 - 0,8 mm dan tekanan kompresor antara 7-8 kg/cm² selama 10 menit. Spesimen hasil proses pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* selanjutnya diuji dengan menggunakan uji kekerasan, uji mikrostruktur, serta uji *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui perubahan fase material setelah mendapat perlakuan pengerjaan dingin dan *blasting abrasive*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar struktur mikro hasil pengujian pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* ditunjukkan pada Gambar 1.

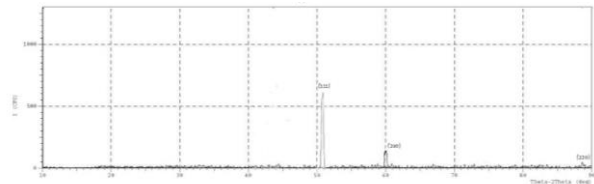


Gambar 1. Foto Mikro Spesimen (a) Raw Material + Blasting Abrasive; (b) Pengerjaan Dingin 15%+Blasting Abrasive; (c) Pengerjaan Dingin 30%+Blasting Abrasive; (d) Pengerjaan Dingin 45%+Blasting Abrasive; (e) Pengerjaan Dingin 54%+Blasting Abrasive

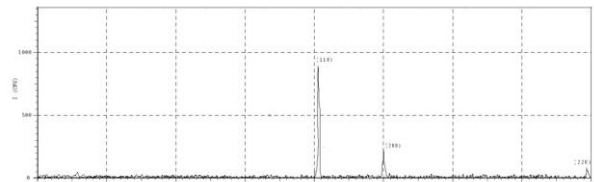
Berdasarkan hasil pengujian struktur mikro tampak bahwa material hasil proses pengerjaan dingin yang diikuti dengan *blasting abrasive* akan menghasilkan lapisan dengan bentuk struktur mikro yang mengalami penghalusan butiran. Beberapa referensi penelitian menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk memiliki kedalaman tertentu dengan karakteristik peningkatan kekuatan mekanik permukaan pada permukaan spesimen. Kedalaman lapisan hasil *blasting abrasive* tersebut mengalami perbedaan sifat mekanik antara *raw material* yang diberi perlakuan *blasting abrasive* dengan material hasil

proses pengerjaan dingin yang dilanjutkan dengan proses *blasting abrasive*. Semakin tinggi derajat pengerjaan dingin akan mengakibatkan semakin tipisnya lapisan hasil proses *blasting abrasive* yang terbentuk. Hal ini dikarenakan material hasil proses pengerjaan dingin akan mengalami pematatan struktur butiran sehingga penetrasi butiran pasir pada proses *blasting abrasive* pada permukaan spesimen akan mendapatkan resistansi dari struktur butiran yang telah mengalami pematatan akibat proses pengerjaan dingin.

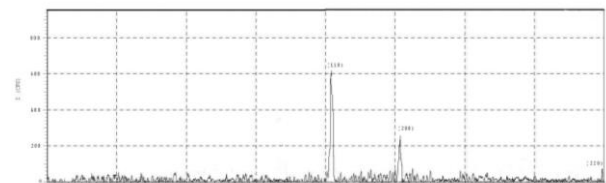
Hasil pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) terhadap spesimen *raw material* dan spesimen yang mendapat proses pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* ditunjukkan pada Gambar 2-6.



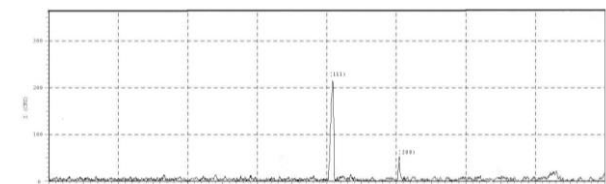
Gambar 2. Hasil Uji XRD Raw Material



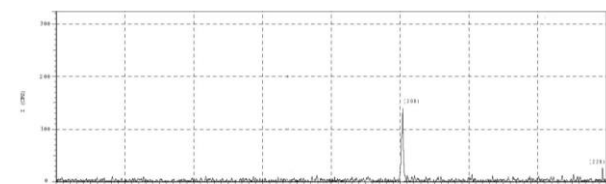
Gambar 3. Hasil Uji XRD Raw Material+Pengerjaan Dingin 15 %+Blasting Abrasive



Gambar 4. Hasil Uji XRD Raw Material+Pengerjaan Dingin 30 %+Blasting Abrasive



Gambar 5. Hasil Uji XRD Raw Material+Pengerjaan Dingin 45 %+Blasting Abrasive

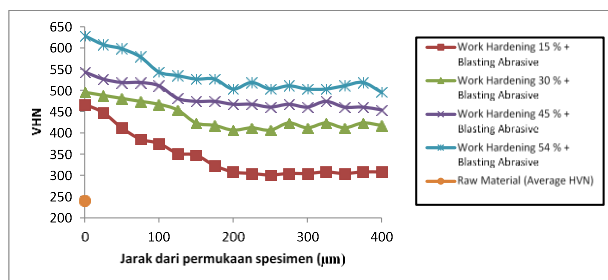


Gambar 6. Hasil Uji XRD Raw Material+Pengerjaan Dingin 54 %+Blasting Abrasive

Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) bertujuan untuk menganalisa perubahan fase struktur material hasil pengujian. Pada penelitian ini, tahap pengujian XRD menunjukkan hasil

berupa grafik yang dipresentasikan dalam bentuk *peak* pada sudut 2θ . Berdasarkan grafik pengujian di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa puncak (*peak*) tidak mengalami pergeseran sudut dan posisi bidang kristal. Proses pengujian pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* hanya merubah kekuatan mekanik bahan namun tidak merubah fase material. Indeks miller memperlihatkan tiga bidang utama yang terbentuk pada fase austenitik (γ -phase) yakni bidang $\{1\ 1\ 1\}$, $\{2\ 0\ 0\}$, dan $\{2\ 2\ 0\}$. Pola bidang tersebut menunjukkan struktur material hasil pengujian adalah fase austenit dengan bentuk struktur kristal fcc (*face centered cubic*).

Distribusi kekerasan pada arah melintang pada spesimen *nickel-free austenitic stainless steel* dengan perlakuan pengerjaan dingin yang dilanjutkan dengan *blasting abrasive* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Distribusi Kekerasan Melintang Material *Nickel Free Austenitic Stainless Steel* Dengan Perlakuan Pengerjaan dingin Dan *Blasting Abrasive*

Distribusi kekerasan spesimen akibat proses pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* pada spesimen akan meningkat hingga kedalaman tertentu. Peningkatan kekerasan pada permukaan spesimen tertinggi pada material dengan perlakuan pengerjaan dingin 15 % dan *blasting abrasive* sebesar 467 HVN dan mencapai nilai kekerasan konstan pada jarak 200 µm. Peningkatan kekerasan pada permukaan spesimen tertinggi pada material dengan perlakuan pengerjaan dingin 30 % dan *blasting abrasive* sebesar 495 HVN dan mencapai nilai kekerasan konstan pada jarak 150 µm. Peningkatan kekerasan pada permukaan spesimen tertinggi pada material dengan perlakuan pengerjaan dingin 45 % dan *blasting abrasive* sebesar 543 HVN dan mencapai nilai kekerasan konstan pada jarak 125 µm. Peningkatan kekerasan pada permukaan spesimen tertinggi pada material dengan perlakuan pengerjaan dingin 54 % dan *blasting abrasive* sebesar 628 HVN dan mencapai nilai kekerasan konstan pada jarak 100 µm. Seiring dengan meningkatnya kedalaman, nilai kekerasan turun hingga mencapai konstan pada jarak tertentu.

Proses pengerjaan dingin akan meningkatkan kekerasan spesimen *nickel free austenitic stainless steel*. Kekerasan spesimen dengan perlakuan pengerjaan dingin sebesar 15% meningkat rata-rata 30.15% dari kekerasan *raw material*, kekerasan spesimen dengan perlakuan pengerjaan dingin sebesar 30% meningkat rata-rata 76.85 % dari kekerasan *raw material*, kekerasan spesimen dengan perlakuan pengerjaan dingin sebesar 45% meningkat rata-rata 97.06% dari kekerasan *raw material*, dan kekerasan spesimen dengan perlakuan pengerjaan dingin sebesar 54% meningkat rata-rata 119.35% dari kekerasan *raw material*. Proses pengerjaan dingin akan mengakibatkan terjadinya *strain hardening* akibat adanya jumlah densitas dislokasi. Peningkatan kekerasan hasil proses *blasting abrasive* diakibatkan karena adanya proses deformasi plastis lokal (*local plastic deformation*) pada permukaan spesimen. Proses tersebut

mengakibatkan perubahan ukuran butiran sehingga menjadi lebih kecil. Berdasarkan hukum *Hall Petch*, semakin kecil ukuran butir, maka kekerasan material akan semakin meningkat. Ukuran butir yang lebih kecil memiliki jumlah luasan batas butir yang lebih besar daripada ukuran butiran yang kasar, sehingga dapat menghalangi terjadinya gerakan dislokasi. Hal ini berakibat pada peningkatan kekerasan dari material uji.

4. KESIMPULAN

Proses pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* dapat meningkatkan kekuatan mekanik spesimen *nickel free austenitic stainless steel*. Proses pengerjaan dingin dapat mengakibatkan perubahan struktur butiran menjadi bentuk pipih dan memanjang sedangkan proses *blasting abrasive* mengakibatkan struktur pada permukaan spesimen mengalami penghalusan butiran (*grain refinement*). Metode pengerjaan dingin dan *blasting abrasive* mampu merubah kekuatan mekanik namun tidak dengan struktur fasa material *nickel free austenitic stainless steel*. Hal ini dibuktikan dengan pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) pada *raw material* serta spesimen yang telah mendapat perlakuan pengerjaan deformasi dingin dan *blasting abrasive*. Pengujian XRD menunjukkan bahwa puncak (*peak*) pada grafik uji XRD dengan sudut 2θ tidak mengalami pergeseran sudut dan posisi bidang kristal. Material awal sebelum dan setelah pengujian dilakukan memiliki fase austenitik dengan struktur kristal fcc (*face centered cubic*).

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM International, 2012, "Medical Applications of Stainless Steels", ASM, United States of America.
- [2] Bombac, D., B, Miha, Fajfar, P., Kosel, F., dan Turk, R. 2007, "Review of Materials in Medical Applications". RMZ-Materials and Geoenvironment, 54, 471-499.
- [3] Fujiu, Katsuhito, Manabe, Ichiro, dkk. 2012. "Nickel-free stainless steel avoids neointima formation following coronary stent implantation". Science and Technology of Advanced Materials, 13 (2012) 064218 (10pp).
- [4] Ke, Yang, YiBin, Ren, dan Peng, Wan. 2012. "High Nitrogen Nickel-Free Austenitic Stainless Steel: A Promising Coronary Stent Material". Science China Technological Sciences. Vol 55. No. 2 :329-340
- [5] Kimura, A., Noda, T., Ohkubo, H., Kamada, Y., dan Takashi, S., 2005, "Correlation between Deformation – Induced Microstructures and TGSCC Susceptibility in a Low Carbon Austenitic Stainless Steel", The Mineral, Metals, and Materials Society.
- [6] Multigner, M., Frutos E, González J.L., Carrasco, Jiménez, a J.A., Marín, P., Ibáñez, J., 2009, "Influence of The Sandblasting on The Subsurface Microstructure of 316LVM Stainless Steel: Implications on the Magnetic and Mechanical Properties", Materials Science and Engineering : C, Vol. 29, Issue 4, pp. 1357-136atr
- [7] The European Stainless Steel Development Association. 2009. "Stainless Steel-When Health Comes First". [Http://www.euro-inox.org](http://www.euro-inox.org)
- [8] Tulinski dan Jurczyk. 2008. "Mechanical and Corrosion Properties of Ni-Free Austenitic Stainless Steel". Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 53, Issue 3.



- [9] Yang, Ke dan Ren, Yibin. 2010. "Nickel-Free Austenitic Stainless Steel For Medical Application". *Science And Technology Of Advanced Materials*, 11 (2010) 014105 (13pp).



DESAIN KOMPOSIT EPOKSI BERPENGISI SERBUK SABUT KELAPA DAN ALUMINIUM UNTUK BAHAN KAMPAS REM DENGAN VARIASI BENTUK GEOMETRI ALUR KAMPAS

Eko Marsyahyo¹⁾, Eko Yohanes S²⁾, Yafhed Octavianus³⁾, Virginia C.W⁴⁾

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang

Jl. Raya Karanglo KM 2 Kampus II ITN Malang, Malang, Indonesia

Phone : +628123315824

Email : [*marsyahyo@yahoo.co.uk](mailto:marsyahyo@yahoo.co.uk)

ABSTRAK

Komposit dengan bahan paduan serbuk sabut kelapa dan aluminium adalah material yang mempunyai kelebihan dalam karakteristiknya sehingga material ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan kampas rem. Variasi desain bahan-bahan gesek dari komposit epoksi berpengisi serbuk serabut kelapa dan aluminium yang menghasilkan performa tribologi permukaan gesek antara bahan kampas rem dan cakram berpengaruh terhadap daya pengereman, keausan dan umur pemakaian. Hasil pengujian menunjukkan sifat tribologi komposit bahan kampas rem dengan variasi komposisi serbuk serabut kelapa dan aluminium terhadap daya pengereman, ketahanan aus dan ketahanan temperatur pada desain bentuk geometri alur vertikal dan horizontal yaitu rata-rata sebesar 150 kg dan temperatur permukaan gesek rata-rata 97°C. Komposisi kampas rem dengan variasi fraksi bahan komposit dan geometri bentuk alur kampas yakni komposit 30 %wt dari serbuk serat sabut kelapa, 30% serbuk aluminium dan komposisi media matrik epoxy konstan sebesar 40%wt menunjukkan efektivitas gesekan lebih tinggi dibandingkan tanpa pengisi serbuk sabut kelapa dan menghasilkan kinerja gesekan yakni topografi variasi daerah permukaan gesek ditandai dengan permukaan aus kurang dari 2 mm pada lama uji 500 jam. Umur pemakaian dengan desain alur garis vertikal dan horizontal diprediksi mencapai lebih dari 500 jam operasi.

Kata kunci: komposit, serbuk sabut kelapa, serbuk aluminium, kampas rem, bentuk geometri alur

1. PENDAHULUAN

Material komposit terdiri dari lebih dari satu tipe material dan dirancang untuk mendapatkan kombinasi karakteristik terbaik dari setiap komponen penyusunnya. Bahan komposit memiliki banyak keunggulan, diantaranya berat yang lebih ringan, kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi, tahan korosi dan ketahanan aus (Smallman dan Bishop, 2000).

Particulate composite, yaitu komposit dengan penguat berupa partikel/serbuk yang tersebar pada semua luasan dan segala arah dari komposit. *Particulate composite material* (material komposit partikel) terdiri dari satu atau lebih partikel yang tersuspensi di dalam matriks dari matriks lainnya. Partikel logam dan non-logam dapat digunakan sebagai matriks. Empat kombinasi yang dapat digunakan sebagai matriks komposit partikel:

- a. Material komposit partikel non-logam di dalam matriks non-logam.
- b. Material komposit partikel logam di dalam matriks non-logam.
- c. Material komposit partikel non-logam di dalam matriks logam.
- d. Material komposit partikel logam di dalam matriks loga.

Bahan komposit juga mempunyai kelebihan dari segi versatility (berdaya guna) yaitu produk yang mempunyai gabungan sifat-sifat yang menarik yang dapat dihasilkan dengan mengubah sesuai jenis matriks dan serat yang digunakan. Contoh dengan menggabungkan lebih dari satu serat dengan matriks untuk menghasilkan komposit hibrida untuk berbagai aplikasi teknik seperti di bidang otomotif untuk bahan baku kampas rem dengan variasi jenis partikel dan bentuk geometri kampas, yang harus memenuhi syarat teknis yakni secara fungsi bahan mampu mengurangi kecepatan kendaraan. Menghentikan kendaraan yang sedang berjalan, menjaga agar laju pengereman kendaraan tetap terkendali.

Adapun persyaratan teknik dari kampas rem komposit yakni:

(www.stopcobrake.com/en/file/en.pdf/SAEJ661)

- a. Untuk nilai kekerasan sesuai standar keamanan 68 – 105 (Rockwell R).
- b. Ketahanan panas 360 oC, untuk pemakaian terus menerus sampai dengan 250 oC.
- c. Nilai keausan kampas rem adalah $(5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg})$
- d. Koefisien gesek 0,14 – 0,27
- e. Massa jenis kampas rem adalah 1,5 – 2,4 gr/cm³
- f. Konduktivitas thermal 0,12 – 0,8 W.m.°K

Bahan komposit yang akan digunakan pada penelitian ini adalah serabut kelapa dan aluminium. Serabut kelapa digunakan karena Indonesia merupakan Negara penghasil buah kelapa terbesar di dunia. Serabut kelapa sendiri merupakan limbah yang selama ini kurang dimanfaatkan oleh masyarakat yang takutnya kemudian hari akan menjadi masalah pencemaran lingkungan karena bisa menimbulkan bau kurang sedap yang bisa mengganggu kesehatan maupun.

Atas dasar itu maka kami mencari informasi tentang karakteristik serabut kelapa yang mempunyai ketahanan gesek yang tinggi dengan memanfaatkan serabut kelapa yang sebelumnya sebagai limbah tidak terpakai oleh masyarakat, dimanfaatkan sebagai bahan kampas rem dengan dasar keunggulan karakteristik pada serabut kelapa yang mempunyai ketahanan dalam gesekan yang tinggi. Disamping itu bahan penguat komposit tidak hanya serabut kelapa saja tetapi di padukan dengan serbuk aluminium karena aluminium sendiri mempunyai karakteristik material yang ringan dan mampu kuat menahan gesekan dalam kinerja kampas rem.

Aluminium sendiri mempunyai kekuatan dalam menahan gesekan tetapi dengan kekuatan menahan gesekan tersebut aluminium tidak merusak disc brake dan tahan terhadap



korosi dimana aluminium mengalami korosi dengan membentuk lapisan oksida yang tipis dimana sangat keras dan pada lapisan ini dapat mencegah karat pada aluminium yang berada di bawahnya. Dengan demikian logam Aluminium adalah logam yang mempunyai daya tahan korosi yang lebih baik dibandingkan dengan besi dan baja lainnya.

2. METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Komposit dirancang dengan memvariasikan desain garis, dengan komposisi bahan matrik dan pengisi yang masing-masing kampas rem tersusun dari bahan serbuk aluminium 25%, serabut kelapa 25%, matrik resin epoxy 40%.

Bahan yang akan digunakan adalah *serabut kelapa* dan serbuk aluminium dengan variasi 10% serabut kelapa 50% serbuk aluminium, 20% serabut kelapa 40% serbuk aluminium, 30% serabut kelapa 30% serbuk aluminium, 40% serabut kelapa 20% serbuk aluminium, dan 50% serabut kelapa dan 10% serbuk aluminium, dengan bahan matrik epoxy 40% pada tiap spesimen.

Pembuatan spesimen kampas rem adalah sebagai berikut:

1. Mencari volume dari kampas rem sehingga diketahui masing-masing volume dari campuran.
2. Membersihkan serabut kelapa dari bahan yang sifatnya bisa menurunkan kekuatan serabut kelapa.
3. Pemotongan serabut kelapa sesuai dengan ukuran yang diinginkan.
4. Pembuatan campuran.
5. Menimbang resin sesuai komposisi.
6. Mencampur resin dan serbuk aluminium dan diaduk sampai merata.
7. Dilakukan penambahan serabut kelapa.
8. Katalis dimasukkan kedalam campuran.
9. Campuran dituang kedalam cetakan yang berbentuk lembaran.
10. Pemotongan kampas rem sesuai bentuk dan ukuran yang ada, penempelan kampas rem pada besi penyangga kampas rem.
11. Pembuatan alur dan finishing permukaan.
12. Pengujian kampas rem.

Tabel 1. Komposisi komposit

Komposisi	Serabut Kelapa %	Resin epoxy %	Aluminium %
1	10%	40%	50%
2	20%	40%	40%
3	30%	40%	30%
4	40%	40%	20%
5	50%	40%	10%

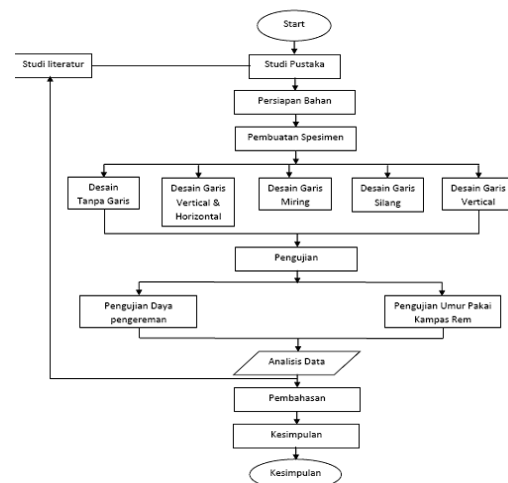
Cara Pengujian

Pengujian laju keausan dilakukan pada sepeda motor yang telah dimodifikasi. Roda sepeda motor digerakkan oleh motor dengan kecepatan bervariasi 100 s.d 400 rpm. Pada saat roda berputar, maka roda, velg dan drum akan ikut berputar sedangkan bagian rem cakram seperti kampas rem serta cam tidak ikut berputar. Pembebanan yang diberikan sebesar 3 kg, beban yang terhubung ke cam ini akan mendorong kampas rem ke cakram sehingga terjadi gesekan dan pengereman.

Pengujian Laju keausan dilakukan pada sepeda motor. Roda sepeda motor digerakkan oleh motor dengan kecepatan 100 rpm. Pada saat roda berputar, maka roda, velg dan drum akan ikut berputar sedangkan bagian rem cakram seperti kampas rem serta cam tidak ikut berputar. Pembebanan yang diberikan sebesar 10 kg, beban yang terhubung ke cam ini akan mendorong.



Gambar 1. Uji gesek



Gambar 2. Alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tanpda desain garis



Desain garis miring



Desain vertikal



Desain garis vertikal horizontal



Desain garis silang



Gambar 3. Desain garis kampas rem

Tabel 2. Data hasil pengujian desain kampas rem tanpa garis.

Putaran (rpm)	gaya pengereman (kg/f)	sample 1 (s)	sample 2 (s)	sample 3 (s)	sample 4 (s)	sample 5 (s)	rata-rata (s)
100	2	1,875	2,1	2,085	1,935	2,025	2,004
200	2	4,425	4,605	3,6	3,51	3,51	3,93
300	2	3,195	3,765	3,81	3,645	3,735	3,63
400	2	3,93	4,275	4,08	4,275	4,425	4,197

Tabel 3. Data hasil pengujian desain kampas rem dengan garis vertikal dan horisontal

putaran (rpm)	gaya pengereman (kg/f)	sample 1 (s)	sample 2 (s)	sample 3 (s)	sample 4 (s)	sample 5 (s)	rata-rata (s)
100	2	1,13	1,03	0,79	1,09	0,98	1,005
200	2	1,46	1,39	1,2	1,2	1,5	1,353
300	2	2,22	2,175	2,145	1,95	1,98	2,094
400	2	3,27	3,3	3,25	3,29	3,24	3,27

Tabel 4. Data hasil pengujian desain kampas rem dengan garis miring

putaran (rpm)	gaya pengereman (kg/f)	sample 1 (s)	sample 2 (s)	sample 3 (s)	sample 4 (s)	sample 5 (s)	rata-rata (s)
100	2	1,87	1,71	1,5	1,29	1,42	1,56
200	2	2,81	2,76	2,77	2,77	2,12	2,646
300	2	3,04	2,94	2,84	2,79	2,85	2,892
400	2	3,45	3,08	3,24	3,16	3,45	3,276

Tabel 5. Data hasil pengujian desain kampas rem garis silang

putaran (rpm)	gaya pengereman (kg/f)	sample 1 (s)	sample 2 (s)	sample 3 (s)	sample 4 (s)	sample 5 (s)	rata-rata (s)
100	2	0,75	1,35	1,8	1,05	1,35	1,26
200	2	1,99	2,14	2,17	2,43	2,02	2,156
300	2	3,45	3,73	3,51	3,46	3,96	3,624
400	2	4,1	4,44	4,91	3,91	4,28	4,326

Tabel 6. Data hasil pengujian desain kampas rem dengan garis vertikal

putaran (rpm)	gaya pengereman (kg/f)	sample 1 (s)	sample 2 (s)	sample 3 (s)	sample 4 (s)	sample 5 (s)	rata-rata (s)
100	2	1,56	1,36	1,13	1,24	1,16	1,29
200	2	1,85	2,08	1,82	2,07	0,63	1,989
300	2	3,24	2,6	2,7	3,3	2,86	2,94
400	2	3,2	3,45	3,51	3,84	3,46	3,1492

Pengamatan keausan kampas rem setelah dilakukan pengujian keausan pada permukaan sampel, sebagai berikut: Pengujian dilakukan pada putaran roda 100, 200, 300 dan 400 rpm dengan lama penekanan 2 detik

- Pengujian keausan pada alat uji dilakukan 20 kali pengereman untuk setiap sampel, kemudian diukur dengan mikrometer selisih ketebalan awal sebelum pengujian dan ketebalan setelah pengujian. Selisih ketebalan tersebut adalah laju keausan akibat pengereman.
- Setiap langkah pengereman waktunya 5 detik untuk jeda agar putaran kembali ke putaran semula.

Sampel uji kampas rem yang dibuat dari resin epoxy dengan komposisi bahan 25% serabut kelapa, 25% serbuk

aluminium, dan 50% resin dan hardener dengan desain kampas rem tanpa garis mendekati standar pabrikan dalam hal keausan yaitu sebesar 0,00615. Untuk hasil keausan terendah yaitu kampas rem dengan desain garis vertikal dan horizontal dengan nilai sebesar 0,003.

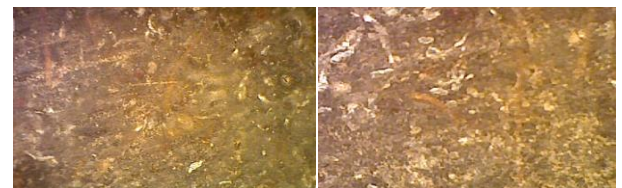
Tabel 7. Keausan kampas rem

No.	Bahan	Perhitungan keausan maksimum 2mm	Jumlah pengereman berdasarkan batas maksimum 2mm
1.	Tanpa garis	2/0,00615	325,20325
2.	Garis vertikal dan horizontal	2/0,003	666,66667
3.	Garis miring	2/0,00472	423,72881
4.	Garis silang	2/0,00787	254,12961
5.	Garis vertikal	2/0,00347	576,36888

Pada tabel 4.7 dapat dilihat sampel dengan desain garis vertikal dan horizontal mempunyai tingkat pemakaian yang tinggi yaitu sebesar 666,66667 kali pemakaian pengereman, dan yang terendah pada desain garis silang dengan tingkat keausan sebesar 254,12961.

Data hasil pengamatan permukaan (foto makro)

Data pengamatan permukaan (foto makro) dapat dilihat di bawah ini dengan 60x:



Gambar 4. Hasil foto makro

Terlihat pada struktur gambar 4 hasil dari foto makro tingkat keausan yang berbeda, hasil dari gesekan komposit dengan disc saling bergesekan melawan putaran dist yang menyebabkan lapisan kontak lebih bertekanan dan berbentuk karena mengesek bahan lebih kuat hal ini menunjukkan bahwa degradasi pada permukaan komposit kampas rem yang menyebabkan terabrasi. dimana yang lebih bertekanan tinggi morfologinya akan buram begitu juga sebaliknya yang bertekanan rendah morfologinya bening/cerah dikarenakan permukaan tidak rata saat proses pembuatan/ pencampuran antara serabut kelapa, aluminium dengan resin.

4. KESIMPULAN

1. Kampas rem dengan desain garis vertikal & horizontal memiliki gaya cekam tertinggi dengan nilai 126 kg, dan yang memiliki gaya cekam paling rendah adalah kampas rem dengan desain garis silang dengan nilai 95,5 kg.
2. Kampas rem dengan desain vertikal horizontal memiliki umur pakai tertinggi dengan lama pemakaian 466 hari, dan yang memiliki umur pakai terendah adalah kampas rem dengan desain garis silang dengan lama pemakaian 69 hari.
3. Kampas rem dengan komposisi 20% serabut kelapa dan 40% aluminium memiliki gaya cekam tertinggi dengan nilai 240,5 kg, dan yang memiliki gaya cekam paling rendah adalah kampas rem dengan komposisi 10% serabut kelapa dan 50% aluminium dengan nilai 98,5 kg.
4. Kampas rem dengan komposisi 30% serabut kelapa dan



30% alumunium memiliki umur pakai tertinggi dengan lama pemakaian 444 hari, dan yang memiliki umur pakai terendah adalah kampas rem dengan komposisi 50% serabut kelapa dan 10% alumunium dengan lama pemakaian 130 hari.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jiusheng Bao, Guangzhu Chen, Zhencai Zhu, Minming Tong, Yan Yin and Yuxing Peng, "Friction and wear properties of the composite brake material for mine hoister under different initial velocities", *Journal of Engineering Tribology* ; 27 June 2012, 873-879.
- [2] Choong-Fong Tang and Yafei Lu, "Combinatorial Screening of Ingredients for Steel Wool Based Semimetallic and Aramid Pulp Based Nonasbestos Organic Brake Materials", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, 1 januari 2014, 51-63.
- [3] P Dufrénoy, "Two-/three-dimensional hybrid model of the thermomechanical behaviour of disc brakes", *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol.218, 1 januari 2004, 17-30.
- [4] Dadkar N, Tomar BS and Satapathy BK. "Performance bassessment of hybrid composite friction materials based on flyash-rock fibre combination", Des 2010, 723–731.
- [5] Lu, Y. A Combinatorial Approach for Automotive Friction Materials: Combined Effects of Ingredients on Friction Performance", *Polym. Compos*, 2002, 814–823.
- [6] Shi ZY, Zhu ZC and Chen GA, "Experimental study on friction behaviors of brake shoes materials for hoist winder disc brakes", *Lubr Eng* 2006, 99–102.
- [7] Zhu ZC, Shi ZY and Chen GA. Tribological behaviors of asbestos-free brake shoes for hoist winder disc brakes", *J Harbin Inst Tech* 2008, 462–465.
- [8] Nguyen-Tajan, T. M.-L., Thomas, J.-J. and Maitournam, H, "An eulerian numerical simulation of an automotive brake disc. In Proceedings of European Conference on Braking JEF'2002", Lille, 2002, 131-138.
- [9] Smallman, R.E. dan Bishop, R.J, "*Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Materia*"l, Erlangga, Jakarta 2000.
- [10] www.stopcobrake.com/en/file/en.pdf/SAEJ661.

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR INTERPASS PADA PROSES PENGELASAN SMAW AISI 304L TERHADAP FERRIT CONTENT KEKUATAN TARIK DAN IMPAK

Moh. Syaiful Amri¹⁾, Sulistijono²⁾

Prodi Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh November¹⁾

Perum Wisma Indah Blok M No. 22 Wonorejo Selatan, Rungkut, Surabaya 60296. Indonesia¹⁾

Phone: 087866106727¹⁾

E-mail : amrismart7@yahoo.co.id¹⁾

ABSTRAK

Dalam dunia perkapalan, proses pengelasan sangat penting sekali mengingat bahwa 66 % pengerjaan menggunakan proses pengelasan. Bahan baku utama untuk membuat kapal tengker kimia adalah baja tahan karat tipe austenit. Prosedur pengelasan material stainless steel tipe austenit secara umum dibatasi temperatur interpassnya sekitar 175 °C. Untuk mencapai temperatur tersebut membutuhkan waktu yang lama sehingga menyebabkan proses pengerjaan menjadi lama dan membutuhkan biaya besar. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh temperatur interpass terhadap persentase kandungan ferrit di weld metal dan sifat mekaniknya. Pengelasan dilakukan pada material AISI 304L dengan proses SMAW menggunakan elektoda E308L diameter 2,6 mm. Proses pengelasan memvariasikan temperatur interpass 100 °C, 150 °C, 200 °C dan 250 °C. Pengujian yang dilakukan adalah pengamatan ferrit content pada struktur mikro, uji tarik, dan ketangguhan. Dari hasil pengamatan ferrit content pada struktur mikro di daerah logam las, temperatur interpass 100 °C mengandung 42,05 % ferrit, temperatur interpass 150 °C mengandung 36,21 % ferrit, temperatur interpass 200 °C mengandung 30,67% ferrit, temperatur interpass 250 °C mengandung 24,32 % ferrit. Nilai kekuatan tarik rata-rata berturut-turut adalah 590 Mpa, 582 Mpa, 578 Mpa, 574 Mpa. Nilai pengujian impak berturut-turut adalah 2,02 joule/mm², 1,89 joule/mm², 1,87 joule/mm² dan 1,76 joule/mm².

Kata kunci: Temperatur Interpass, Material AISI 304L, Proses SMAW

1. PENDAHULUAN

Teknologi pengelasan merupakan salah satu teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam penambah dan menghasilkan sambungan yang kontinyu. Sekarang ini pengelasan sangat dibutuhkan untuk menunjang pekerjaan industri khususnya dengan bahan baku logam. Proses Pengelasan banyak macamnya tergantung pada sumber energi dan pelindung logam las yang digunakan.

Dalam dunia perkapalan, proses pengelasan sangat penting sekali mengingat bahwa 66% menggunakan proses pengelasan. Bahan baku utama dari pembuatan kapal yaitu material logam. Logam dalam hal ini yaitu baja, diharapkan mampu bertahan terhadap serangan korosi sehingga masa pakai (*life time*) dari baja akan lama.

Saat ini, material yang digunakan pada fabrikasi kapal telah mengalami kemajuan dalam hal ketahanan terhadap proses korosi, sehingga dapat memberikan keuntungan dalam hal ekonomis pada pemilik kapal (*ship owner*). Salah satu dari jenis material yang memiliki ketahanan terhadap korosi adalah stainless steel tipe austenite.

Salah satu permasalahan yang terjadi pada kapal tanker kimia adalah terjadinya reaksi kimia antara muatan kimia dengan dinding ruang muat yang dapat mengakibatkan korosi yang sangat cepat. Salah satu baja tahan karat yang digunakan adalah baja tahan karat AISI 304L. Pada umumnya material ini digunakan sebagai plat ruang muat, sehingga dengan menggunakan material ini diharapkan ruang muat mampu menahan laju korosi akibat muatan yang di angkut.

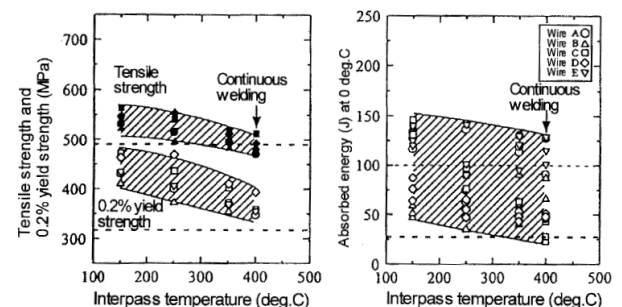
Permasalahan yang sering terjadi pada proses pengelasan stainless steel tipe austenit yaitu rentan sekali terjadi presipitasi karbida khrom yang mengakibatkan terbentuknya intergranular corrosion, ini terjadi pada saat proses

pendinginan yang lambat pada temperatur sekitar 800°C-500°C. Dimana supaya ini tidak terjadi penelitian ini mengambil material stainless steel austenite yang low karbon yaitu AISI 304L. Dengan kandungan karbon yang sedikit maka pada pendinginan antara temperatur 800°C-500°C tidak akan terbentuk karbidakrom di daerah batas butir (John S.P. 2011).

Pada material 304L kekuatan tariknya lebih rendah dibandingkan dengan material 304 dikarenakan kandungan karbon 304L lebih rendah dibandingkan dengan material 304.

Prosedur pengelasan stainless steel tipe austenit dibatasi temperatur interpassnya maximum sebesar 175°C. Untuk mencapai temperatur tersebut membutuhkan waktu yang lama sehingga menyebabkan proses pengerjaan menjadi lama dan membutuhkan biaya besar. Jika temperatur interpass di perbesar maka berpengaruh tidak terhadap persentase kandungan ferrit di weld metal, kekuatan tarik dan kekuatan impaknya.

Pengaruh temperatur interpass terhadap kekuatan tarik dapat dilihat pada Gambar 1. Bahwa semakin besar temperatur interpass maka kekuatan tariknya semakin turun.



Gambar 1. Pengaruh interpass terhadap tensile strength dan yield strength. (Turski. M, 2012)

2. METODE PENELITIAN

Material

Logam yang digunakan ini merupakan baja tahan karat tipe *austenitic* dengan ketebalan 6 mm. Material ini sering digunakan untuk aplikasi dilingkungan yang korosi dan tahan terhadap teperatur yang tinggi. Komposisi kimia dan sifat mekanik AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimi dari material AISI 304L dalam satuan %

Material	C	Cr	Ni	N	Si	P	S
304L	0,03	18-20	8-12	0,10	0,75	0,045	0,03

Sumber : ASME II Part A 2010

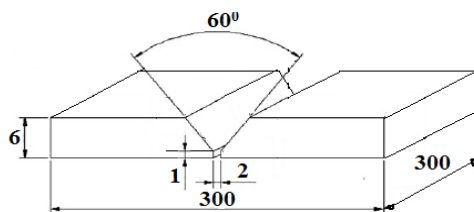
Tabel 2. *Mechanical properties* material AISI 304L

Material	Tensile Strength, Min		Yield Strength, Min		Elongation, Min, %
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	
304L	70	485	25	170	40

Sumber : ASME II Part A 2010

Desain Sambungan

pengelasan dibuat dengan menggunakan mesin potong plasma untuk memotong specimen membentuk dimensi 150 x 300 dan pembuatan sudut bevel menggunakan mesin scrap dengan sudut 60° dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain sambungan specimen las

Proses pengelasan

Pengelasan dilakukan dengan menggunakan proses las SMAW dengan langkah pertama membersihkan permukaan yang mau di las dengan grinda tangan, *Fit up specimen* yang sudah di bentuk dengan ukuran 300 x 150 x 6 dengan sudut bevel 60° dan di bersihkan.

Proses pengelasan dilakukan dengan posisi datar atau 1 G. Pengelasan *root pass* dengan elektroda E 308L & E308, Ø2,6 mm, 70-100A, polaritas DCEN. Pengelasan *fill* dan *capping* dengan elektroda E 308L, Ø2,6 mm, 70-125A, polaritas DCEP. Lakukan pengukuran *Interpass temperature* dengan Infra red temperature dengan temperatur yang digunakan yaitu 100°C, 150°C, 200°C dan 250°C.

Lakukan pengukuran parameter pengelasan seperti kuat arus, tegangan, kecepatan pengelasan, dan masukan panas dengan menggunakan alat tang ampermeter, penggaris, dan stop watch. Pertahankan H input pada proses pengelasan itu sama, antara variabel yang satu dengan yang lainnya.

Proses Pengujian

Pengujian mikroskop optik

Pengujian yang digunakan yaitu uji metalografi yaitu suatu

metode untuk menyelidiki struktur logam dengan menggunakan mikroskop optis. Struktur logam yang terlihat pada mikroskop disebut mikrostruktur. Pengamatan tersebut dilakukan terhadap spesimen yang telah diproses sehingga bisa diamati dengan pembesaran tertentu. alat yang digunakan adalah mikroskop optik Olympus DP 12 BX51M dengan perbesaran 500X.

Prosedur pengujian struktur mikro:

Pemotongan specimen diusahakan bentuk specimen datar sehingga memudahkan untuk dilakukan pengamatan.

Grinding dan *polishing* untuk membentuk permukaan *specimen* yang benar-benar halus dan rata. *Grinding* dilakukan dengan menggosok *specimen* pada *hand grinding* dari *grid* yang paling kasar hingga *grid* yang halus. Sedangkan *polishing* dilakukan dengan menggosok specimen tersebut dengan menggunakan kain woll dengan permukaan *specimen* yang dihaluskan diberi *alumina powder* dengan kehalusan 1-0,05 mikron

Proses etsa pada dasarnya adalah proses korosi yakni mengkorosikan permukaan specimen yang telah rata karena proses *grinding* maupun *polishing* menjadi tidak rata lag yaitu dengan menggunakan larutan larutan aquarigia (1HNO₃ + 2HCL).

Lakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 500X untuk melihat struktur mikro yang terdapat pada logam las.

Hitung persentase kandungan ferrit dan austenit yang terdapat pada logam las dengan menggunakan *soft ware* OMI (*Olympus Micro Image*) versi 4.5.1.22 serial number 41N45197-31019.

Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik dari hasil pengelasan. Pngujian ini dilaksanakan di lab uji bahan PPNS dengan jenis mesin SHIMADZU 600 kN.

Prosedur pengujian tarik yaitu menyiapkan Spesimen. Ratakan dengan kikir ujung-ujung permukaan specimen bekas proses pemotongan agar mendapatkan hasil pengukuran yang lebih presisi. Pembuatan gauge length dengan cara mengambil penitik dan tandai specimen. Untuk specimen dan plat sepanjang 60 mm. Posisikan gauge length tepat ditengah-tengah specimen. Mengukur dimensi specimen dan mencatat hasil pengukuran pada form lembar kerja jangan lupa ditulis jenis specimen yang mau diuji. Pengujian pada mesin uji tarik Ukur perpanjangan setelah pengujian Hitung tegangan dan regangan dari hasil beban dan perpanjangan

Pengujian Impak

Pengujian impact dilakukan untuk mengetahui kekuatan impact dari hasil pengelasan dengan memberikan beban mendadak terhadap material yang diujikan. Pengujian Pengujian impact dilakukan dengan menggunakan referensi AWS D1.1 yang mengatur tentang standar untuk pelaksanaan pengujian impact. Alat yang digunakan adalah mesin HELLING Sylvesterallee 2, D-2000 HAMBURG 54. Pengujian impact dilaksanakan di laboratorium uji bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Prosedur pengujian impact yaitu pertama lakukan persiapan specimen yang sudah dibentuk menurut standart dimensi specimen uji impact. Kemudian lakukan penandaan specimen agar memudahkan identifikasi pengujian menurut variabel- variabel yang diberikan. Selanjutnya mengukur dimensi seperti panjang, lebar, tebal notch dan radius takikan menggunakan profil proyektor untuk memastikan hasil

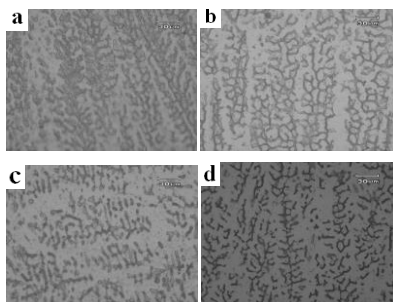
pengujian impact benar-benar valid, karena radius takikan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi nilai hasil pengujian impact.

Mengkondisikan specimen pada temperatur -50°C , 27°C dan 100°C dengan menggunakan media pendingin dry ace dan heating element ditunggu ± 15 menit, pengukuran suhunya menggunakan termocouple dan infra red untuk memastikan suhu pada specimen tersebut sesuai dengan yang disyaratkan. Pengujian pada mesin impact mengatur jarum pada posisi 0, tempatkan bandul pada posisi awal, ambil specimen dan letakkan pada tempatnya secara cepat dan tepat, terutama untuk specimen kondisi -50°C dan 100°C agar suhunya tidak berubah.

3. HASIL PENELITIAN

Pengamatan Struktur Mikro

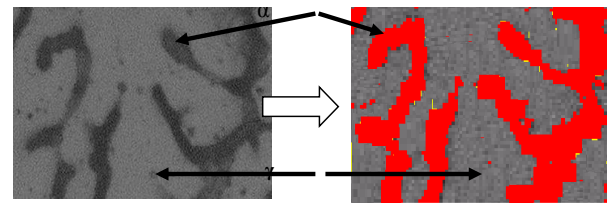
Pengamatan struktur mikro dilakukan terhadap specimen yang sudah di etsa menggunakan larutan aquarigia ($\text{HNO}_3 + 2\text{HCl}$), menggunakan perbesaran 500X. Pengamatan dilakukan pada daerah *weld metal* yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 3. Struktur mikro weld metal dengan menggunakan elektroda E 308L. (a) Interpass temperatur 100°C , (b) Interpass temperatur 150°C , (c) Interpass temperatur 200°C (d) Interpass temperatur 250°C

Pada daerah mencair (*weld metal*), struktur fasa yang terbentuk umumnya adalah struktur delta ferit (ferit primer) yang ditunjukkan oleh warna hitam dan austenit yang ditunjukkan oleh warna putih, dengan delta ferit yang berbentuk *vermicular*, *skeletal* dan/atau *lathy* yang dihasilkan dari transformasi ferit-austenit. Selain fasa delta ferit dan austenit, tampak pula adanya presipitat yang tersebar. Austenit terbentuk melalui reaksi peritektik-eutektik dan terdapat pada batas solidifikasi ferit di akhir solidifikasi. Pada akhir solidifikasi delta ferit (ferit primer), reaksi peritektik-eutektik membentuk austenit sepanjang sel ferit dan batas dendrit. Ketika solidifikasi selesai, struktur mikro terdiri dari dendrit-dendrit delta ferit (ferit primer) dengan *layer* interdendritik austenit. Ketika *weld metal* membeku melalui dua fasa delta ferit + austenit, ferit menjadi semakin tidak stabil dan austenit mulai “memakan” ferit melalui reaksi difusi terkontrol. Hal ini dikarenakan pada daerah *weld metal* terjadi pencairan. Dengan pencairan, maka logam akan berubah strukturnya dan berubah pula kekuatan mekaniknya sesuai dengan laju pendinginan yang dialami logam tersebut. Fasa yang terbentuk pada *weld metal* yaitu *austenit*, *dendritic*, dan *delta ferit* yang dapat ditunjukkan pada Gambar 4. *Dendritik* terbentuk dikarenakan proses pendinginan yang cepat. *Delta ferit* sangat menguntungkan dalam logam las dikarenakan dapat melarutkan unsur-unsur pengotor yang tidak lain adalah senyawa atau fasa bertitik cair rendah.

Hasil foto mikro yang diambil dengan mebandingkan daerah gelap (fasa ferit) dan daerah terang (fasa austenit) di *weld metal* dapat dihitung, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4. Dari hasil analisis tersebut didapat perbandingan fasa-fasa pada Tabel 2.



Gambar 4. Estimasi Perbandingan Fasa Menggunakan Olympus Micro Image

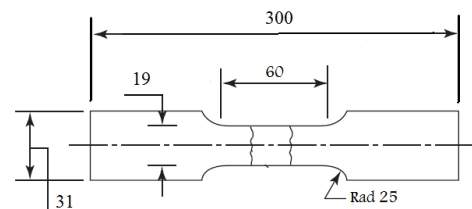
Tabel 2. Perbandingan Prosentase Fasa di *Weld Metal* (Hasil pengukuran, 2014)

Variasi	Fasa	
	Ferit (%)	Austenit (%)
Interpass Temperatur 100°C	42,05	57,95
Interpass Temperatur 150°C	36,21	63,79
Interpass Temperatur 200°C	30,67	69,33
Interpass Temperatur 250°C	24,32	75,68

Dari hasil pengamatan Prosentase Fasa di *Weld Metal* dapat disimpulkan bahwa semakin besar tempertur interpass maka kandungan ferrit pada daeral logam las berkurang sehingga ketahanan terhadap kekuatan tarik akan menurun. Hal ini disebabkan oleh temperatur interpas yang tinggi mengakibatkan pendinginan menjadi lambat maka fase ferrit yang terbentuk berkurang jika dibandingkan dengan pendinginan secara cepat.

Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan tarik dari hasil pengelasan dengan menggunakan referensi ASME IX 2010 tentang standar untuk pelaksanaan pengujian tarik. Specimen pengujian dapat dilihat pada Gambar 6.

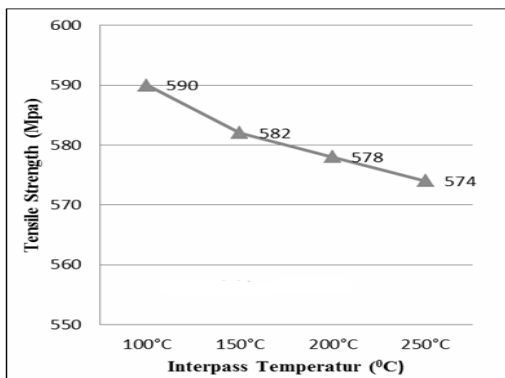


Gambar 6. Specimen pengujian tarik untuk hasil pengelasan

Data hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 7. Tentang perbandingan antara penaruh variasi temperatur interpas terhadap nilai kekuatan tarik.

Data yang didapat menunjukkan bahwa dengan proses pengelasan menggunakan temperatur interpass 100°C menghasilkan kekuatan tarik rata-rata 590 Mpa yang merupakan paling tinggi diantara yang lainnya, untuk temperatur interpass 150°C menghasilkan kuat tarik 582

Mpa, untuk temperatur 200°C menghasilkan kuat tarik 579 Mpa, sedangkan kekuatan tarik pada temperatur interpass 250°C sebesar 574 Mpa yang merupakan paling rendah kuat tariknya dibanding dengan temperatur interpass yang lainnya. Sehingga dapat kita analisa bahwa semakin besar temperatur interpass yang digunakan akan menurunkan sifat dari kekuatan tarik dari hasil proses pengelasan. Dari hasil ini membuktikan bahwa dikarenakan adanya penahanan temperatur panas pada saat proses pengelasan mengakibatkan pendinginan hasil pengelasan menjadi lambat sehingga sifat mekaniknya menjadi berkurang. Hal ini disebabkan dengan pendinginan lambat mengakibatkan kandungan ferrit pada daerah logam las semakin berkurang, dan mengakibatkan sifat mekaniknya juga berkurang. Sehingga temperatur interpass pada proses pengelasan Stainless steel AISI 304L harus dibatasi supaya menekan terjadinya pengurangan persentase kandungan ferrit yang mengakibatkan kekuatan tarik hasil pengelasan menjadi turun.



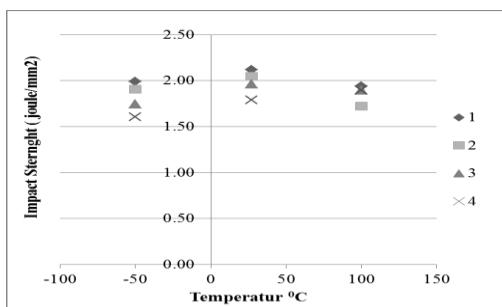
Gambar 7. Grafik pengaruh interpass temperatur terhadap nilai kekuatan tarik.

Pengujian Impak

Pengujian charpy impak dilakukan dengan tujuan melihat pengaruh temperatur interpass terhadap ketangguhan di daerah HAZ pada hasil pengelasan. Takik pada specimen di buat tepat pada daerah HAZ melalui proses etsa sebelumnya. Pengujian dilakukan dalam kondisi temperatur yang berbeda-beda yaitu - 50°C, 27°C dan 100°C.

Hasil pengujian impak charpy dapat dilihat pada Gambar 8. Dengan keterangan:

- 1 : Interpass temperatur 100°C
- 2 : Interpass temperatur 150°C
- 3 : Interpass temperatur 200°C
- 4 : Interpass temperatur 250°C



Gambar 8. Pengaruh interpass temperatur terhadap kekuatan impak pada variasi temperatur pengujian

Dari hasil pengujian impak menunjukkan bahwa interpass temperatur 100°C menghasilkan kekuatan impak yang paling besar dibandingkan dengan interpass temperatur yang lainnya dan mendekati hasil kekuatan impak dari base metalnya. Dari hasil rata-rata interpass temperatur 100°C adalah 2,02 joule/mm², interpass temperatur 150°C 1,89 joule/mm², interpass temperatur 200°C 1,87 joule/mm², interpass temperatur 250°C 1,76 joule/mm² dan kekuatan impak base metal yaitu 2,07 joule/mm².

Dalam hal ini pengujian impak yaitu kemampuan material menahan beban kejut dari luar. Keadaan ini mengalami proses pendinginan yang lambat yang disebabkan oleh temperatur interpass yang terlalu tinggi sehingga pada daerah HAZ ukuran butir menjadi besar mengakibatkan hasil ketangguhannya menjadi turun.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa :

1. Pada pengamatan struktur mikro didapatkan kesimpulan mengenai kadar *ferrit content* yang paling besar terdapat pada interpass temperaatur 100°C dan paling rendah pada temperatur interpas 250 °C sehingga dengan bertambahnya temperatur interpas mngurangi ferrit content pada daerah las-lasan.
2. Pada pengujian tarik dapat disimpulkan dengan bertambahnya temperatur interpass dapat mengurangi kekuatan tarik pada material AISI 304L.
3. Hasil pengujian impak dapat menyimpulkan tingkat ketangguhannya berkurang dengan bertambahnya temperatur interpass. Oleh sebab itu maka temperatur interpass untuk pengelasan material AIS 304L harus dibatasi supaya kekuatan tarik dari hasil las-lasan memenuhi dari standart aplikasi yang digunakan.

5. PUSTAKA

- [1] Ye Duiyi, Mi Feng, Liu Jianzhong. (2012), "Use of instrumented indentation testing to study local mechanical properties of 304L SS welded joints subjected to low-cycle fatigue loadings" Materials Science & Engineering
- [2] Turski M., Francis J.A., Hurrell P.R., Bate S.K., Hiller S., Withers J. (2012), "Effects of stop-start features on residual stresses in a multipass austenitic stainless steel weld", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 89, 9-18.
- [3] John S. Petro. (2011)." Effect of Interpass Temperature on The Structure And Properties Of Multipass Weldments In High Performance Nickel Alloys", Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado
- [4] Lai C.L., Tsay L.W. (2010). "The effects of cold rolling and sensitisation on hydrogen embrittlement of AISI 304L welds". Material



- Science and Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan
- [5] Zyu`rek. D. (2008). "*An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel*". Metal Education, ZKU, Karabu`k Technical F.aculty, Karabu`k 78100, Turkey
- [7] Mirshekari G.R., Tavakoli .E., Atapour M. (2014). "*Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel*" Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran
- [8] Unnikrishnan .R., Satish Idury K.S.N (2014). *Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments*. Metallurgical and Materials Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology (VNIT), South Ambazari Road, Nagpur 440010, Maharashtra, India
- [9] Lin C .M., Tsai H.L.(2012) *Effect of repeated weld-repairs on microstructure, texture, impact properties and corrosion properties of AISI 304L stainless steel* Mechanical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei 10673, Taiwan.

LAJU PENETRASI KOROSI PADA MATERIAL ALTERNATIF BANGUNAN KAPAL

Prantasi Harmi Tjahjanti¹⁾, Eko Panunggal²⁾, Darminto³⁾, Wibowo Harso Nugroho⁴⁾

Prodi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA)¹⁾

Jalan Raya Gelam 250, Candi Sidoarjo 61217, Indonesia¹⁾

Phone: 0062-31-8945444, Fax: 0062-31-8949333¹⁾

Email: prantasiharmi@umsida.ac.id ; prantasi@gmail.com¹⁾

Teknik Perkapalan FTK Institut Teknologi Sepuluh Nopember²⁾

Fisika MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember³⁾

Jalan Arief Rachman Hakim Keputih Sukolilo Surabaya, Indonesia

BPPT Lab. Hidrodinamika Indonesia UPT-BPPH Surabaya⁴⁾

Jalan Arief Rachman Hakim Keputih Sukolilo Surabaya, Indonesia^{2,3,4)}

ABSTRAK

Korosi adalah peristiwa kerusakan suatu material akibat interaksi yang tidak dikehendaki antara material tersebut dengan lingkungannya. Korosi merupakan gejala alamiah yang tidak mungkin dihindari, akan tetapi yang dapat dilakukan adalah mengendalikan proses korosi tersebut dengan menekan laju penetrasi korosi, sehingga diharapkan umur dan kualitas material dapat bertahan lama. Material alternatif bangunan kapal yang dipakai adalah material komposit dengan matrik paduan aluminium AlSi10Mg(b) merupakan material bangunan kapal berdasarkan European Nation (EN) Aluminum Casting (AC)-43100, dan ditulis EN AC-43100 (AlSi10Mg(b)), dan dicampur dengan penguat (reinforcement) bahan keramik, silikon karbida yang telah di-treatment dinyatakan dengan rumus kimia SiC*. Secara keseluruhan ditulis EN AC-43100 (AlSi10Mg(b))+SiC*. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui laju ketahanan korosi pada material komposit ini. Pengujian korosi yang dilakukan adalah uji korosi basah dan korosi kering. Perlakuan uji korosi basah dengan merendam dalam cairan asam klorida (HCl), natrium hidroksida (NaOH), natrium klorida (NaCl), dan pada cairan pH = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13. Perlakuan uji kering dilakukan dalam 2 temperatur, temperatur ruang ~ 27°C dan temperatur 100°C. Hasil yang diperoleh bahwa perendaman dalam cairan HCl, dan pada cairan pH 1, mengalami laju penetra korosi paling tinggi. Sedangkan laju penetrasi korosi tertinggi pada perlakuan uji korosi kering diperoleh pada temperatur yang lebih tinggi daripada temperatur ruang. Secara keseluruhan terlihat bahwa penambahan penguat SiC*, dapat mengurangi laju penetrasi korosi dan material komposit EN AC-43100 (AlSi10Mg(b))+SiC* merupakan material yang baik dalam menghadapi serangan korosi, karena memiliki laju penetrasi korosi lebih rendah dari standar laju penetra korosi yang diijinkan yaitu < 0,5 mm/yr.

Kata kunci: Laju penetrasi korosi, komposit, EN AC-43100 (AlSi10Mg (b)) + SiC*

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Material komposit EN AC-43100 (AlSi10Mg(b))+SiC* adalah material komposit dengan matrik paduan Aluminium Casting (AC)-43100, komposisi silikon 10 % + magnesium, dan merupakan material bangunan kapal paduan aluminium cor (aluminum casting alloy) sesuai dengan aturan DIN EN 1706. Sedangkan penguat (reinforcement) adalah bahan keramik silikon karbida (SiC) yang telah di-treatment dengan dipanaskan lebih dulu pada suhu 1100°C dan didinginkan perlahan-lahan selama 4 jam, selanjutnya diberi simbol SiC* [1]. Material ini tergolong dalam material komposit berbasis logam (Metal Matrix Composite/MMC) dengan keunggulan antara lain memiliki kekakuan yang tinggi (high stiffness), unggul dalam temperatur ruang dan kuat pada temperatur tinggi, ketahanan ausnya tinggi (high wear resistance), koefisien muai panasnya rendah [2,3] dan memperbaiki kekuatan luluh serta kekuatan retak pada bahan. Logam aluminium/aluminium alloy (Al/Al alloy) dengan penguat SiC merupakan bahan terpenting dalam kelompok MMC, karena mudah dibuat dan rendah biaya produksinya, banyak diaplikasikan untuk industri otomotif dan aerospace [4,5,6] juga dipakai untuk aplikasi pengemasan elektronik dan peralatan-peralatan yang berhubungan dengan panas [7].

Tujuan

Mengingat kegunaan bahan komposit berbasis logam ini sangat banyak maka perlu adanya proteksi diri bila terjadi korosi pada material ini. Beberapa penelitian mengenai korosi telah dilakukan, yaitu terjadi kerugian akibat korosi mencapai 2% dari nilai barang logam yang terpakai [8]. Selanjutnya diprediksi bahwa sekitar 1/3 bagian jumlah produksi logam pertahun rusak akibat korosi [9]. Cara penanggulangan korosi bermacam-macam sesuai dengan jenis korosinya, mekanisme terjadinya serta tingkat kerusakan yang ditimbulkannya. Cara penanggulangannya yang bersifat pencegahan (preventif) akan lebih baik daripada usaha setelah korosi terjadi. Karena itu dalam penelitian ini dilakukan uji korosi pada Material komposit EN AC-43100(AlSi10Mg(b)) +SiC* yaitu dilakukan pengujian korosi dengan memakai uji korosi basah dan uji korosi kering.

Manfaat

Penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi dunia ilmu dan teknologi bahan khususnya dalam rangka pengembangan bahan-bahan baru yang bernilai ekonomis, efektif dan efisien dalam era pasar bebas ini. Selain itu penelitian ini juga banyak melibatkan disiplin-disiplin ilmu lainnya selain Teknik Mesin (Materials Engineering) juga disiplin ilmu lainnya seperti



Kimia serta Teknik-teknik lainnya yang berkecimpung di dalam rekayasa bahan lainnya. Lebih jauh proses penelitian sampai dengan hasilnya dapat digunakan untuk pengembangan kelembagaan antar Perguruan Tinggi dengan Lembaga Industri.

2. METODOLOGI

Komposisi material komposit yang dibuat adalah: menggunakan matrik AC-43100 (AlSi10Mg(b)) dengan penguat SiC* bervariasi 5%, 10%, 15%. Sampel uji korosi dibuat dalam bentuk kubus dengan ukuran (1x1x1) cm³. Masing-masing dinyatakan dengan sampel 1 tanpa SiC*, sampel 2 (SiC*5%), sampel 3 (SiC*10%) dan sampel 4 (SiC*15%).

Uji Korosi Basah

Pengaruh Waktu

Sebelum di uji korosi, bahan komposit ditimbang massanya (m_0). Setelah itu di uji korosinya dengan direndam masing-masing di dalam larutan asam HCl, larutan basa NaOH dan larutan garam NaCl, dengan konsentrasi masing-masing 0,1 Molar, dalam waktu perendaman selama 6 jam dengan interval waktu tiap 2 jam. Setelah 2 jam, sampel diangkat dan dibersihkan dengan cara merendamnya ke dalam campuran larutan HCl (1000 ml), 50 gram SnCl₂ dan 20 gram Sb₂O₃ selama 15 menit. Setelah itu sampel di cuci kembali dengan menggunakan alkohol 70% dan dikeringkan, kemudian ditimbang beratnya (m) untuk memperoleh produk korosi/kehilangan berat selama pengujian dinyatakan dengan $W = m_0 - m$.

Pengaruh pH Larutan

Sampel direndam selama 2 jam dalam larutan dengan pH=1, 3, 5, 7, 9, 11, 13. Untuk pH 1, 3, 5 dibuat dari larutan HCl pekat yang diencerkan masing-masing menjadi 0,1 M, 0,001 M dan 0,00001 M. Sedangkan pH = 7 dibuat dengan cara menimbang 5,85 gram NaCl, kemudian dilarutkan hingga volume mencapai 1000ml. Kemudian untuk pH = 9, 11 dan 13 dengan cara menimbang 40 gram NaOH kemudian dilarutkan dalam 1000 ml aquades, masing-masing diencerkan 10 kali, 100 kali dan 1000 kali. Setelah 2 jam, sampel diangkat dan dibersihkan dengan perlakuan seperti pada uji korosi basah pengaruh waktu.

Uji Korosi Kering

Temperatur 100°C.

Sampel dimasukkan ke dalam *furnace* / tungku selama 96 jam dengan interval waktu tiap 24 jam. Pengangkatan dan pembersihan sampel, perlakuannya seperti pada uji korosi basah pengaruh waktu.

Temperatur Ruang ~ 27°C

Sampel diletakkan di udara terbuka (temperatur ruang) selama 96 jam dengan interval waktu tiap 24 jam. Pengangkatan dan pembersihan sampel, perlakuannya seperti pada uji korosi basah pengaruh waktu.

Metode yang digunakan dalam pengukuran laju penetrasi korosi adalah menggunakan Metode Kehilangan Berat. Metode ini digunakan sebagai ukuran ketahanan korosi, dan dapat dihitung dari persamaan di bawah ini [10]:

$$CPR = \frac{KW}{ADT} \quad (1)$$

Keterangan:

CPR = laju penetrasi korosi (*mil per year* (mpy) atau *millimeter per year* (mm/yr))

W = kehilangan berat selama pengujian (mg)

K = konstanta yang besarnya bergantung pada satuan yang dipakai.

Memakai:

K = 534 jika menggunakan mm/yr (dengan satuan A= cm²)

D = berat jenis (gr/cm³)

T = waktu (jam)

Bila nilai CPR kurang dari 20 mpy atau 0,5 mm/yr, maka nilai tersebut masih dapat diterima.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil laju korosi saat direndam dalam larutan HCl 0,1 M, HCl 0,1 M dan NaOH 0,1, dan grafik laju penetrasi korosi terhadap komposisi SiC* masing-masing ditunjukkan dalam Gambar 1, 2, 3 dan 4.

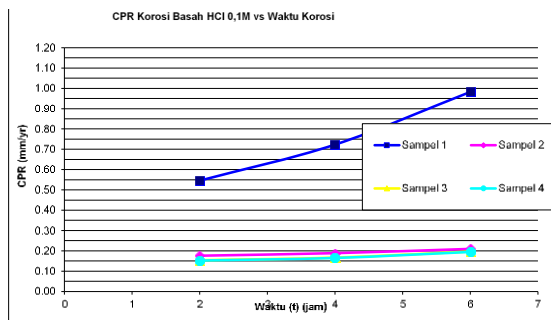
Pembahasan Hasil Uji Korosi Basah (NaOH, HCl, NaOH)

Perendaman sampel 1 (AC-43100(AlSi10Mg(b))) maupun ke tiga sampel lainnya (AC-43100 (AlSi10Mg(b))+SiC*) dalam larutan asam (HCl), mengalami laju korosi paling tinggi, dibandingkan di rendam dalam larutan NaOH dan NaCl. Sebenarnya, pada dasarnya AC-43100 (paduan aluminium *casting*) merupakan jenis logam yang akan membentuk lapisan pelindung Al₂O₃ pada permukaannya dalam lingkungan oksidasi. Lingkungan oksidasi adalah lingkungan yang dapat melepaskan/mengurangi elektron, dan dapat menaikkan tingkat oksidasi. Lapisan pelindung Al₂O₃ sangat baik, karena dapat membuat rapat arus (arus/luas, satuan Ampere/meter²) mendekati nilai nol. Namun pada saat AC-43100 direndam dalam larutan HCl, maka sampel-sampel tersebut akan mudah terkikis, karena HCl tidak memiliki oksigen. Tidak adanya oksigen dalam HCl akan menyebabkan terjadi reaksi pada sisi katoda sel galvanik, sehingga membentuk pasangan sel galvanik. Pembentukan pasangan sel galvanik dalam struktur mikro ini yang menyebabkan sampel sangat cepat terkorosi, sehingga laju korosi saat sampel direndam dalam HCl, sangat cepat/tinggi. Nilai laju korosi tercepat saat perendaman selama 6 jam adalah pada sampel 1 yaitu sampel tanpa penambahan SiC* (CPR = 0,98 mm/yr.). Nilai CPR tersebut berbahaya karena melebihi batas maksimum CPR yang diijinkan (0,5 mm/yr). Sedangkan AC-43100 yang diperkuat dengan SiC*, mengalami laju korosi yang lambat/kecil. Penambahan SiC* terbanyak (15%) yaitu sampel 4 mencapai nilai CPR sebesar 0,19 mm/yr untuk waktu perendaman 6 jam. Penambahan SiC* ini sangat efektif untuk mencegah korosi yang terjadi pada material AC-43100.

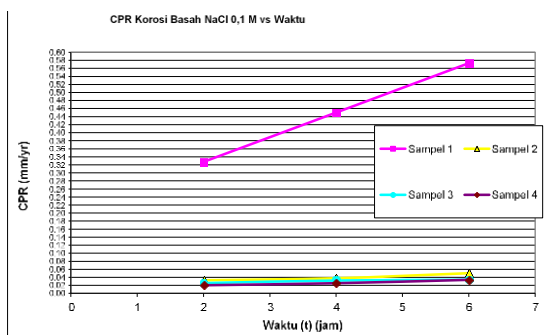
Sementara perendaman sampel dalam larutan garam (NaCl) dan basa (NaOH), juga dapat mengurangi laju korosi, namun tidak secepat yang terjadi saat perendaman dalam larutan asam. Pada kondisi basa akan terjadi reaksi reduksi oksigen/basa sebagai berikut.

Terbentuknya gas oksigen, menyebabkan perlambatan dalam proses korosi pada lingkungan basa. Nilai laju korosi untuk sampel 4: (AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC*) saat direndam dalam larutan NaOH mencapai 0,028 mm/yr, dengan waktu perendaman selama 6 jam. Sedangkan perendaman dalam larutan garam (NaCl), yang terdapat ion Na⁺ dan Cl⁻ dimana ion Cl⁻ bereaksi dengan aluminium yang

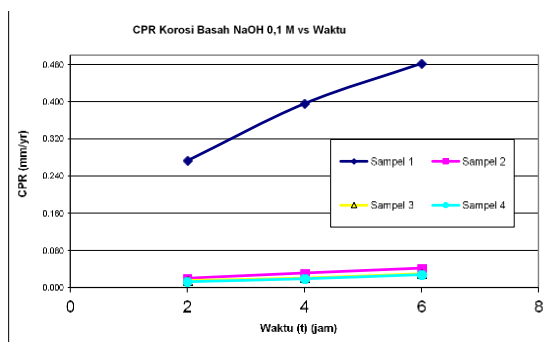
memudahkan oksigen mengikat aluminium sehingga proses pengkaratan/korosi berlangsung lebih cepat dibandingkan di lingkungan basa. Nilai laju korosi untuk sampel 4 saat direndam dalam larutan NaCl mencapai 0,034 mm/yr, dengan waktu perendaman selama 6 jam. Terlihat bahwa penguat SiC* yang ditambahkan pada material AC-43100 (AlSi10Mg(b)) dapat memperlambat CPR baik di rendam dalam larutan HCl, NaCl dan NaOH. Laju korosi terendah terjadi pada penambahan komposisi SiC* paling optimum yaitu pada sampel 4: (AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC*), untuk waktu perendaman 2, 4 dan 6 jam. Laju korosi tercepat untuk waktu perendaman 6 jam adalah saat sampel direndam dalam larutan HCl, kemudian NaCl dan yang terlama terkorosi adalah dalam larutan NaOH (gambar 4).



Gambar 1. CPR HCl terhadap waktu korosi



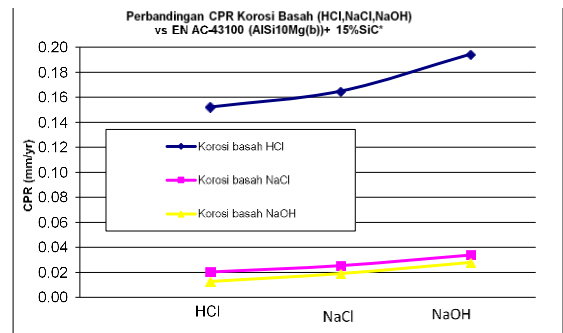
Gambar 2. CPR NaCl terhadap waktu korosi



Gambar 3. CPR NaOH terhadap waktu korosi

Pengamatan mikrostruktur (perbesaran 600 kali) hasil korosi basah (HCl, NaOH dan NaCl) terhadap waktu, ditampilkan dalam gambar 5, 6 dan 7. Terlihat bahwa pada sampel 4 yang telah mengalami korosi, khususnya di rendam dalam larutan HCl 0,1 M, dan NaCl 0,1 M, menunjukkan bahwa korosi yang terjadi menyerang matrik AC-43100 (AlSi10Mg(b)) saja, sementara penguat SiC* tetap bertahan. Korosi menyerang batas butirnya, dilihat dengan adanya warna putih yang bertambah banyak pada batas butir.

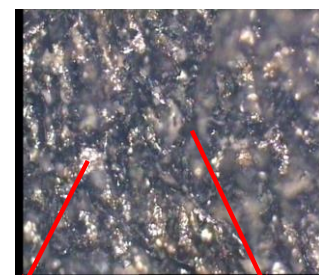
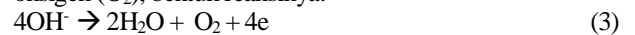
Sementara gambar pengamatan mikroskop optik (perbesaran 600 kali), untuk sampel 1 yaitu sampel yang belum dicampur/ditambah dengan penguat SiC* dan belum di korosi diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 4. Perbandingan CPR HCl, NaCl, dan NaOH terhadap sampel 4 (SiC*15%)

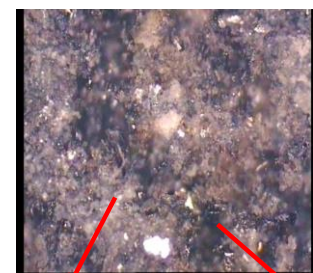


Selanjutnya ion OH⁻ dari basa akan dioksidasi menjadi gas oksigen (O₂), bentuk reaksinya:



AC-43100(AlSi10Mg(b)) SiC*

Gambar 5. Sampel 4: AC-43100(AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* Sesudah di korosi HCl 0,1M

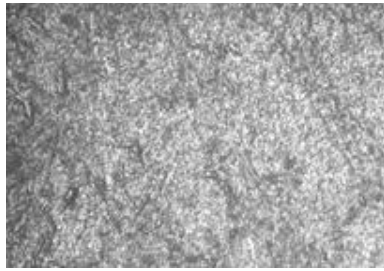


AC-43100(AlSi10Mg(b)) SiC*

Gambar 6. Sampel 4: AC-(AlSi10Mg(b)) +15% SiC* Sesudah di korosi NaCl 0,1M



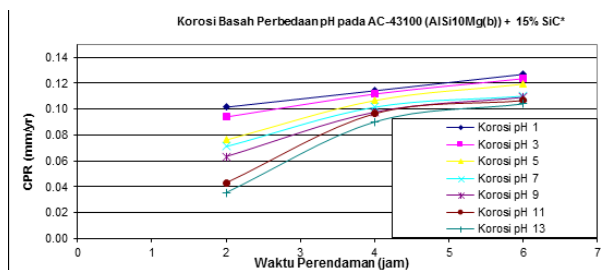
Gambar 7. Sampel 4: AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* Sesudah di korosi NaOH 0,1M



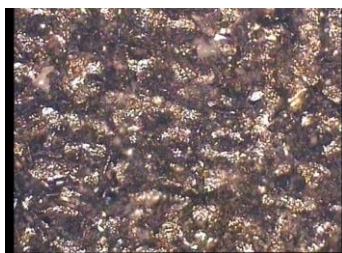
Gambar 8. Sampel 1: AC-43100 (AlSi10Mg(b)) tanpa SiC* dan tidak dikorosi

Pembahasan Pengujian Korosi Basah (Menggunakan pH 1, pH 3, pH 5, pH 7, pH 9, pH 11 dan pH 13)

Hasil yang diperoleh menunjukkan dari pH 1, pH 3, pH 5, pH 7, pH 9, pH 11, dan pH 13, terlihat bahwa nilai laju korosi (CPR) paling tinggi saat sampel direndam dalam larutan pH 1, karena pH 1 merupakan larutan yang bersifat asam kuat. Peranan pH di media korosif adalah mengubah reaksi katodik. Namun demikian laju korosi akan berkurang dengan bertambahnya penguat SiC*. Sehingga sampel 4: (AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC*), mempunyai nilai laju korosi terkecil saat sampel di rendam dalam larutan pH berapapun. Secara jelas grafik laju korosi pada komposisi sampel 4 saat direndam dalam larutan pH 1 sampai dengan pH 13 terhadap waktu rendaman, ditunjukkan pada Gambar 9.



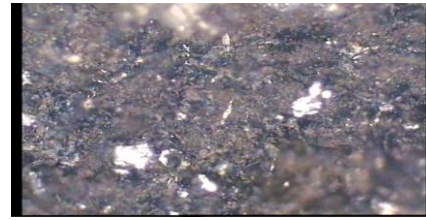
Gambar 9. Laju korosi pada komposisi AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* untuk rendaman larutan pH 1- pH 13 terhadap waktu rendaman



Gambar 10. AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* Sesudah di korosi larutan pH 1



Gambar 11. AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* Sesudah di korosi larutan pH 7



Gambar 12. AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* Sesudah di korosi larutan pH 13

Mikrostruktur hasil korosi basah (yang direndam dalam pH 1, pH 7 dan pH 13) diamati dengan mikroskop optik perbesaran 600X, terlihat pada gambar 10, 11 dan 12. Dari pengamatan gambar menunjukkan bahwa korosi pada rendaman pH 1, nampak serangan cukup tajam karena lingkungan pH 1 adalah lingkungan asam sehingga cukup kuat menyerang sampel. Sementara lingkungan pH 7, tidak begitu berpengaruh pada sampel, dan pH 13 yang bersifat basa, lingkungannya membentuk gas oksigen, sehingga menyebabkan perlambatan dalam proses korosi pada lingkungan basa tersebut.

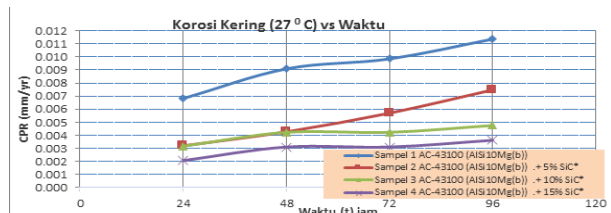
Hasil dan Pembahasan Hasil Uji Korosi Kering (Menggunakan Temperatur ~27°C dan Temperatur 100°C)

a. Menggunakan Temperatur Ruang ~27°C

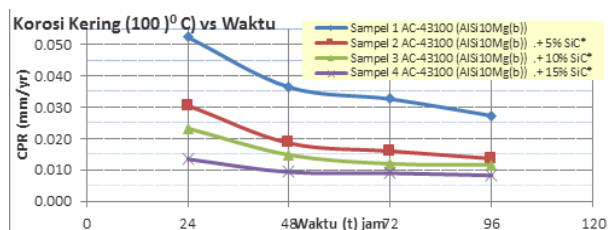
Data laju korosi untuk pengkorosian dengan memakai korosi kering temperatur ~27°C, hasil CPR gambar grafiknya ditunjukkan pada gambar 13.

b. Menggunakan Temperatur 100°C

Data laju korosi untuk pengkorosian dengan memakai korosi kering temperatur 100°C, hasil CPR gambar grafiknya ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 13. Laju korosi pada korosi kering temperatur ~27°C



Gambar 14. Laju korosi pada korosi kering temperatur 100°C



Gambar 15. AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC* Sesudah di korosi kering suhu kamar (~ 270C)



Gambar 15. AC-43100(AlSi10Mg(b)+15%SiC* Sesudah di korosi kering suhu kamar (100°C)

Pembahasan Hasil Uji Korosi Kering (Menggunakan Temperatur ~27°C dan Temperatur 100°C)

Hasil data dan grafik untuk korosi kering dengan menggunakan temperatur ~27°C dan temperatur 100°C, memperlihatkan bahwa laju korosi tertinggi saat sampel di uji korosi kering dengan temperatur 100°C. Pengaruh penambahan SiC* cukup penting, karena dapat mengurangi laju korosi, sehingga sampel 4: AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC*, mempunyai nilai laju korosi terendah baik di korosi dalam temperatur ~27°C maupun temperatur 100°C. Nilai laju korosinya mencapai 0,004 mm/year untuk temperatur ~27°C dengan waktu korosi selama 96 jam (Sampel 1: AC-43100 (AlSi10Mg(b)) tanpa SiC*, mencapai 0,011 mm/year, dengan waktu korosi yang sama). Sedangkan untuk korosi temperatur 100°C, sampel 4 mempunyai nilai laju korosi 0,008 mm/year dengan waktu korosi selama 96 jam (sampel 1 sebesar 0,033 mm/year, dengan waktu korosi yang sama). Nampak bahwa temperatur yang lebih tinggi dapat menyebabkan laju korosi bertambah cepat, karena hampir semua proses/reaksi pada temperatur tinggi mengakibatkan kecepatannya bertambah dan umumnya hasil reaksi juga bertambah banyak. Serangan korosi yang terjadi pada sampel merupakan reaksi udara langsung membentuk lapisan oksida. Sedangkan mikrostruktur hasil korosi kering (temperatur ~ 27°C dan temperatur 100°C) diamati dengan mikroskop optik perbesaran 600X pada gambar 15 dan 16.

4. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian-pengujian korosi pada material komposit AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + SiC*, adalah:

1. Laju penetrasi korosi tertinggi saat material di rendam dalam larutan HCl.
2. Laju korosi akan berkurang, saat material diberi penguat SiC*.
3. Penambahan penguat SiC yang terbanyak dalam material komposit bermatrik aluminium (sampel 4:AC-43100 (AlSi10Mg(b)) + 15% SiC*) merupakan material komposit yang paling tahan terhadap serangan korosi, artinya memiliki laju penetrasi korosi terendah.
4. Perendaman dalam larutan dengan pH 1, memiliki laju penetrasi korosi (*Corrosion Penetration Rate* (CPR)) paling tinggi, karena pH 1 merupakan larutan yang bersifat asam kuat.
5. Temperatur yang lebih tinggi dapat menyebabkan laju korosi bertambah cepat, karena hampir semua proses/reaksi pada temperatur tinggi mengakibatkan kecepatannya bertambah dan umumnya hasil reaksi juga bertambah banyak.
6. Secara umum, material komposit bermatrik aluminium, yaitu sampel AC-43100(AlSi10Mg(b)+15%SiC*, merupakan material terbaik dalam menghadapi serangan korosi, karena memiliki laju korosi terkecil.

Saran

Hasil penelitian menunjukkan begitu hebatnya serangan korosi, baik untuk korosi basah maupun korosi kering, maka saran yang cukup penting adalah:

- a. Perlu dilakukan penelitian bagaimana cara mengatasi material yang telah terkorosi.
- b. Perlu dilakukan penelitian bagaimana cara mencegah terjadi korosi, khususnya pada material komposit bermatrik aluminium

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional yang telah memberikan *support* dana untuk penelitian ini lewat skem dana Hibah Doktor.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tjahjanti P.H, Darminto, Panunggal Eko, Nugroho W.H, 2007, "Perlakuan Khusus Cara Pencampuran Bahan Penguat Silikon Karbida Dan Matrik Aluminium/Aluminium Alloy Pada Bahan Aluminium Metal Matrix Cast Composite", Prosiding Seminar Nasional Teknoin, Jurusan Teknik Mesin F.Teknik Industri Univ.Islam Indonesia (UII) Jogjakarta, ISBN: 978-979-96964-5-8, ISSN: 0583-8697.
- [2] S.F. Moustafa, Z. Abdel-Hamid, A.M. Abd- Elhay, 2002, Mater. Lett. 53 (2002) 244.
- [3] T. Lujendijk, 2000, "Interface studies of aluminum metal matrix composites", Journal of Materials Processing Technology", Vol. 103, 29-35.
- [4] Rohatgi P, 1991, Cast aluminum-matrix composites for automotive applications, JOM 1991; 43:10-15.
- [5] Koczak MJ, Khatri SC, Allison JE, Bader MG, 1993, Metal matrix composites for ground vehicles, aerospace and industrial applications, In: Suresh S, Mortensen.
- [6] Howes MAH, 1986, Ceramic-reinforced MMC fabricated by squeeze casting, JOM 1986; 38:289.
- [7] K.C. Ramesh, R. Sagar, 1999, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 15 (1999) 114.
- [8] F.N Speller, 1979, Corrosion Causes and Prevention, dikutip dari Djoewito, Korosi 1, Jakarta.
- [9] Kenneth.R, J.Chamberlain, 1991, Korosi, alihbahasa: Alex Tri Koentjono Widodo, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
- [10] Mars.G.Fontana, 1986, Corrosion Engineering, 3rd ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York.

PENGARUH WAKTU GESEK TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BAJA ST42 SEBAGAI DASAR PROSES OPERASIONAL LAS GESEK (*FRICTION WELDING*) DALAM UPAYA MEMPRODUKSI KOMPONEN PENGAIT

Nur Husodo¹⁾, Budi Luwar Sanyoto²⁾, Sri Bangun Setyawati³⁾ Rachmad Hidayat⁴⁾

Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya-Indonesia^{1,2,3)}

Jl. Arif Rahman hakim, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111. Indonesia^{1,2,3)}, 031 5922942

⁴⁾Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Sakti, Surabaya-Indonesia

Jl. Jalan Jemursari Selatan IV No.3 Surabaya-Indonesia, (031) 8494568

nurhusodo21@gmail.com, nurhusodo@me.its.ac.id, sanjoto@me.its.ac.id, rachmadjtm@gmail.com

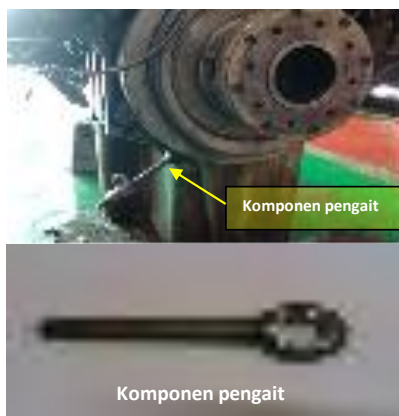
ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu gesek terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja ST 42 sebagai dasar proses operasional las gesek dalam upaya memproduksi komponen pengait. Produk komponen pengait ini digunakan di lokomotif kereta api. Produk ini diproduksi melalui proses pembentukan dan proses pemesian. Proses pembentukan yang digunakan adalah proses tempa (*forging*). Proses pemesian dilakukan dengan mesin perkakas. Jika dilihat dari bentuk produk komponen pengait terdiri dari bentuk silindris pejal dan bentuk silindris berlubang, maka ada peluang untuk dapat diwujudkan dengan menggunakan peran dari teknologi las gesek, dimana teknologi las gesek ini merupakan teknologi yang lebih ramah lingkungan. Penelitian dilakukan dengan memvariasi waktu gesek yang digunakan yaitu 50, 70, dan 90 detik dengan kecepatan putar 4500 rpm, tekanan gesek 102,12 Kgf/cm², dan tekanan tempa 612,74 Kgf/cm². Sifat mekanik sambungan dianalisa melalui uji tarik dan uji kekerasan. Sedangkan struktur mikro dianalisa melalui uji metalografi. Hasil dari penelitian ini adalah semakin lama waktu gesek 50, 70 dan 90 detik maka sifat mekanik yang dihasilkan pada sambungan semakin meningkat yang ditunjukkan dengan nilai ultimate tensile strength yang tertinggi yaitu 432,54 N/mm². Oleh karena itu las gesek dimungkinkan dapat berperan dalam proses produksi produk komponen pengait.

Kata kunci: produk komponen pengait; las gesek; waktu gesek; tekanan tempa; St 42

1. PENDAHULUAN

Las gesek merupakan metode penyambungan yang lebih ramah lingkungan dan sangat berpotensi untuk diterapkan pada proses produksi produk berbahan logam. Keunggulan metode penyambungan las gesek antara lain waktu proses cepat, tidak memerlukan logam pengisi, panas yang terjadi tidak sampai logam mencair, panas yang dihasilkan pada seluruh permukaan yang bergesekan, mudah dalam proses pengoperasian juga dapat memanfaatkan mesin perkakas yang dimodifikasi menjadi las gesek. Komponen pengait merupakan salah satu dari produk berbahan logam yang berpotensi diproduksi dengan las gesek.



Gambar 1. Letak Komponen Pengait pada lokomotif

Metode las gesek (*friction welding*) adalah metode penyambungan dua buah material logam. Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi mekanik kedalam

energi panas pada bidang interface benda kerja karena adanya gesekan selama gerak putar dibawah tekanan (gesek), Kalpakjian, 2001 [1].

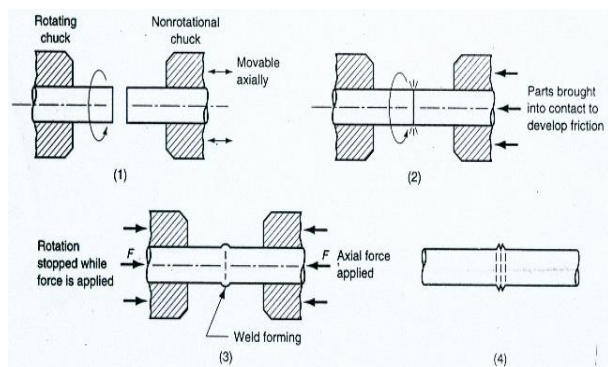
Wahyu Nugroho menyimpulkan bahwa pengaruh dari parameter tekanan gesek, tekanan tempa dan durasi gesekan dapat diketahui pada sifat mekanik dan struktur mikro [2]. Berdasarkan penelitian Eko Nur Cahyo dan Dimas Angga S [3] menyimpulkan bahwa efek waktu gesek pada pengelasan las gesek menghasilkan kekuatan sambungan pada Pipa Baja ASTM A106 yang berpotensi untuk dapat digunakan dalam proses penyambungan pipa, namun harus perlu upaya pemotongan logam bagian dalam sambungan karena adanya *upset* pada bagian dalam pipa. Penelitian pengoperasian las gesek dengan tekanan gesek telah dilakukan oleh Dwi Agus Santoso, 2011 [4]. Hasil uji puntir yang dapat dipakai sebagai acuan membuat produk front spring pin yang menggambarkan kekuatan sambungan diperoleh sebesar 16 kgf.m. Muhammad Husen Bahasa dan A.H. Fuad Efendi, 2011 [5], dalam penelitian terapan dari las gesek dalam memproduksi komponen as sepeda motor didapatkan bahwa semakin lama waktu gesek (25, 35, 45 detik) semakin meningkat kekuatan sambungannya namun akan menurun kembali ketika waktu geseknya semakin lama (55, 65 detik). Perubahan ini didukung dengan perubahan struktur mikronya. Penelitian dilanjutkan oleh Tat kala Sanggra Bhakti, 2012 [6] dengan melakukan proses pengoperasian las gesek logam baja St42 sebagai dasar pembuatan komponen front spring pin didapatkan nilai torsi nya 17 kgf.m. Penelitian juga dilanjutkan oleh Rendy Budi Hartanto, 2013,[7], dengan melakukan pengoperasian las gesek logam baja St42 dengan plat baja karbon didapatkan bahwa dengan tekan gesek 9,13 kgf/cm² dan waktu gesek 55 detik dan tekanan tempa sebesar 63,98 kgf/cm² didapatkan nilai torsi nya rata2 sebesar 20 kgf.m. Adanya struktur mikro

yang sangat halus didaerah tengah (*weld zone*) yang menyebabkan terjadinya nilai kekerasan yang tinggi sesuai dengan *Hall-Petch relation*. Sehingga kekuatan pada daerah tengah akan lebih tinggi. Akbari K.2008, [8]. Peneliti tentang aplikasi friction welding pada produk poros rotor pada kapal dilakukan oleh Ho Seung Jeong, 2010,[9]. Dengan mengevaluasi kekuatan tarik sambungan dan struktur mikro sambungan serta uji kekerasan, uji kelelahan dapat disimpulkan bahwa dihasilkan kekuatan sambungan yang sangat baik.

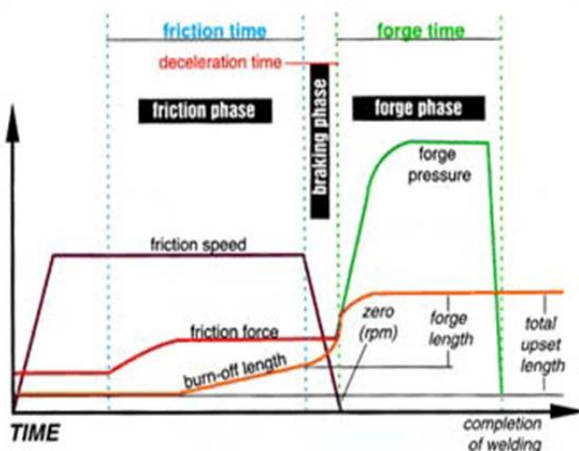
Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu gesek terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja ST 42 sebagai dasar proses operasional las gesek dalam upaya memproduksi komponen pengait dengan metode las gesek.

Metode las gesek ini, panas yang terjadi dipengaruhi oleh perubahan energi dari energi mekanik ke energi termal untuk membentuk lasan, tanpa mendapat panas dari sumber yang lain. Dalam gambar 2 ditunjukkan cara pengelasan dua poros. Tahapan proses adalah sebagai berikut: salah satu poros diputar tanpa bersentuhan dengan poros yang lain, dengan memutar pemegang (*rotating chuck*), selanjutnya poros satu sama lain disentuhkan sehingga timbul panas akibat gesek, kemudian putaran dihentikan, poros diberi gaya tekan aksial, dan sambungan las terbentuk.

Lima faktor yang mempengaruhi hasil pengelasan dengan metode las gesek yaitu kecepatan putaran, tekanan aksial (tekanan gesek dan tekanan tempa), durasi pengelasan, propertis material, kondisi permukaan benda kerja.



Gambar 2. Proses pengelasan dengan metode las gesek, Spinler, 1994, [10]

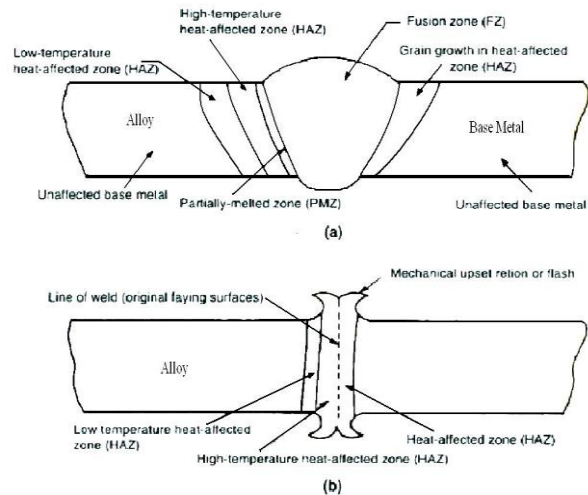


Gambar 3. Pemilihan parameter dengan waktu untuk ketiga fase dari las gesek, Spinler, 1994, [10]

Berdasarkan bentuk kurva gesek, gerakan pada *friction welding* akan di bagi menjadi tiga fase yaitu: Fase 1: fase

gesek awal (*friction phase*), Fase 2: fase berhenti (*stopping phase*) dan Fase 3: fase penempaan/*Upset (forging phase)*, dapat dilihat pada Gambar 3.

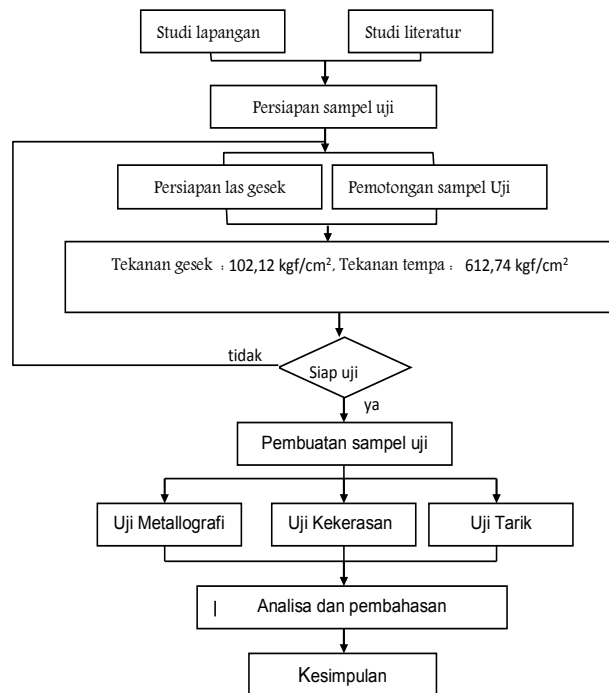
Jika dibandingkan dengan metode las fusi maka hasil pengelasan dapat dilihat pada gambar 4. Ada perbedaan yang nyata antara sambungan las fusi dengan las gesek. Pada las gesek tidak terdapat logam yang mencair sehingga panas yang terjadi pada logam las tentunya akan lebih kecil temperaturnya sehingga daerah pengaruh panas menjadi lebih kecil.



Gambar 4. Daerah las (a) Pengelasan Fusi (b) Non Fusi. Navar, A., 2002, [11]

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 5



• Komposisi

Sampel uji adalah adalah baja karbon rendah St 41 dengan komposisi sebagai berikut: C=(0,07-0,10)%, Mn=(0,3-0,6)%, Si=(0,15-0,25)%, P=0,03%, S=0,035%,

- **Dimensi**

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini menggunakan poros silinder pejal Ø 15,8 mm

- **Proses Penyambungan dengan las Gesek**

Proses penyambungan dengan las gesek dilakukan dua tahap yaitu tahap gesek (*friction phase*) dan tahap penempaan (*forging phase*).

- **Proses *Friction***

Tahap gesek dengan proses operasional antara lain kecepatan putaran 4500 Rpm, tekanan gesek 102,12 kgf/cm² dengan waktu bervariasi yaitu 50,70 dan 90 detik. Ketika proses *friction* dilakukan maka masing-masing benda kerja akan mengalami upset awal pada kedua permukaan yang disambung. Setelah waktu yang ditentukan tercapai, lalu mesin las gesek dihentikan dan kemudian dilakukan proses tempa.

- **Proses tempa**

Tahap tempa dilakukan dengan tekanan tempa sebesar (612,74 kgf/cm²). Selanjutnya benda kerja didinginkan dengan media udara pada temperatur ruangan.

- **Peralatan yang digunakan adalah**

Mesin las gesek yang digunakan dan alat pengukur temperature sebagai berikut:

1. Mesin Las Gesek langsung (*direct-drive friction welding*)
2. Infrared Thermograf



Gambar 6. Mesin Las gesek langsung

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Metallografi

Hasil uji struktur mikro pada logam induk seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Struktur mikro logam induk

Hasil uji metallografi didapatkan bahwa struktur mikro logam pada Gambar 8, 9 dan 10

Perbedaan besar butir Kristal ini terjadi adanya panas

karena gesek dan adanya tekanan tempa. Terlihat bahwa adanya tekanan tempa terlihat struktur mikro dengan butir Kristal yang semakin kecil pada logam las dan HAZ. Adanya tekanan tempa logam yang bergesek akan meningkat temperturnya dan mengalami deformasi plastis. Adanya tekanan tempa akan menghasilkan up set pada sambungan las gesek



(a)

(b)

Gambar 8. Hasil uji metallografi (a) Struktur mikro pada posisi HAZ (b) Struktur mikro pada logam las. Sampel uji ini hasil proses penyambungan baja St42 dengan diameter 15,8 mm dengan menggunakan metode las gesek (*friction welding*) dengan proses operasional tekanan gesek 102,12 kgf/cm², tekanan tempa 102,12 kgf/cm², putaran poros utama las gesek 4500 rpm dan dengan variasi waktu gesek 50 detik.



(a)

(b)

Gambar 9. Hasil uji metallografi (a) Struktur mikro pada posisi HAZ (b) Struktur mikro pada logam las. Sampel uji ini hasil proses penyambungan baja St42 dengan diameter 15,8 mm dengan menggunakan metode las gesek (*friction welding*) dengan proses operasional tekanan gesek 102,12 kgf/cm², tekanan tempa 102,12 kgf/cm², putaran poros utama las gesek 4500 rpm dan dengan variasi waktu gesek 70 detik.



(a)

(b)

Gambar 10. Hasil uji metallografi (a) Struktur mikro pada posisi HAZ (b) Struktur mikro pada logam las. Sampel uji ini hasil proses penyambungan baja St42 dengan diameter 15,8 mm dengan menggunakan metode las gesek (*friction welding*) dengan proses operasional tekanan gesek 102,12 kgf/cm², tekanan tempa 102,12 kgf/cm², putaran poros utama las gesek 4500 rpm dan dengan variasi waktu gesek 90 detik.



Hasil Uji Kekerasan

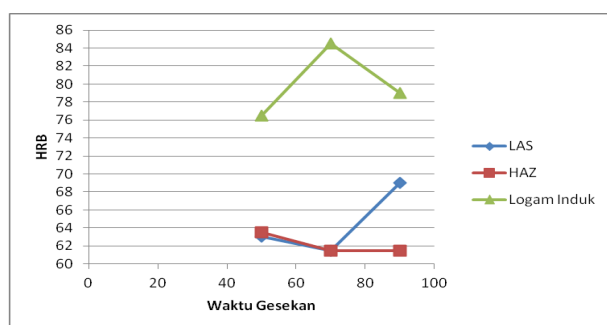
Hasil uji kekerasan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 12.

Dari Table 1. diatas diatas terlihat bahwa semakin lama waktu gesek (50,70,90 detik) dengan pemberian tekanan tempa yang sama yaitu sebesar 612,74 kgf/cm², pada sambungan las akan menghasilkan distribusi kekerasan yang menurun pada waktu 70 detik namun pada 90 detik meningkat. Namun pada daerah HAZ, distribusi kekerasan menurun.

Di bawah ini akan ditunjukkan parameter pengelasan dan hasil uji kekerasan sampel uji yang dihasilkan dalam bentuk grafik.

Tabel 1. Hasil pengujian kekerasan

No. Sampel uji	Friction				Forging	Titik Indentasi (HRB)		
	Waktu Gesek (detik)	Tekanan Gesek Kg/cm ²	Kecepatan Putaran (rpm)	Temp. (°C)		Tekanan Tempa Kg/cm ²	LAS	HAZ
1	50	102,12	4500	510	612,74	612,74	63	63,5
2	70			480			61,5	61,5
3	90			540			69	61,5



Gambar 12. Pengaruh waktu gesek 50,70,90 detik terhadap posisi titik indentasi pada logam induk, HAZ dan logam las

Dari grafik uji kekerasan diatas dapat dilihat dengan semakin lamanya waktu gesek (50, 70, 90 detik) dan pemberian tekanan tempa yang sama yaitu 612,74 kgf/cm², akan mempengaruhi distribusi kekerasan logam las, HAZ, dan logam induk, dimana akan dihasilkan distribusi kekerasan yang lebih tinggi pada logam las dibandingkan dengan HAZ. Namun pada daerah logam induk, distribusi kekerasan akan mengalami kenaikan pada waktu 50 dan 70 detik, tetapi pada waktu 90 detik akan mengalami penurunan.

Hasil Uji Tarik

Data ini diperoleh dari proses pengelasan material baja ST 42 dengan metode *direct-drive friction welding* yang berdiameter 15,8 mm dengan panjang 175 mm. Dari table 1. bisa dilihat waktu gesek sangat berpengaruh pada temperatur, yaitu temperatur pada 50 dan 70 sekon meningkat, lalu menurun lagi pada 90 sekon. Ukuran upset tetap sama seiring waktu gesek yang semakin meningkat.



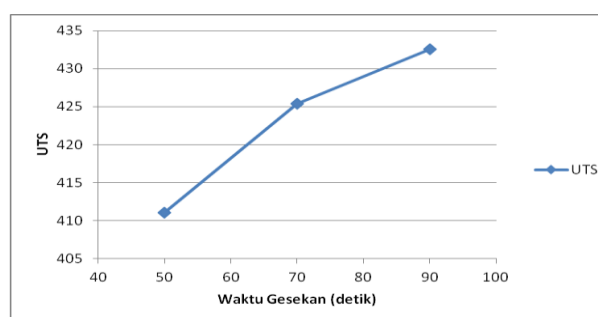
Gambar 13. Sampel uji tarik hasil penyambungan dengan menggunakan las gesek

Tabel 2. Hasil Pengujian Tarik

No. Sampel uji	Friction				Forging	UTS	UTS Rata-rata	Upset (mm)	HAZ (mm)
	Waktu Gesek (detik)	Tekanan Gesek Kg/cm ²	Kecepatan Putaran (rpm)	Temp. rata2 (°C)					
1	50	102,12	4500	538,4	612,74	399,9	411,05	4,0	2,0
2				661,8		422,5			
3				643,5		410,7			
1	70	102,12	4500	545,5	622	421,8	425,43	4,0	2,1
2				643,7		428,5			
3				676,8		425,9			
1	90	102,12	4500	635,8	618,6	435,8	432,54	4,0	2,5
2				615,3		434			
3				604,8		427,8			

Data diatas menunjukkan bahwa nilai UTS semakin besar seiring dengan variabel waktu gesek 50, 70, 90 detik yang semakin bertambah yaitu 411,05 kgf/cm², 425,43 kgf/cm², 432,54 kgf/cm².

Nilai UTS pada grafik yang ditampilkan dibawah ini merupakan nilai dari masing-masing variabel waktu.



Gambar 14. Pengaruh waktu gesek 50, 70 dan 90 detik terhadap nilai kekuatan tarik

Pada grafik menggambarkan bahwa waktu gesek sangat berpengaruh terhadap kekuatan sambungan pada produk *friction welding*. Pada grafik terlihat bahwa waktu gesek semakin lama 50, 70, dan 90 detik maka tingkat kekuatan sambungan las semakin besar dengan tekanan tempa yang sama yaitu sebesar 612,74 kgf/cm².

Dibawah ini merupakan parameter-parameter pengelasan dan kekuatan tarik yang dihasilkan beserta letak dari patahan yang terjadi pada sampel uji.

Sampel uji 1 dengan waktu gesek 50 detik menghasilkan UTS sebesar 411,05 N/mm².



Gambar 15. Gambar sampel uji 1, waktu gesek 50 detik, hasil uji tarik UTS 411,05 N/mm² (setelah uji tarik (patah pada sambungan)

Sampel uji 2 waktu gesek 70 detik, menghasilkan UTS sebesar 425,43 N/mm².



Gambar 16. Gambar sampel uji 2, waktu gesek 70 detik, hasil uji Tarik 425,43 N/mm² (setelah uji Tarik patah pada HAZ)

Sampel uji 3, waktu gesek 90 detik, menghasilkan UTS sebesar 432,54 N/mm²



Gambar 17. Gambar sampel uji 3, waktu gesek 90 detik, hasil uji tarik 432,54 N/mm² (setelah uji tarik patah pada HAZ)

Dari gambar sampel uji hasil uji tarik diatas terlihat bahwa pada waktu 50 detik mengalami patah pada sambungan sedangkan 70 dan 90 detik dengan tekanan tempa yang sama yaitu 612,74 kgf/cm², sampel uji mengalami patah pada HAZ.

Pembahasan

Hasil struktur mikro pada logam induk, daerah HAZ dan daerah logam sambungan terlihat ada perbedaan. Perbedaan ini disebabkan karena perubahan struktur mikro. Perubahan struktur mikro yang terjadi hanyalah terlihat perubahan butir Kristal dan tidak menampakkan perubahan dari phase. Tidak menampakkan perubahan fase seperti adanya martensit. Secara prinsip ada tiga faktor yang mampu merubah struktur mikro logam. Pada penerapan las gesek dalam proses penyambungan dua buah logam yang berperan besar adalah tekanan tempa. Dengan adanya tekanan tempa maka akan terjadi deformasi plastis. Tekanan tempa ini pertama tama memungkinkan adanya udara diantara kedua permukaan atau didaerah interface kedua permukaan yang bergesek akan keluar yang selanjutnya tekanan tempa memungkinkan terjadinya deformasi plastis terjadi. Semakin besar tekanan tempa akan menimbulkan deformasi plastis seiring terbentuknya *up set*. *Up set* semakin besar akan berpengaruh terhadap menurunnya ukuran panjang sampel uji. Pada parameter proses operasional las gesek dimungkinkan besarnya *ap set* akan berbeda, tetapi pada proses operasional las gesek dalam penelitian disini tidak nampak banyak perubahan, mengingat temperature yang diukur selama proses penyambungan tidak banyak perbedaan. Namun perbedaan temperatur ini ternyata menghasilkan nilai kekuatan sambungan yang berbeda. Sedangkan faktor yang mampu merubah struktur mikro selain tekanan tempa adalah tingginya temperature selama proses penyambungan dan kecepatan pendinginan setelah proses penyambungan las gesek dilakukan. Kedua faktor ini dapat dikatakan kurang berpengaruh karena waktu proses penyambungan yang relative cepat dan tidak dilakukan proses pendinginan cepat. Pada las gesek yang berpengaruh terhadap perubahan struktur adalah tekanan tempa, karena secara prinsip penyambungan dua buah logam akan tersambung manakala ada panas dan tekanan. Proses operasional las gesek ini menerapkan pemberian panas yang tidak sampai membuat logam mencair dan pemberian tekanan tempa, sehingga kedua buah logam akan dapat tersambung. Kekuatan tarik paling tinggi terjadi pada waktu proses operasional las gesek dengan durasi gesek selama 90 detik yaitu 432,54 N/mm². Perlu dicatat disini bahwa pencapaian ini terjadi pada proses operasional putaran mesin las gesek 4500 rpm, tekanan gesek 102,12 N/mm², tekanan tempa sebesar 612,74 kgf/cm² dan pada logam baja St42 dengan diameter 15,8 mm. Semua data parameter proses operasional las gesek harus dicantumkan mengingat bahwa adanya perubahan parameter proses dimungkinkan akan menghasilkan nilai kekuatan yang berbeda. Selain itu proses

operasional las gesek dengan waktu gesek semakin lama dimungkinkan dapat menghasilkan nilai kekuatan sambungan yang menurun, hal ini disebabkan semakin lama waktu gesek sumber panas yang menghasilkan panas juga akan menurun karena panas dihasilkan dari gesekan dua buah logam yang masih padat. Kalau bahan logam semakin mengalami deformasi maka sumber panas yang dihasilkan juga menurun. Pada beberapa penelitian terdahulu dihasilkan kondisi waktu optimal hanya pada penelitian ini dibutuhkan parameter waktu gesek yang lebih lama dari 90 detik untuk dapat menghasilkan kondisi optimal. Namun sebagai acuan dari hasil penelitian ini sudah cukup memperlihatkan bahwa waktu gesek menunjukkan hasil yang terbaik. Perubahan struktur berupa besarnya butir kristal ini nampak terjadi pada daerah HAZ dan logam las dan ini berkaitan erat dengan hasil pengujian kekerasan pada daerah tersebut. Ada perubahan struktur mikro ada perubahan sifat mekanik. Ada perubahan besarnya butir Kristal juga berkaitan dengan perubahan nilai kekerasan.

Ada perubahan struktur mikro ada perubahan sifat mekanik tetapi secara keseluruhan perubahan ini masih menghasilkan nilai kekuatan yang sangat baik. Walaupun proses operasional proses penyambungan las gesek relative mudah tetapi untuk dapat mengoperasikan las gesek juga harus melakukan penelitian untuk menghasilkan parameter proses operasional tertentu untuk memandu supaya menghasilkan kekuatan sambungan yang baik. Jika melakukan proses operasional las gesek dengan sembarangan maka dimungkinkan juga nilai kekuatan sambungan yang kurang baik. Kekuatan tarik paling tinggi terjadi pada waktu proses operasional las gesek dengan durasi gesek selama 90 detik yaitu 432,54 N/mm². Perlu dicatat disini bahwa pencapaian ini terjadi pada proses operasional putaran mesin las gesek 4500 rpm, tekanan gesek 102,12 N/mm², tekanan tempa sebesar 612,74 kgf/cm² dan pada logam baja St42 dengan diameter 15,8 mm

4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini disimpulkan bahwa:

1. Semakin lama waktu gesek 50, 70 dan 90 detik maka sifat mekanik yang dihasilkan pada sambungan las akan semakin membaik. Hal ini ditunjukkan dengan kekuatan tarik yang semakin meningkat seiring bertambahnya waktu gesek.
2. Kekuatan tarik paling tinggi terjadi pada waktu proses operasional las gesek dengan durasi gesek selama 90 detik yaitu 432,54 N/mm². Pencapaian ini terjadi pada proses operasional putaran mesin las gesek 4500 rpm, tekanan gesek 102,12 N/mm², tekanan tempa sebesar 612,74 kgf/cm² dan pada logam baja St42 dengan diameter 15,8 mm
3. Metode las gesek berpotensi untuk dapat dijadikan alternatif proses manufaktur komponen pengait

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih pada penyelenggara program LPPM Dikti yang telah memberikan kepercayaan dalam program IbM tahun 2013 dengan topik IbM kelompok Usaha komponen otomotif, juga mahasiswa Pungky Indra Kusuma yang ikut bersinergi dalam program ini yang dikaitkan dengan tugas akhir D3 Teknik Mesin FTI ITS.



6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kalpakjian, Serope, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Fourth edition. Pearson Prentice Hall International. 2001.
- [2] Wahyu Nugroho, Pengaruh durasi gesekan, tekanan gesek dan tekanan tempa terhadap kekuatan sambungan las gesek langsung pada baja karbon AISI 1045, *Tugas Akhir Teknik Mesin*, FTI, ITS, Surabaya. 2010.
- [3] Eko Nur Cahyo dan Dimas Angga S., Analisa Pengaruh Waktu Gesekan Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada Pipa Baja ASTM A106 dengan Metode Friction Welding”, *Tugas Akhir D3 Teknik Mesin*, FTI, ITS, Surabaya, 2010.
- [4] Dwi Agus Santoso, Analisa pegaruh tekanan tempa terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja St41 dengan menggunakan metode direct-drive friction welding sebagai alternative pembuatan front spring pin T-120, Progd D3-Mesin, ITS, Surabaya, 2011.
- [5] Muhammad Husen Bahasa, Analisa pengaruh waktu gesekan dengan metode direct drive friction welding terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja St 41 sebagai alternative pengganti proses produksi as roda sepeda motor. *Tugas Akhir D3 Teknik Mesin*, FTI, ITS, Surabaya, 2011.
- [6] Tatkala Sanggra Bhakti, Analisa pengaruh waktu gesek terhadap struktur mikro dan sifat mekanik Baja St41 sebagai alternative pengganti proses produksi produk Front spring pin dengan metode direct drive friction welding, Progd D3-Mesin, ITS, Surabaya, 2012.
- [7] Rendy Budi Hartanto, Analisa pengaruh waktu gesekan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada produk spring pin Material St41 dengan metode direct-drive friction welding, Progd D3-Mesin, ITS, 2013
- [8] Akbari mousavi and Rahbar kelishami, Experimental and Numerical Analysis of the Friction Welding Process for the 4340 Steel and Mild Steel Combinations, *Welding Research*, volume 87, July 2008, p.178-186, 2008
- [9] Ho Seung Jeong dkk., Inertia friction welding process analysis and mechanical propeirties evaluation of large rotor shaft in marine turbo charger, *International journal of precision engineering and manufacturing* volume 11, no.1, page 83-88, 2010.
- [10] Spinler, 1994, What Industry Needs to know about Friction Welding, *Welding Journal*, March, p. 37 – 42.
- [11] Navar, A., 2002, “*The Steel Handbook*”, McGraw Hill, New York.

SISTEM PENGAMAN SEPEDA MOTOR DENGAN STANDAR TENGAH HIDROLIK DAN PENERAPANNYA PADA SEPEDA MOTOR MATIC YAMAHA MIO SPORTY

Joni Dewanto dan Ferryando Tanicka

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, UK Petra

Jl. Siwalankerto No: 121-131, Surabaya 60236

Email : jdewanto@peter.petra.ac.id

ABSTRAK

Sistem pengaman sepeda motor dari tindak pencurian, senantiasa terus dikembangkan dengan berbagai model dan bentuk kunci. Kebanyakan sepeda motor dilengkapi kunci stang yang terpisah dan atau menyatu dengan kunci start-stop engine. Namun demikian kunci kunci yang ada pada umumnya masih mudah dirusak, bahkan dalam waktu yang sangat singkat, sehingga, kasus pencurian sepeda motor masih marak terjadi. Untuk menghambat proses pencurian sepeda motor dengan mudus perusakan kunci, banyak ditawarkan “kunci roda” sebagai kunci pengaman tambahan. Kunci tersebut sebenarnya cukup efektif, tetapi kurang diminati oleh sebagian besar masyarakat. Banyak pemilik sepeda motor mengeluhkan cara menggunakannya yang agak sulit atau merepotkan. Penelitian ini dimaksudkan untuk menambah sistem kunci pengaman yang sudah ada pada sepeda motor tetapi mudah dioperasikan. Sistem pengaman yang ditambahkan berupa standar tengah hidrolik yang dapat mengangkat dan menahan sepeda motor pada standar tengahnya. Dalam kondisi tertahan, maka salah satu roda sepeda motor tidak menyentuh tanah, dan sepeda motor tidak dapat dijalankan. Sistem ini bagian utamanya terdiri dari tangki hidrolik, pompa, aktuator, katup pengatur arah aliran, dan saluran hidrolik. Untuk mengoperasikannya digunakan tombol listrik tiga posisi yang diletakkan di dalam atau di bawah jok sepeda motor. Sistem ini mudah dioperasikan oleh pemilik sepeda motor, tetapi cukup sulit dijangkau dan dibongkar oleh pencuri. Rancangan sistem pengaman tersebut telah diterapkan pada sepeda motor Yamaha Matic Mio Sporty dengan sedikit modifikasi, khususnya terkait untuk pemasangan sistem hidrolik dan elektriknya. Kemudahan operasi dan keandalan sistem ini juga telah di uji dengan dan tanpa beban secara berulang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengaman yang dibangun dapat bekerja dengan baik, handal dan mudah dioperasikan.

Kata kunci: Sistem hidrolik, sistem pengaman, sepeda motor.

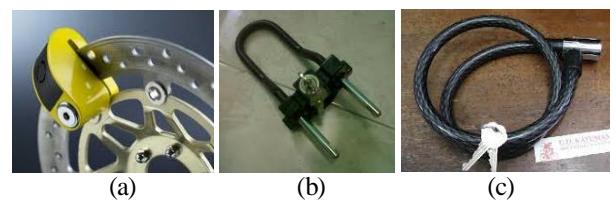
1. PENDAHULUAN

Dewasa ini sepeda motor menjadi alat transportasi yang paling banyak digunakan oleh berbagai kalangan masyarakat, baik mereka yang tinggal di pedesaan maupun di perkotaan. Dipedesaan, sepeda motor terbukti dapat menjadi alat transportasi yang handal, mampu digunakan untuk membawa berbagai hasil pertanian dan kebutuhan serta mampu melewati berbagai kondisi jalan. Diperkotaan, sepeda motor juga terbukti menjadi alat transportasi yang sangat mobile, murah, gesit dan mampu menembus kepadatan lalu lintas. Data penjualan sepeda motor nasional, dari tahun ke tahun dalam 10 tahun terakhir menunjukkan angka yang terus meningkat [1]. Total penjualan sepeda motor secara nasional selama tahun 2013 lalu tercatat sebanyak 7.771.014 unit atau mengalami peningkatan dibanding tahun lalu sebesar 8,81% [2]. Bahkan Asosiasi Industri Sepedamotor Indonesia (AISI), telah menginformasikan bahwa pada kuartal pertama (Januari-Maret) 2014 ini, telah terjual hampir 2 juta unit sepeda motor [3]. Sejalan dengan vitalnya sepeda motor bagi masyarakat, maka setiap sepeda motor juga dilengkapi dengan kunci pengaman untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya tindak pencurian kendaraan. Untuk sepeda motor yang diproduksi hingga disekitar tahun 1990an, biasanya dilengkapi kunci stir dan on-off mesin yang dioperasikan dan ditempatkan secara terpisah. Kunci stir berfungsi sebagai pengaman. Sedang kunci on-off mesin merupakan bagian dari prosedur pengoperasian sepeda motor yang sekaligus juga dapat berfungsi sebagai alat pengaman kendaraan.

Dalam perkembangannya cara pengoperasian kunci stir dan on-off mesin yang terpisah dirasa kurang nyaman dan tidak praktis. Dewasa ini, hampir setiap sepeda motor dilengkapi kunci stir dan on-off mesin yang menyatu. Pengguna

sepeda motor tinggal memutar kunci 2 kali (tahap) ditempat atau lubang kunci yang sama. Gerak memutar pertama digunakan untuk membuka atau mengunci stir dan putaran berikutnya adalah untuk mengaktifkan atau mematikan kunci on-off mesin. Berbagai tipe dan inovasi kunci telah dikembangkan dan dipasang pada sepeda motor agar kasus pencurian motor dengan modus “pembandrekkan” kunci tidak mudah terjadi. Namun demikian, upaya ini belum dapat mengurangi maraknya kasus pencurian sepeda motor. Dalam banyak kasus, pencurian sepeda motor dapat dilakukan dengan sangat cepat dan mudah dengan modus perusakan kunci.

Dewasa ini, dipasar komponen atau peralatan sepeda motor juga ditawarkan beragam kunci pengaman tambahan. Pada umumnya berupa rantai pengikat roda atau batang kaku yang dipasang di garpu depan. Secara sederhana juga sering dilakukan dengan memasang kunci “gembok” pada rantai penggerak. Beberapa cara dan model kunci tambahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Cara dan Ragam Kunci Pengaman Tambahan (a) Gembok pada Disk Brake (b) Garpu Penghalang (c) Kawat/Rantai Pengikat

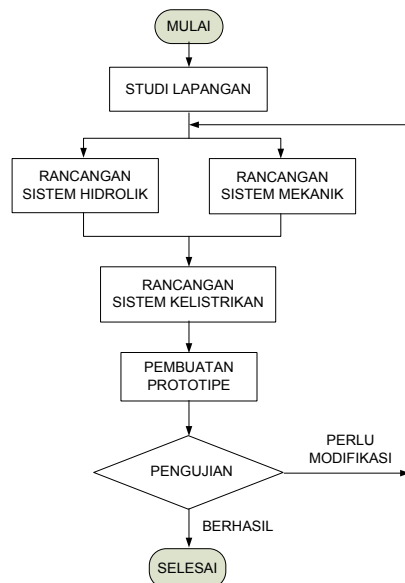
Pemasangan kunci tambahan ini sebenarnya cukup efektif mengurangi niat untuk mencuri. Pencuri menjadi tidak

dapat dengan mudah dan cepat melakukan kerusakan semua kunci. Akan tetapi, kebanyakan pemilik sepeda motor tidak berminat dengan kunci pengaman tambahan ini. Kalaupun ada, biasanya hanya tekun (mau) menggunakan beberapa waktu saja. Seterusnya banyak yang tidak mau menggunakan lagi karena penggunaan kunci pengaman tambahan ini memang agak merepotkan dan tidak praktis.

Penelitian ini dimaksudkan untuk membuat sistem pengaman tambahan pada sepeda motor yang praktis dan mudah dioperasikan, tetapi sekaligus juga tidak mudah dibongkar oleh pencuri. Dari studi awal yang dilakukan, ditetapkan bahwa pengaman yang ditambahkan adalah berupa standar tengah hidrolik yang dapat mengangkat dan menahan sepeda motor pada standar tengahnya. Dalam kondisi tertahan, maka salah satu roda sepeda motor tidak menyentuh tanah, dan sepeda motor tidak dapat dijalankan. Selain sebagai pengaman, sistem ini sekaligus juga dapat berfungsi untuk mempermudah proses parkir sepeda motor yang kokoh. Sebagai prototipe, rancangan ini secara spesifik diterapkan pada sepeda motor matic Yamaha Mio Sporty. Namun demikian, secara konseptual sistem pengaman ini dirancang agar juga dapat digunakan pada jenis sepeda motor yang lain.

2. METODE PENELITIAN

Metode dan tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan dengan Diagram Alir Penelitian seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan studi lapangan terhadap kondisi sepeda motor matic Mio. Studi ini dimaksudkan khususnya mengetahui sistem mekanik dan mekanisme standar (jagrad) tengah, penyediaan tenaga listrik, serta ruang yang tersedia untuk memasang sistem pengaman yang akan dirancang. Dari studi ini ditetapkan peletakan aktuator hidrolik, braket yang dibutuhkan dan rencana penempatan komponen hidrolik yang lain, seperti pompa, motor dan katup pengatur arah aliran.

Rancangan sistem mekanik dilakukan dengan prinsip bahwa, bilamana memungkinkan tetap mempertahankan kondisi yang ada, tetapi bila memang diperlukan sedapat

mungkin tidak melakukan perubahan yang berarti. Adapun besarnya tekanan hidrolik dan pompa yang digunakan ditentukan dari hasil analisis kinematik gerakan batang standar tengah dan titik berat sepeda motor. Sistem kelistrikan untuk mengoperasikan sistem hidrolik tersebut dirancang dengan ketentuan bahwa sistem pengaman ini secara keseluruhan harus dapat bekerja dengan mudah dan praktis. Selanjutnya hasil rancangan tersebut, dipasang pada kendaraan yang sudah disiapkan dan dilakukan pengujian alat, yang meliputi uji fungsi, keandalan dan kemudahan operasi, secara berulang. Adapun spesifikasi Yamaha Matic Mio Sporty 2006 yang berkorelasi dengan perencanaan ini antarlain adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Sepeda Motor Matic Yamaha Mio

Chasis:

- Tipe Rangka : Steel Tube
- Ban Depan : 70/90 - 14MC 34 P
- Ban Belakang : 80/90 - 14MC 34P

Dimensi:

- Panjang x Lebar x Tinggi : 1.820 x 675 x 1.050 mm
- Tinggi tempat Duduk : 745 mm
- Jarak Antar Roda : 1.240 mm
- Jarak ke Tanah : 130 mm
- Kapasitas Tangki : 3,7 Lt
- Berat Kosong : 87 Kg

Kelistrikan:

- Sistem Starter : Kick & elektrik
- Baterai : 12 Volt

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

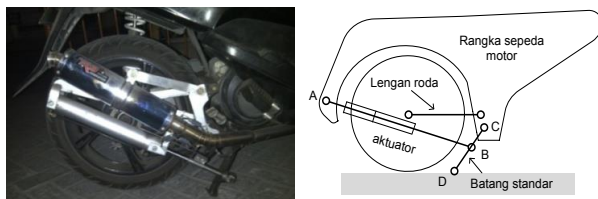
Sistem pengaman hidrolik tambahan yang dipasang pada standar tengah bagian utamanya terdiri dari tangki hidrolik, pompa, aktuator, katup pengatur arah aliran, dan selang saluran hidrolik. Untuk mengoperasikannya digunakan tombol listrik tiga posisi yang letaknya mudah dijangkau dan tombol utama yang diletakkan di dalam atau di bawah jok sepeda motor. Sistem ini mudah dioperasikan oleh pemilik sepeda motor, tetapi cukup sulit dijangkau dan dibongkar pencuri.

Peletakan dan Mekanisme Aktuator

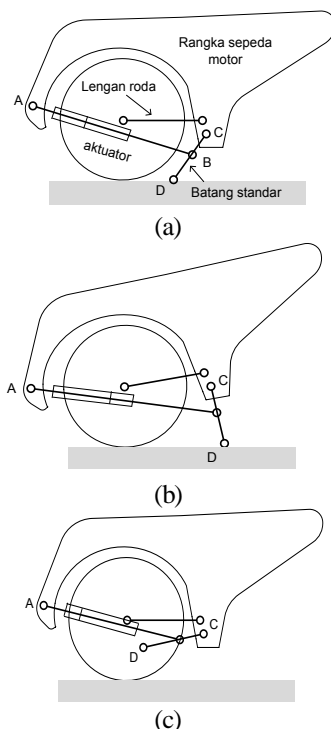
Sesuai dengan kondisi rangka, posisi serta mekanisme gerakan standar tengah yang ada, maka aktuator diletakkan dengan posisi seperti terlihat pada Gambar 4a. Gambar 4b menunjukkan gambar skematik tidak berdimensi dari penempatan tersebut. Ujung tetap aktuator (A) ditumpu dengan sebuah braket yang menyatu dengan rangka, sedang ujung gerak yang lain (B) ditumpu pada batang standar tengah. Kedua ujung aktuator ditumpu dengan sambungan engsel agar dapat mengakomodasi gerak berputar aktuator pada saat bekerja.

Pada awalnya, gerak memanjang aktuator menyebabkan batang standar berputar di engsel C yang menyatu dengan rangka, dan ujung bebas batang standar D bergerak ke bawah.

Selanjutnya, ketika ujung D sudah menyentuh tanah, maka titik putar batang standar berganti di D. Sehingga titik B dan rangka kendaraan bersama roda depan dan belakang ikut berayun ke atas dan berhenti setelah sedikit (15°) melewati titik puncaknya. Pada posisi ini sepeda motor sudah kokoh tertumpu oleh kedua ujung kaki standar dan roda belakang. Sebaliknya, untuk menurunkan rangka sepeda motor dan melipat standar pada posisi semula, dilakukan dengan cara memendekkan aktuator. Gambar 4a, b dan c, berturut-turut menunjukkan perubahan posisi relatif aktuator dalam 1 siklus geraknya.



Gambar 4. Penempatan dan Mekanisme Aktuator (a) Foto Penempatan aktuator, (b) Diagram kinematika kerja aktuator



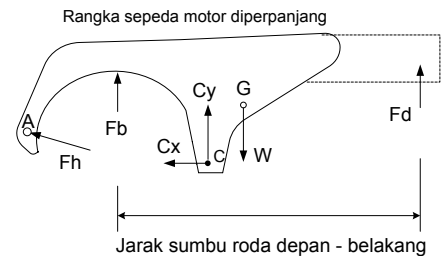
Gambar 5. Siklus Gerak Standar Tengah Hidrolik (a) Kondisi awal pengangkatan, (b) Kondisi standar tegak, (c) Kondisi standar terlipat

Perencanaan Sistem Hidrolik

Besarnya gaya hidrolik diperlukan ditentukan dari analisis pada kondisi 3system ketika kendaraan tepat akan terangkat seperti ditunjukkan pada Gambar 5a. Diagram bodi bebas rangka kendaraan (yang diperpanjang) pada saat tepat akan terangkat (bergerak) ditunjukkan pada Gambar 6. F_b dan F_d masing-masing adalah gaya reaksi tumpuan roda belakang dan depan yang besarnya ditentukan dari pengujian. W , adalah gaya berat kendaraan, besarnya sama dengan $F_b + F_d$. Letak gaya berat kendaraan (G) ditentukan dari pengukuran besarnya gaya berat kendaraan yang ditumpu oleh roda depan dan belakang. Jarak antar titik-titik tumpu yang lain diperoleh dari pengukuran, setelah dimensi batang yang ada ditetapkan

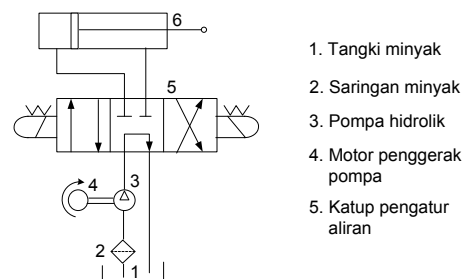
menurut fungsinya.

C_x dan C_y adalah gaya reaksi batang standar tengah pada rangka kendaraan, masing-masing pada arah horizontal dan vertical. F_h , adalah besarnya gaya hidrolik minimum yang diperlukan untuk 3system ini. Untuk itu pada diagram bodi bebas tersebut 3system bahwa hanya terdapat 3 gaya yang tidak diketahui, yaitu, C_x , C_y , dan F_h . Dengan prinsip keseimbangan, maka besarnya gaya hidrolik F_h dapat dihitung, yaitu sebesar 172 Kg.



Gambar 6. Diagram Bodi Bebas Rangka Kendaraan

Dalam rancangan ini dipilih ukuran tabung hidrolik dipasaran yang paling kecil agar mudah penempatannya. Dengan diameter tabung 4 cm, maka tekanan hidrolik yang diperlukan adalah sebesar $14,7 \text{ Kg/cm}^2$. Selengkapnya diagram sistem hidrolik yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 7



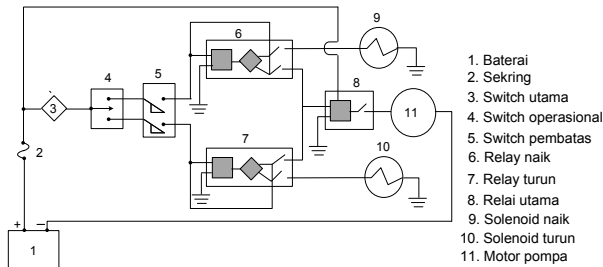
Gambar 7. Diagram Sistem Hidrolik

Untuk mengatur arah aliran digunakan katup pengatur tiga posisi jenis solenoid agar dapat dioperasikan secara elektrik. Jika katup berada di tengah seperti terlihat pada Gambar 7, maka batang standar tidak bergerak, baik untuk kondisi batang standar terlipat atau dalam kondisi terdorong maksimum. Posisi katup disebelah kiri untuk menaikkan rangka kendaraan, dimana batang standar terdorong dari posisi terlipat hingga meregang maksimum. Selanjutnya katup akan diposisikan ketengah kembali. Untuk gerakan melipat batang standar (turun), posisi katup digeser kesebelah kanan, dan proses ini juga akan dihentikan ketika aktuator telah mencapai kontraksi maksimum. Selanjutnya katup akan digeser ke posisi tengah kembali

Rancangan Sistem Kelistrikan

Diagram rangkaian kelistrikan untuk menjalankan system hidrolik ini ditunjukkan seperti terlihat pada Gambar 8. Rangkaian kelistrikan ini dilengkapi Sekring (1) untuk mengamankan sistem dari kemungkinan terjadinya arus pendek dan 2 Switch Pembatas (5) tipe normal tertutup. Kutub positif Baterai (1) dihubungkan dengan Switch Utama (3) yang terletak di bawah jok. Dari Switch Utama listrik disalurkan ke Switch operasional 3 posisi (4). Jika switch 4 di

posisi tengah, maka arus listrik terblokir. Tetapi jika switch 4 diarahkan ke kiri, maka arus listrik akan mengalir ke Relay Naik (6) yang selanjutnya akan mengaktifkan katup Solenoid Naik (9) dan Relay Utama (10), untuk menggerakkan Pompa Hidrolik (11). Proses ini berhenti ketika switch 4 dikembalikan ke posisi tengah. Tetapi proses ini juga dapat berhenti secara otomatis jika switch pembatas telah aktif, yaitu ketika tombol switch tersentuh oleh gerakan aktuatur. Selanjutnya gerak untuk mengembalikan standar tengah keposisi terlipat, dilakukan dengan mengoperasikan switch 4 ke kanan (turun).



Gambar 8. Diagram rangkaian kelistrikan

Pengujian

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui unjuk kerja sistem yang telah dirancang dan diterapkan di kendaraan dengan uji fungsi dan waktu operasi. Pengujian pertama dilakukan dengan kondisi mesin sepeda motor dalam keadaan hidup. Standar dinaikkan dan kemudian diturunkan, serta diulang dengan waktu jeda 5 menit. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Waktu Pengopersaian Standart Hidrolik [4]

Waktu (detik)	Pengujian				
	1	2	3	4	5
Naik	5,3	5,5	5,4	5,6	5,5
Turun	6,3	6,3	6,4	6,4	6,3

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik. Dalam 5 kali pengujian, sistem juga menunjukkan performa yang cukup stabil. Perbedaan waktu naik dan turun terjadi karena luasan penampang piston di dalam aktuatur pada saat naik lebih besar. Pengujian berikutnya dilakukan dengan kondisi mesin kendaraan mati. Dalam pengujian ini sistem hanya dapat bekerja sebanyak 7 kali naik dan turun secara berturut-turut dengan waktu jeda 5 menit. Hal ini dapat dimengerti karena sistem ini masih menggunakan baterai standar. Namun demikian kondisi ini tidak merisaukan karena hal ini hanya terjadi dalam kondisi darurat.

4. KESIMPULAN

Sistem hidrolik standar tengah yang dirancang dapat bekerja dengan baik, mudah dan cukup handal. Bahkan dalam kondisi darurat, dimana mesin sepeda motor tidak hidup, dan dengan baterai standar, sistem masih dapat dioperasikan dengan baik. Keandalan dari sistem ini diharapkan dapat meningkatkan keamanan kendaraan dari tidak pencurian.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Solopos.com, *Hampir 8 Juta Motor Terjual, 60% Honda*, Jakarta, Kamis, 9 Januari 2014

- [2] Investor Daily, *Honda Dominasi Penjualan Sepeda Motor 2013*, Senin 23 Juni 2014.
- [3] Pertamax7.com, *Astra Honda Motor Kuasai penjualan sepeda Motor Kuartal 1 2014 sebesar 63%, naik dari periode sebelumnya disusul Yamaha 31% dan Suzuki 4%*, 9 April 2014.
- [4] FerryandoTanicka, *Perancangan dan Fabrikasi Sistem Pengaman Motor Matic Yamaha Mio Sporty dengan Standar Tengah Hidrolik*, Mechanova, Student Journals Petra Christian University, 2014.



OPTIMASI UNJUK KERJA MESIN SINJAI 650 CC MELALUI PENGATURAN SISTEM PENDINGINAN ENGINE

Bambang Sudarmanta¹, Ary Bachtiar Krisna Putra², Devy Ratna Sari³, Dwi Cahyo Andrianto⁴

Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar, Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS^{1,2,3,4}

Kampus ITS Sukolilo Surabaya, 60111^{1,2,3,4}

Telp: 0062-31-5946230, Fax: 0062-31-5922941^{1,2,3,4}

E-mail : sudarmanta@me.its.ac.id¹, arybach@me.ac.id², tpbb@me.ac.id^{3,4}

ABSTRAK

Unjuk kerja sebuah mesin sangatlah dipengaruhi oleh ketepatan kinerja sistem pendinginan engine pada setiap kondisi operasional engine (putaran dan daya tertentu). Mesin Sinjai 650 cc yang diuji menggunakan sistem pendinginan engine dengan fluida kerja air dengan dilengkapi fan udara untuk beban pendinginan yang lebih tinggi. Untuk mengevaluasi ketepatan kinerja sistem pendinginan engine maka dilakukan pengujian unjuk kerja engine dengan sistem variable speed, dimana putaran engine divariasikan mulai 2000 – 5500 rpm dengan interval 500 rpm. Pengaturan putaran engine dilakukan dengan menambahkan beban pada water brake dynamometer. Data-data yang diukur untuk setiap putaran engine berupa mass flow rate air pendingin, temperature air pendingin masuk dan keluar engine, temperatur udara masuk dan keluar radiator, torsi engine serta konsumsi bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlu pengaturan sistem pendinginan engine pada putaran rendah dan tinggi. Heat exchanger 1 efektif mengurangi besarnya laju pelepasan panas pada interval putaran mesin 2500 s/d 5500 rpm sehingga bhp mengalami kenaikan sampai 5% dibandingkan heat exchanger 2. Dengan penurunan laju pelepasan panas rata-rata sebesar 34,2% menyebabkan kenaikan unjuk kerja berupa bhp naik sebesar 4.49%, sfc turun sebesar 50.34% dan efisiensi thermal naik sebesar 32.02%.

Kata kunci: Mesin Sinjai, sistem pendinginan engine, unjuk kerja, putaran mesin dan laju pelepasan panas.

1. PENDAHULUAN

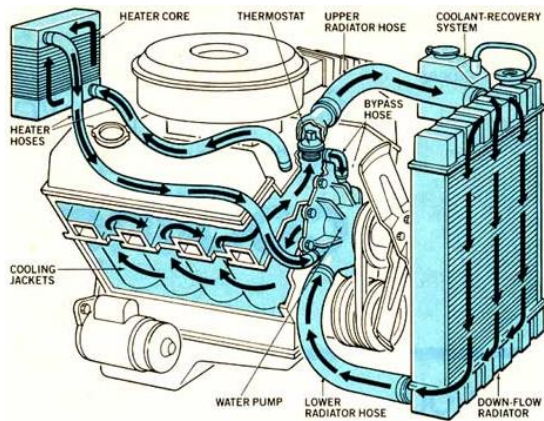
Perkembangan riset dan teknologi telah menghasilkan kemajuan dibidang prime mover, baik yang digunakan sebagai stasioner maupun mobile prime mover. Mesin kendaraan bermotor sebagai salah satu jenis mobile prime mover, pemakaiannya semakin tahun semakin bertambah, namun kalau ditinjau dari segi efektivitas pemanfaatan kerja dari proses konversi energi termal bahan bakar masih sangatlah rendah. Secara keseluruhan, dari 100% besarnya total energi yang terkandung dalam bahan bakar, hanya 25% yang dapat dimanfaatkan sebagai kerja efektif, sedangkan sisanya, sebesar 34% sebagai *exhaust gas loss*, sebesar 32% sebagai *cooling loss*, sebesar 6% sebagai *friction loss* dan sebesar 3% sebagai *pumping loss* [1].

Sehubungan dengan hal tersebut, senantiasa dikembangkan berbagai cara untuk meningkatkan besarnya kerja efektif dengan cara mengurangi losses yang terjadi. Tetapi karena setiap komponen didalam sistem mesin saling berkaitan maka dengan mengurangi atau menambah salah satu parameter mesin, maka akan berakibat naiknya atau turunnya parameter mesin yang lain. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi termal adalah dengan meminimalkan cooling system, tetapi karena temperatur ruang bakar dapat mencapai 2000°C maka akan berpotensi terjadi *over heating* yang akan merusak komponen-komponen mesin, seperti seal, piston, valve dan cylinder head. Tetapi jika cooling system dimaksimalkan atau terjadi *over cooling* sehingga besarnya efisiensi termal akan turun dan daya yang dihasilkan juga akan turun.

Cooling system dalam sebuah mesin berfungsi sebagai pelindung dari mesin dengan cara menyerap sejumlah panas dari dinding silinder. Prinsip kerja dari cooling system adalah didasarkan pada besarnya panas mesin yang terpusat pada silinder ruang bakar yang merupakan hasil dari proses pembakaran udara dan bahan bakar. Panas di ruang bakar mesin

ini dipindahkan dari sisi dalam silinder ke water jacket secara konduksi. Kemudian panas pada water jacket diteruskan ke fluida pendingin secara konveksi. fluida pendingin yang telah menjadi panas ini disirkulasikan (dipompakan) ke radiator untuk didinginkan lagi agar mampu menyerap panas kembali. fluida panas masuk radiator ke upper tank melalui upper hose, selanjutnya ke lower tank melalui tube (pipa kapiler) pada radiator core dan keluar dari lower tank melalui lower hose sudah berupa fluida dingin. Air yang telah didinginkan tersebut kembali disirkulasikan ke sepanjang water jacket sehingga terjadi penyerapan panas kembali seperti diuraikan di atas. Proses pembuangan panas dari fluida pendingin terjadi di radiator yaitu pada radiator core. Fluida panas yang mengalir pada tube memindahkan panas dari air fluida pendingin ke permukaan dalam tube secara konveksi. Panas selanjutnya dipindahkan dari permukaan dalam ke permukaan luar tube secara konduksi, dan diteruskan lagi dari permukaan luar tube ke fin (kisi-kisi radiator) secara konduksi juga. Panas dari fin radiator di pindahkan ke udara luar secara konveksi. Keseimbangan energi dalam radiator terjadi antara fluida panas yang akan melepaskan sebagian energinya dalam bentuk panas kepada fluida dingin. Apabila fluida dalam pipa bertindak sebagai fluida, maka fluida dalam sirip-sirip (fin) bertindak sebagai fluida dingin. Terjadinya perbedaan temperatur antara sisi masuk dengan sisi keluar menunjukkan adanya fenomena tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Besar pembuangan panas radiator adalah suatu nilai yang menunjukkan besarnya panas pada air radiator yang dapat dibuang ke udara luar.

Karena adanya keterbatasan pada pengembangan dari *cooling system* maka perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan operasi maksimal dari sebuah mesin, yaitu dengan mengkorelasikan antara besarnya panas yang dibuang melalui cooling system dengan kerja yang dihasilkan.



Gambar 1. Sistem pendinginan pada mesin bensin

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan pengujian terhadap mesin Sinjai dengan variasi kecepatan mulai 2000 rpm sampai 5500 rpm. Pengujian dilakukan dengan kondisi full open throttle dengan variasi beban pada water brake dynamometer untuk menurunkan putaran dan saat pengujian mesin dalam keadaan stasioner. Selain variasi kecepatan dilakukan juga variasi geometri heat exchanger yang digunakan pada mesin, variasinya yaitu heat exchanger dengan radiator straight fin dan radiator louver fin. Parameter yang diukur adalah temperatur masuk dan keluar pada radiator, temperatur masuk dan keluar water jacket serta mass flow rate pada air radiator dan mass flow rate pada udara pendingin radiator.

Selengkapnya skema pengujian untuk variasi *cooling system* yang dilakukan pada mesin Sinjai 2 silinder ditunjukkan pada Gambar 2.

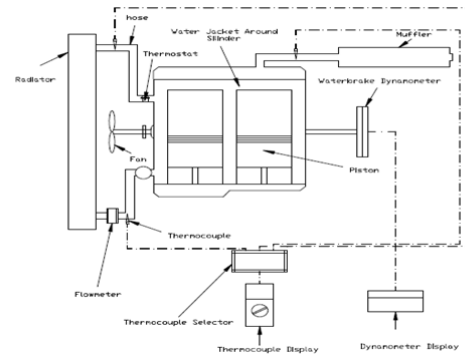
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Unjuk kerja *heat exchanger* dapat ditinjau dari harga *efektiveness* (ϵ). *Effectiveness* merupakan perbandingan laju perpindahan panas aktual terhadap kemampuan laju perpindahan panas maksimum *heat exchanger*. Harga ϵ berkisar antara 0 sampai dengan 1. Semakin besar harga ϵ suatu *heat exchanger* semakin baik dalam mentransfer panas, karena harga laju perpindahan panas aktualnya mendekati jumlah energy panas maksimum yang dapat ditransfer

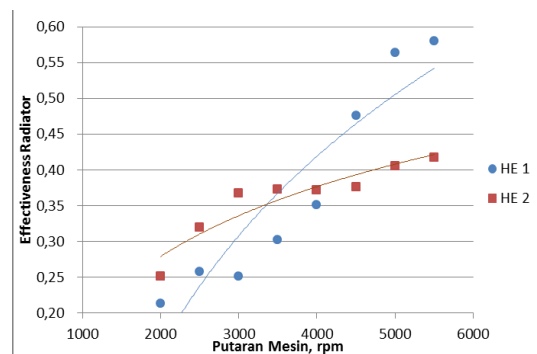
Gambar 3 merupakan grafik *effectiveness* fungsi putaran mesin, dimana putaran mesin bervariasi tergantung beban yang diberikan. Semakin tinggi beban yang diberikan kepada mesin, maka putaran mesin akan menurun. Apabila putaran mesin rendah maka debit air pendingin yang keluar dari pompa juga semakin sedikit, sehingga dengan semakin rendahnya debit air pendingin, *mass flow rate* air pendingin juga semakin rendah. Dan dengan perbedaan temperatur air masuk dan keluar radiator yang semakin rendah, maka kalor yang dibuang ke sistem pendingin juga akan semakin rendah.

Selain itu, dengan semakin rendahnya putaran mesin, maka putaran fan yang dikopel oleh poros mesin juga akan semakin rendah sehingga *mass flow rate* udara yang dihisap oleh fan juga semakin berkurang. Oleh karena itu mengacu pada persamaan $\epsilon = q_{act} / c_{min} (T_{hi} - T_{ci})$ dengan nilai Cr yang hampir sama, serta jumlah *mass flow rate* air radiator dan *mass flow rate* udara yang semakin rendah, tetapi dengan $T_{hi} - T_{ci}$ yang semakin besar maka nilai *effectiveness*nya akan semakin menurun.

Pada Gambar 3 *effectiveness* dari heat exchanger 2 (HE 2) berupa radiator dengan louver fin lebih baik, pada beban tinggi dan putaran rendah yaitu pada putaran 2000 sampai 4000 rpm, sedangkan pada putaran tinggi antara 4500 sampai 5000 rpm heat exchanger 1 (HE 1) berupa radiator dengan straight fin lebih baik.



Gambar 2. Skema pengujian cooling system mesin Sinjai



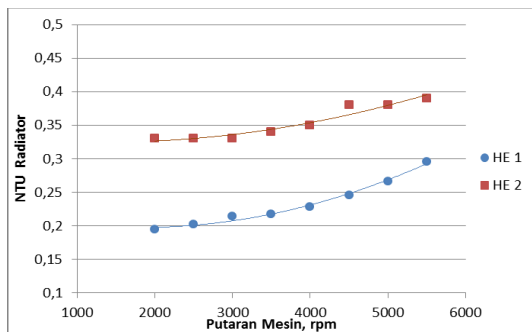
Gambar 3. Effectiveness heat exchanger radiator fungsi putaran mesin

Gambar 4 merupakan grafik NTU fungsi putaran mesin dimana semakin rendah putaran mesin maka besarnya NTU nya juga akan turun. Number of transfer unit (NTU) tertinggi terjadi pada saat putaran maksimum sehingga semakin tinggi beban yang diberikan ke water brake nilai putarannya akan semakin menurun yang berakibat nilai NTU juga semakin turun.

Hal ini dapat terjadi karena dengan semakin rendah putaran mesin, dimana beban yang diberikan ke mesin semakin besar, maka *mass flow rate* air radiator yang dialirkan oleh pompa mesin dan *mass flow rate* udara yang dihisap oleh fan juga akan semakin menurun. Dimana nilai koefisien konveksi air radiator dan nilai koefisien konveksi udara akan semakin menurun pula sehingga dengan luasan permukaan perpindahan yang sama maka overall heat transfer koefisiennya juga akan semakin menurun sehingga nilai NTU juga akan semakin menurun. Pada grafik diatas, NTU dari HE 2, yaitu radiator dengan louver fin relatif lebih baik, mulai beban rendah sampai beban tinggi dibandingkan dengan HE 1, yaitu radiator straight fin.

Hubungan *effectiveness* dan NTU secara ideal untuk Cr yang sama adalah semakin tinggi nilai NTU maka nilai *effectiveness* akan semakin naik sampai pada titik tertentu. Hal ini dikarenakan persamaan *effectiveness* fungsi NTU adalah persamaan eksponensial. Sehingga pada nilai tertentu meskipun NTU bertambah nilai *effectiveness* tidak bertambah. Sedangkan NTU sendiri dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya adalah *mass flow rate*. *Mass flow rate*

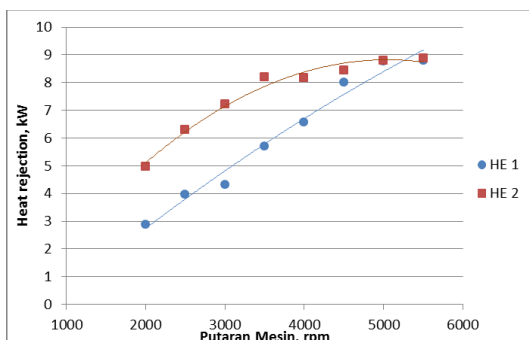
mempengaruhi nilai C_{min} dan koefisien konveksi sehingga dapat mempengaruhi nilai NTU.



Gambar 4. NTU heat exchanger fungsi putaran mesin

Gambar 5 menunjukkan grafik besar kalor yang dibuang ke air pendingin fungsi putaran mesin, dimana putaran dari mesin tergantung oleh beban yang dialirkan ke water brake dynamometer, semakin besar beban yang diberikan putaran mesin juga akan semakin turun, pada grafik diatas putaran 5500 adalah putaran saat mesin belum dibebani sedangkan putaran 2000 adalah putaran mesin saat beban maksimal,

Besarnya putaran mesin ini secara tidak langsung akan mempengaruhi besar debit air pendingin yang masuk ke radiator. Semakin besar putaran mesin maka debit air pendingin juga akan semakin besar sehingga besarnya kalor yang dibuang ke sistem pendingin juga akan semakin besar. Sedangkan untuk kedua jenis heat exchanger perpindahan panas yang lebih baik adalah heat exchanger 2 (HE 2), yaitu louver fin. Hal ini dikarenakan bentuk dari tube radiator tersebut adalah tipe flat tube, pada flat tube aliran lebih turbulen sehingga perpindahan panas lebih baik.



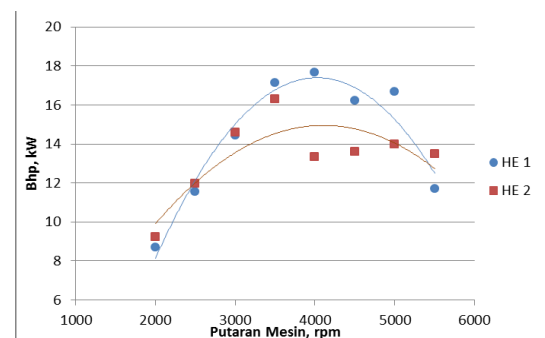
Gambar 5. Heat Rejection oleh cooling system fungsi putaran mesin

Besarnya daya motor atau brake horse power sebanding dengan torsi yang terjadi, karena hal ini berhubungan dengan beban pengereman oleh water brake dynamometer. Semakin besar beban pengereman semakin besar torsi yang terjadi. Secara teoritis, ketika putaran mesin meningkat, maka daya motor juga akan meningkat karena daya merupakan perkalian antara torsi dengan putaran poros.

Berdasarkan Gambar 6, grafik bhp fungsi putaran mesin, terlihat adanya kecenderungan kenaikan daya mulai dari putaran rendah hingga mencapai daya maksimum pada putaran tertentu lalu bhp mengalami penurunan pada putaran mesin yang lebih tinggi. Pada saat putaran semakin tinggi, maka akan semakin besar kerugian-kerugian yang terjadi. Beberapa kerugian yang mungkin terjadi pada putaran tinggi

di antaranya gesekan dan adanya pembakaran yang kurang sempurna. Semakin cepat putaran mesin maka friksi yang terjadi juga semakin besar. Selain itu pembakaran campuran bahan bakar dan udara dalam ruang bakar juga memerlukan waktu. Ketika putaran tinggi, maka dimungkinkan pembakaran yang terjadi tidak cukup cepat untuk membakar seluruh bahan bakar dalam ruang bakar atau dengan kata lain semakin banyak sisa bahan bakar yang belum terbakar dalam ruang bakar. Hal ini menyebabkan kerja yang diberikan engine menurun.

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa bhp dari heat exchanger 1 (HE 1), yaitu radiator dengan Straight fin lebih tinggi dari pada heat exchanger 2 (HE 2) yaitu radiator dengan louver fin. Hal ini di karenakan kemampuan radiator louver fin untuk mentransfer panas lebih baik sehingga pendinginannya lebih tinggi, dengan pendinginan yang lebih tinggi, maka temperatur air yang masuk mesin lebih rendah sehingga perbedaan temperatur antara air dan silinder lebih tinggi sehingga lebih banyak panas yang terbuang ke air pendingin yang menyebabkan menurunnya daya yang dihasilkan.



Gambar 6. Bhp fungsi putaran mesin

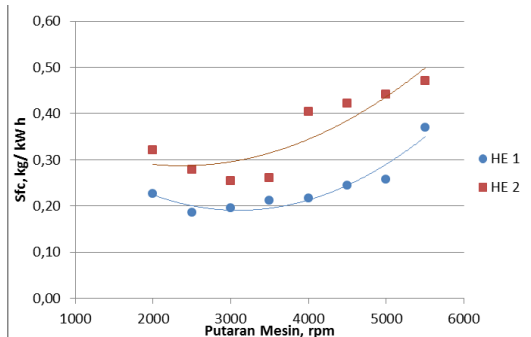
Specific fuel consumption, sfc atau konsumsi bahan bakar spesifik dapat didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar untuk memperoleh daya efektif. Besar kecilnya konsumsi bahan bakar spesifik tergantung dari sempurna atau tidaknya campuran udara dan bahan bakar yang terbakar dalam ruang bakar. Jadi faktor yang akan mempengaruhi konsumsi bahan bakar spesifik adalah besarnya daya yang dihasilkan. Secara umum konsumsi bahan bakar spesifik pada saat putaran mesin rendah ke putaran mesin tinggi akan mengalami penurunan hingga pada putaran mesin tertentu akan meningkat lagi.

Dari Gambar 7 besarnya sfc fungsi putaran mesin, terlihat adanya kecenderungan penurunan sfc mulai dari putaran rendah hingga mencapai nilai sfc optimum pada putaran tertentu, lalu sfc mengalami kenaikan pada putaran mesin yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan semakin tinggi putaran mesin, maka turbulensi aliran yang masuk ke ruang bakar akan semakin tinggi yang menyebabkan pencampuran udara dengan bahan bakar semakin baik serta perambatan api juga semakin cepat sehingga sfc akan menurun. Setelah putaran semakin tinggi, maka akan semakin besar kerugian-kerugian yang terjadi. Beberapa kerugian yang mungkin terjadi pada putaran tinggi di antaranya gesekan dan adanya pembakaran yang kurang sempurna. Semakin cepat putaran engine maka friksi yang terjadi juga semakin besar.

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa sfc dari heat exchanger 2 (HE 2) yaitu radiator louver fin lebih tinggi dari pada heat exchanger 1 (HE 1), yaitu radiator dengan straight fin. Hal ini di karenakan kemampuan radiator louver fin untuk mentransfer panas lebih baik sehingga pendinginannya lebih



baik, dengan pendinginan yang lebih baik maka temperatur air yang masuk mesin lebih rendah sehingga perbedaan temperatur antara air dan silinder lebih tinggi sehingga lebih banyak panas yang terbuang ke air sehingga daya yang dihasilkan lebih rendah maka semakin rendah bhp yang dihasilkan semakin tinggi sfcnnya.

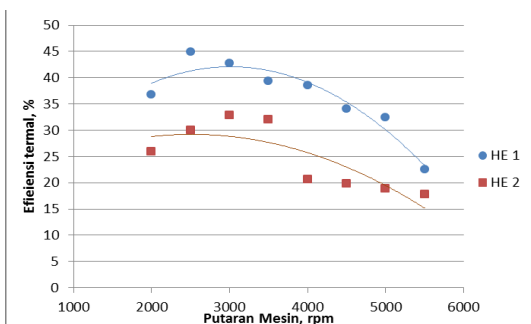


Gambar 7. Sfc Fungsi Putaran mesin

Efisiensi thermal merupakan ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh motor pembakaran dalam. Nilai efisiensi thermal tergantung dari sempurna atau tidaknya campuran udara dan bahan bakar yang terbakar dalam ruang bakar.

Pada Gambar 8 besarnya efisiensi thermal fungsi putaran mesin memiliki kecenderungan grafik yang meningkat mulai dari putaran rendah hingga titik optimum, kemudian akan turun seiring dengan bertambahnya putaran mesin. Pada saat putaran rendah, maka pencampuran bahan bakar berlangsung kurang optimum, sehingga pembakaran yang terjadi kurang sempurna. Pada titik optimum turbulensi bahan bakar dan waktu pembakaran mencapai kondisi yang terbaik sehingga mendapatkan efisiensi yang tertinggi. Pada penambahan putaran mesin yang terlalu tinggi justru turbulensi yang terjadi cukup besar sehingga pencampuran bahan bakar dan udara baik tetapi waktu terjadinya pembakaran sangat cepat sehingga bahan bakar banyak yang terbuang.

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa efisiensi thermal heat exchanger 1 (HE 1), yaitu radiator straight fin lebih baik dibanding dengan heat exchanger 2 (HE 2), yaitu radiator louver fin. Hal ini dikarenakan bhp dari mesin dengan radiator straight fin lebih tinggi, semakin tinggi bhp yang dihasilkan maka semakin besar efisiensi thermalnya.



Gambar 8. Efisiensi thermal fungsi putaran mesin

4. KESIMPULAN

Optimasi unjuk kerja mesin Sinjai melalui pengaturan sistem pendinginan engine melalui komparasi heat exchanger 1 dan

2 menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

- Heat exchanger 1 efektif mengurangi besarnya laju pelepasan panas pada interval putaran mesin 2500 s/d 5500 rpm sehingga bhp mengalami kenaikan sampai 5% dibandingkan heat exchanger 2
- Heat exchanger 1 menghasilkan penurunan laju pelepasan panas rata-rata sebesar 34,2% dibandingkan heat exchanger 2
- Penurunan laju pelepasan panas rata-rata pada point diatas menyebabkan kenaikan unjuk kerja sebagai berikut:
 - Bhp naik sebesar 4.49%
 - Sfc turun sebesar 50.34%
 - Efisiensi thermal naik sebesar 32.02%

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Oliet, A.Oliva, J.Castro, & C.D.Pe rez Segarra. "Parametric Studies on Automotive Radiators" EL-SEVIER, 2007, pp 2033- 2043.
- [2] Caterpillar. 2011. Application and Instalation Guide Cooling system, USA
- [3] Fraas, Arthur P.1988. Heat Exchanger Design. 2nded. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [4] Hall G.Tdan Jr J. Edwin. 2004. Air Cooled Heat Exchanger Design. USA
- [5] Heywood, John B.1989. Internal Combustion Engine Fundamentals. New york: McGraw-Hill Book Company.
- [6] Kays, W.M., London, A.L. 1964. Compact Heat Exchangers. 2nd ed. New York: McGraw Hill Book Company
- [7] Incropera, Frank P. Dewitt, David P. Bergman, Theodore L. Lavine, Adrienne S. 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons (Asia) PteLtd: Hoboken
- [8] Nessim,Waleed. & Zhang, Fujun."Powertrain Warm up Improvement using Thermal Management Systems". May 2012. International Journal of Scientific & Technology Research vol 1, 2277-8616.
- [9] Sany, Esmaili, Saidi, M.H., dan Neyestani, J. March 2010. "Experimental Prediction of Nusselt Number and Coolant Heat Transfer Coefficient In Compact Heat Exchanger Performed With E-Ntu Method".The Journal of Engine Research, vol 18.

MENEJEMEN ENERGI UNTUK PENGATURAN FWD, RWD, 4WD, DAN SAAT BELOK DENGAN *DIRECT WHEEL DRIVE*

Herry Sufyan Hadi^{1*}, I Nyoman Sutantra², Bambang Sampurno²

Mahasiswa Program Magister, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia^{1*}

herry12@mhs.me.its.ac.id (081938074022)

Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia²

ABSTRAK

Pada saat ini, pengembangan tentang kendaraan dengan penggerak roda langsung (*Direct Wheel Drive*) semakin ditingkatkan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konsumsi energi kendaraan. Pada sistem ini menggunakan motor listrik sebagai penggerak roda langsung di setiap roda. Permasalahan utama dari sistem ini terletak pada penggunaan energi *on road* dan *off road*, sehingga pada tulisan ini disajikan hasil simulasi pengembangan manajemen energi pada kendaraan *on road* FWD-RWD dan *off road* 4WD pada *Direct Wheel Drive*. Selain itu, pada sistem ini tidak dibutuhkan gardan karena untuk membelokkan kendaraan dilakukan dengan pengendalian arus yang masuk pada setiap motor. Studi ini dilakukan secara simulasi menggunakan bantuan software Matlab-Simulink. Metoda simulasi yang digunakan dalam kendaraan *on road* yaitu berdasarkan besarnya gaya normal pada roda depan atau belakang. Jika gaya normal roda depan lebih besar, maka digunakan sistem FWD, apabila gaya normal roda belakang lebih besar, maka digunakan sistem RWD dan jika gaya normal roda depan dan roda belakang sama, maka digunakan sistem 4WD. Dari simulasi yang telah dilakukan, maka didapatkan bahwa sistem FWD, RWD, dan 4WD dipengaruhi oleh besarnya muatan kendaraan, percepatan, kecepatan angin, gaya angin, percepatan, letak muatan, dan kemiringan jalan. Selain itu pada jalan *off road* 4WD lebih cocok digunakan daripada sistem yang lain.

Kata kunci: *driving cycle, Direct Wheel Drive, FWD, RWD, 4WD*

1. PENDAHULUAN

Krisis energi dan kerusakan lingkungan akibat pemanasan global memaksa industri otomotif dunia untuk mengembangkan mobil listrik. Mobil Listrik dikenal dalam dua jenis, diantaranya; Zero Emission Vehicles (ZEV) dan Low Emission Vehicles (LEV). Mobil listrik yang di kategorikan menjadi Zero Emission Vehicles adalah Mobil Baterai (*Battery Operate*) dan Mobil *Fuel cell*. Sedangkan yang dikategorikan menjadi LEV adalah mobil yang sistem penggerakannya memadukan antara *convensional engine* dengan motor listrik (mobil *Hybrid*).

Kendaraan listrik ini mempunyai efisiensi yang tinggi. Hal ini karena pada kendaraan listrik, tidak menggunakan sistem transmisi. Selain itu, tidak mengeluarkan bunyi bising (*noise*). Berbeda halnya dengan kendaraan yang menggunakan *convensional engine*. Hal ini merupakan kebalikan dari mobil listrik yang masih menggunakan sistem transmisi sehingga banyak energi yang terbuang pada inersia roda gigi transmisi. Untuk itu sistem penggerak roda langsung akan memberikan keuntungan untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi.

Selain penggerak roda langsung, sistem penggerak (FWD, RWD, dan 4WD) juga memberikan pengaruh terhadap penghematan energi. Sistem penggerak FWD (*Front whell drive*) adalah sistem penggerak yang menggunakan semua energi untuk menggerakkan poros roda depan, seperti *city car*. Sistem penggerak RWD (*Rear Whell drive*) adalah sistem penggerak kendaraan yang menggunakan semua energi penggerak untuk menggerakkan poros roda belakang, contohnya adalah mobil angkutan barang. Sedangkan sistem penggerak 4WD (*Four Whell drive*) adalah sistem penggerak yang menggunakan semua energi untuk menggerakkan poros roda depan dan poros roda belakang, seperti mobil *off road*.

Beberapa penelitian tentang penggerak roda langsung sudah pernah dilakukan oleh beberapa peneliti. Guilin T. et.

all (2005) pernah melakukan simulasi tentang penggerak roda langsung pada kendaraan listrik dengan menggunakan motor BLDC sebagai penggerak dengan sistem kontrol PI untuk mengendalikan kecepatan. Dari hasil analisis didapatkan bahwa sistem control yang dibuat lebih praktis dan kompetitif. Selain itu didapatkan pula bahwa rata-rata tegangan operasi adalah 220 volt dan arus yang digunakan sekitar 45 A. Chen G. H. et. al. (1996) juga pernah melakukan penelitian untuk mendesain sebuah Permanent-magnet *Direct-driven Wheel Motor Drive* untuk kendaraan listrik. Penelitiannya berisi tentang desain penggerak roda langsung tanpa sistem transmisi, tanpa kopling, dan sistem gardan pada kecepatan rendah dan torsi yang tinggi. Motor ini didesain dan dioptimasi menggunakan metode elemen hingga menggunakan Maxwell 2D untuk mendapatkan spesifikasi motor yang efisien. Dari hasil penelitiannya didapatkan bahwa motor yang digunakan mempunyai titik operasi 6,2 KW pada 1000 rpm. Dengan menggunakan sistem kontrol loop tertutup maka didapatkan desain motor dengan efisiensi yang tinggi. Gair S. et. al. (2004) melakukan penelitian tentang sistem penggerak roda langsung pada roda belakang dengan menggunakan *multi-drive system*. Pada sistem ini digunakan *permanent magnet brushless motors* untuk menggerakkan roda belakang. Pada sistem ini juga diperoleh sistem control untuk mengendalikan kecepatan roda dengan menggunakan *sliding mode controller*. dari penelitian ini didapatkan bahwa sistem ini secara sukses telah diimplementasikan pada kendaraan listrik.

Sedangkan penelitian tentang sistem penggerak empat roda pernah dilakukan oleh Peng Y. et. al. (2013). Penelitiannya berisi tentang strategi kontrol dari sistem 4WD pada pengisian baterai pada mobil *hybrid*. Startegi yang digunakan pada simulasi ini berdasarkan *engine* yang bekerja pada efisiensi yang tinggi dari hasil simulasi didapatkan bahwa pengisian baterai pada kendaraan *hybrid* menguntungkan karena akan mengurangi konsumsi bahan bakar. Mutoh N.

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{v_1}{v_3}$$

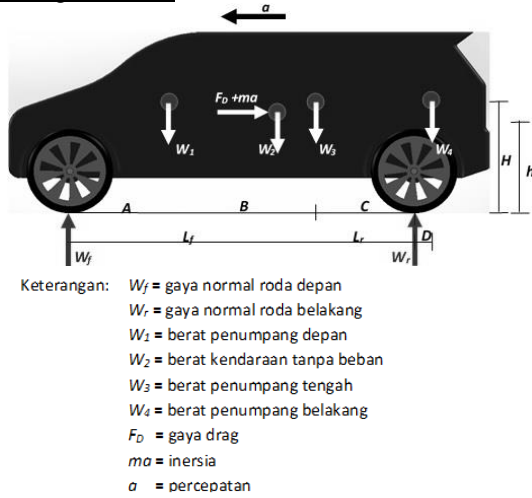
$$v_3 = \frac{R_3}{R_1} v_1 = \frac{\sqrt{L^2 + \left(\frac{2L + t_r \tan \delta_f}{2 \tan \delta_f}\right)^2}}{\frac{L - \frac{t_r \tan \delta_f}{2}}{\tan \delta_f}} v_1$$

$$v_3 = \frac{\sqrt{(L \tan \delta_f)^2 + (2L + t_r \tan \delta_f)^2}}{2L - t_r \tan \delta_f} v_1 \quad (12)$$

Gaya Normal Roda

Gaya normal roda depan dan belakang dibagi menjadi tiga keadaan, yaitu saat kendaraan bergerak lurus, menurun, dan menanjak.

Saat Bergerak Lurus



Gambar 2. Gaya-gaya yang bekerja saat bergerak lurus

Dari Gambar 2. didapatkan persamaan kesetimbangan:

$$\sum M_{W_f} = 0$$

$$(L_f + L_r) \cdot W_r - A \cdot W_1 - L_f \cdot W_2 - (A + B) \cdot W_3 - (A + B + C + D) \cdot W_4 - h \cdot (F_D + ma) = 0$$

$$W_r = \frac{A}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 + \frac{L_f}{(L_f + L_r)} \cdot W_2 + \frac{(A+B)}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 + \frac{(A+B+C+D)}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 + \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (F_D + ma) \quad (13)$$

$$\sum M_{W_r} = 0$$

$$-(L_f + L_r) \cdot W_f + (B + C) \cdot W_1 + L_r \cdot W_2 + C \cdot W_3 - D \cdot W_4 - h \cdot (F_D + ma) = 0$$

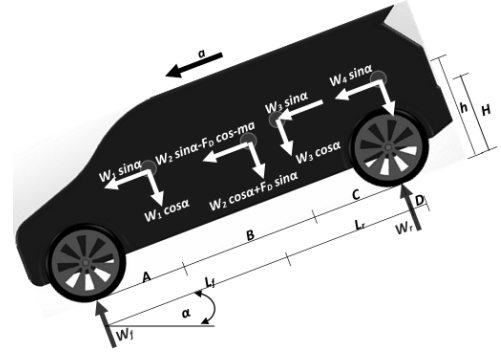
$$W_f = \frac{(B+C)}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 + \frac{L_r}{(L_f + L_r)} \cdot W_2 + \frac{C}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 - \frac{D}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 - \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (F_D + ma) \quad (14)$$

$$\sum M_{W_r} = 0$$

$$-(L_f + L_r) \cdot W_f + (B + C) \cdot W_1 + L_r \cdot W_2 + C \cdot W_3 - D \cdot W_4 - h \cdot (F_D + ma) = 0$$

$$W_f = \frac{(B+C)}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 + \frac{L_r}{(L_f + L_r)} \cdot W_2 + \frac{C}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 - \frac{D}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 - \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (F_D + ma) \quad (15)$$

Saat Menurun



Gambar 3. Gaya-gaya yang bekerja saat menurun

Gambar 3 merupakan gambar kendaraan saat bergerak turun dengan kemiringan sudut α . Persamaan kesetimbangan momen di roda depan dan belakang adalah sebagai berikut:

$$\sum M_{W_f} = 0$$

$$(L_f + L_r) \cdot W_r - A \cdot W_1 \cos \alpha - L_f \cdot (W_2 \cos \alpha + F_D \sin \alpha) - (A + B) \cdot W_3 \cos \alpha - (A + B + C + D) \cdot W_4 \cos \alpha + H \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \alpha + h \cdot (W_2 \sin \alpha - F_D \cos \alpha - ma) = 0$$

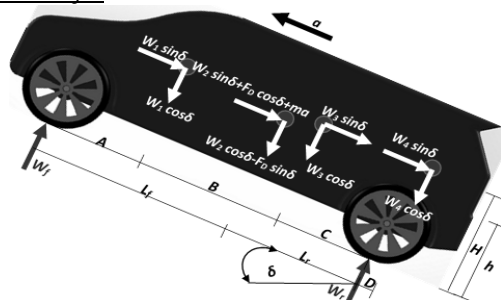
$$W_r = \frac{A}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 \cos \alpha + \frac{L_f}{(L_f + L_r)} \cdot (W_2 \cos \alpha + F_D \sin \alpha) + \frac{(A+B)}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 \cos \alpha + \frac{(A+B+C+D)}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 \cos \alpha - \frac{H}{(L_f + L_r)} \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \alpha - \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (W_2 \sin \alpha - F_D \cos \alpha - ma) \quad (16)$$

$$\sum M_{W_r} = 0$$

$$-(L_f + L_r) \cdot W_f + (B + C) \cdot W_1 \cos \alpha + L_r \cdot (W_2 \cos \alpha + F_D \sin \alpha) + C \cdot W_3 \cos \alpha - D \cdot W_4 \cos \alpha + H \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \alpha + h \cdot (W_2 \sin \alpha - F_D \cos \alpha - ma) = 0$$

$$W_f = \frac{(B+C)}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 \cos \alpha + \frac{L_r}{(L_f + L_r)} \cdot (W_2 \cos \alpha + F_D \sin \alpha) + \frac{C}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 \cos \alpha - \frac{D}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 \cos \alpha + \frac{H}{(L_f + L_r)} \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \alpha + \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (W_2 \sin \alpha - F_D \cos \alpha - ma) \quad (17)$$

Saat Menanjak



Gambar 4. Gaya-gaya yang bekerja saat menanjak

Gambar 4 merupakan kondisi dari kendaraan saat kendaraan menanjak dengan kemiringan sudut δ , dimana $\delta = 180 - \alpha$, sehingga persamaan kesetimbangan momennya adalah sebagai berikut:

$$\sum M_{W_f} = 0$$

$$(L_f + L_r) \cdot W_r - A \cdot W_1 \cos \delta - L_f \cdot (W_2 \cos \delta - F_D \sin \delta) - (A + B) \cdot W_3 \cos \delta - (A + B + C + D) \cdot W_4 \cos \delta - H \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \delta - h \cdot (W_2 \sin \delta + F_D \cos \delta + ma) = 0$$



$$W_r = \frac{A}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 \cos \delta + \frac{L_f}{(L_f + L_r)} (W_2 \cos \delta - F_D \sin \delta) + \frac{(A+B)}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 \cos \delta + \frac{(A+B+C+D)}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 \cos \delta + \frac{H}{(L_f + L_r)} \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \delta + \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (W_2 \sin \delta + \cos \delta + ma) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &+ \sum M_{W_r} = 0 \\ &-(L_f + L_r) \cdot W_f + (B + C) \cdot W_1 \cos \delta + L_r \cdot (W_2 \cos \delta - F_D \sin \delta) + C \cdot W_3 \cos \delta - D \cdot W_4 \cos \delta - H \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \delta - h \cdot (W_2 \sin \delta + F_D \cos \delta + ma) = 0 \end{aligned}$$

$$W_f = \frac{(B+C)}{L_f + L_r} \cdot W_1 \cos \delta + \frac{L_r}{L_f + L_r} \cdot (W_2 \cos \delta - F_D \sin \delta) + \frac{C}{L_f + L_r} \cdot W_3 \cos \delta - \frac{D}{L_f + L_r} \cdot W_4 \cos \delta - \frac{H}{L_f + L_r} \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \delta - \frac{h}{L_f + L_r} \cdot (W_2 \sin \delta + F_D \cos \delta + ma) \quad (19)$$

Dimana $\delta = 180 - \alpha$, sehingga persamaannya (18) dan (19) menjadi:

$$W_r = -\frac{A}{(L_f + L_r)} \cdot W_1 \cos \alpha - \frac{L_f}{(L_f + L_r)} (W_2 \cos \alpha + F_D \sin \alpha) - \frac{(A+B)}{(L_f + L_r)} \cdot W_3 \cos \alpha - \frac{(A+B+C+D)}{(L_f + L_r)} \cdot W_4 \cos \alpha + \frac{H}{(L_f + L_r)} \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \alpha + \frac{h}{(L_f + L_r)} \cdot (W_2 \sin \alpha - F_D \cos \alpha + ma) \quad (20)$$

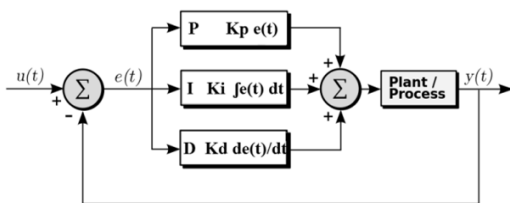
$$W_f = -\frac{(B+C)}{L_f + L_r} \cdot W_1 \cos \alpha - \frac{L_r}{L_f + L_r} \cdot (W_2 \cos \alpha + F_D \sin \alpha) - \frac{C}{L_f + L_r} \cdot W_3 \cos \alpha + \frac{D}{L_f + L_r} \cdot W_4 \cos \alpha - \frac{H}{L_f + L_r} \cdot (W_1 + W_3 + W_4) \sin \alpha - \frac{h}{L_f + L_r} \cdot (W_2 \sin \alpha - F_D \cos \alpha + ma) \quad (21)$$

Teori Kontrol

Ada beberapa macam sistem kendali yang bisa kita gunakan untuk mengontrol beberapa sistem yang kita inginkan. Berikut akan dijelaskan beberapa macam sistem kendali yang biasa digunakan.

Kendali PID

Sistem kendali PID merupakan sistem kendali *loop* tertutup yang cukup sederhana dan memiliki performa yang bagus. Namun kendali ini tidak dapat bekerja dengan baik apabila terjadi ketidakpastian dan ketidaklinieran pada sistem.



Gambar 5. Diagram blok sistem kendali PID

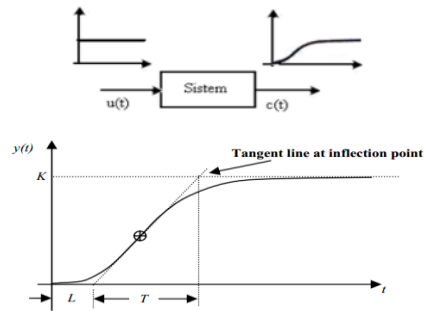
Sistem kendali PID terdiri dari tiga macam kendali, yaitu kendali P (Proportional), D (Derivatif) dan I (Integral), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Tujuan penggabungan ketiga jenis kendali tersebut adalah untuk menutupi kekurangan dan menonjolkan kelebihan dari masing-masing jenis kendali. Dalam perancangan sistem kendali PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter K_p , K_i , dan K_d agar respon sinyal keluaran sistem terhadap masukan memiliki harga tertentu sebagaimana yang diinginkan. Dalam penelitian ini PID controller akan didesain dengan menggunakan metode tuning Ziegler – Nichols.

Tuning PID

Permasalahan terbesar dalam desain kontroler PID adalah menentukan nilai K_p , K_i dan K_d . Metode – metode tuning dilakukan berdasarkan metode matematika *system/plant*. Jika model matematika tidak diketahui maka dilakukan dengan eksperimen terhadap sistem. Cara menentukan tuning PID juga bisa berdasarkan metode tuning Ziegler-Nichols. Metode ini bertujuan untuk pencapaian maximum overshoot (MO): 25% terhadap masukan step.

Metode Pertama Ziegler- Nichols

Metode pertama diterapkan pada plant dengan step respons dari bentuk yang ditunjukkan dalam Gambar 6, jenis respon ini adalah khusus berlaku untuk sistem orde pertama dengan transpotasi delay. Jika sistem tidak mencakup integrator ataupun nilai-nilai kutup pasangan kompleks yang dominan, maka kurva respon sebuah tangga satuan kelihatan seperti kurva berbentuk – S, (jika respon tidak memiliki kurva berbentuk – S, maka metode ini tidak berlaku). Kurva-kurva respon tangga sedemikian dapat dihasilkan secara eksperimen atau dari simulasi dinamik sistem.



Gambar 6. Kurva respon untuk metode Ziegler – Nichols orde pertama

Karakteristik respon diberikan oleh dua parameter, L adalah sebagai time delay dan T merupakan Time constant. Ini didapatkan dengan mengambarkan garis singgung pada titik perubahan kurva berbentuk S dan menentukan perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis $c(t) = K$, seperti diperlihatkan pada Gambar 6. $C(s)/u(s)$ dapat didekati dengan sistem orde pertama dengan keterlambatan transport.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (22)$$

Ziegler – Nichols menyarankan pengaturan nilai K_p , T_i dan T_d berdasarkan rumus yang diberikan dalam Tabel 1.

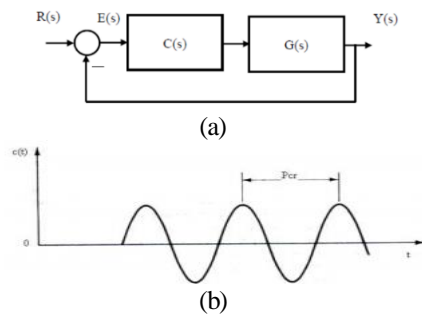
Tabel 1. Aturan peyepadanan Ziegler – Nichols orde pertama.

PID Type	K_p	$T_i = K_p / K_i$	$T_d = K_p / K_d$
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Metode kedua

Dalam metode kedua, mula-mula kita mengatur $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$. Dengan menggunakan tindakan kontrol proporsional (Gambar 7a), menambahkan K_p dari 0 kesuatu nilai kritis K_{cr} , disini mula-mula keluaran memiliki osilasi yang berkesinamb-

bugan (jika kelauran tidak memiliki osilasi yang berkesinambungan untuk nilai K_p) maka metode ini tidak berlaku. Jadi penguatan kritis K_{cr} periode kritis P_{cr} yang sesuai ditentukan secara eksperimen (Gambar 7b).



Gambar 7. (a) Sistem loop tertutup dengan alat kontrol proporsional, (b) Osilasi berkesinambungan dari periode P_{cr} .

Ziegler – Nichols menyarankan pengaturan parameter K_p , T_i , dan T_d berdasarkan rumusan yang diperlihatkan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2 nilai K_p , K_d , dan K_i dapat ditentukan dan nilai dari P_{cr} bisa ditentukan dengan persamaan:

$$P_{cr} = 2\pi/\omega$$

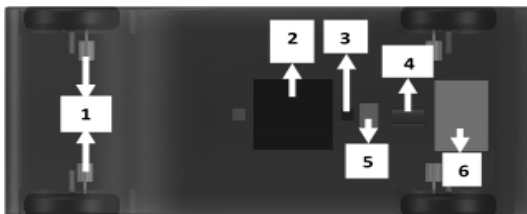
Dimana ω adalah frekwensi osilasi yang didapatkan dari persamaan Routh-Hurwitz stability criteria.

Tabel 2. Aturan Pengaturan Ziegler–Nichols orde 2.

PID Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada simulasi ini akan dilakukan pengembangan sistem mobil *hybrid* dengan sistem penggerak langsung dengan bantuan *Matlab-Simulink*. Gambar 8 merupakan desain mobil listrik *hybrid* yang akan digunakan dalam simulasi ini. Secara umum, model yang akan disimulasikan terbagi menjadi dua, yaitu simulasi penggerak roda secara langsung (motor/generator) untuk mengendalikan kecepatan roda saat berbelok dan mensimulasikan sistem penggerak otomatis berdasarkan gaya normal roda.



Gambar 8. Model desain penelitian
Keterangan: 1. Motor/generator

2. baterai
3. ECU
4. Stabilizer
5. Generator
6. Engine

Kendaraan saat berbelok

Pada saat kendaraan berbelok, maka putaran setiap roda berbeda. Oleh sebab itu perlu sistem kontrol untuk mengatur besarnya arus yang dibutuhkan oleh masing-masing motor pada setiap roda. Adapun langkah-langkah kerja yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan tipe kendaraan yang digunakan. Dalam penelitian ini digunakan Toyota avanza untuk spesifikasi.
2. Menentukan besarnya sudut belok kendaraan.
3. Menghitung besarnya R_{ack} berdasarkan besarnya sudut belok.
4. Menentukan besarnya kecepatan roda 1 (roda belakang sebelah kanan jika kendaraan berbelok ke kanan)
5. Menghitung kecepatan roda 2, 3, dan 4.
6. Menghitung besarnya arus yang diperlukan setiap roda untuk mendapatkan kecepatan yang diperlukan setiap roda saat berbelok.
7. Membuat sistem kontrol besarnya arus yang masuk ke dalam roda dengan kontrol PID.

Sistem Menejemen Penggerak Kendaraan

Selain menejemen pada kendaraan ketika bergerak, pada sistem ini akan disimulasikan sistem penggerak dua roda (RWD atau FWD) dan sistem penggerak empat roda (4WD). Langkah-langkah yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

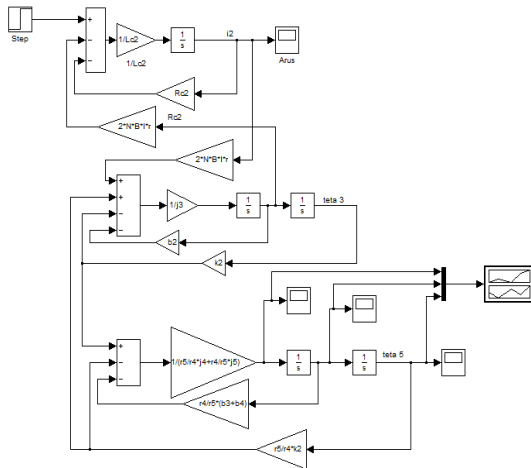
1. Menentukan spesifikasi dari kendaraan yang akan digunakan, seperti: spesifikasi kendaraan, berat muatan, letak muatan, percepatan, kecepatan, kemiringan jalan.
2. Melakukan perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan seperti: gaya drag (F_d), gaya tahanan rolling (R_f), Gaya inersia (jika ada), dsb.
3. Menghitung besarnya gaya normal roda depan (W_f) dan gaya normal roda belakang (W_r).
4. Membuat algoritma dengan menggunakan besarnya W_f dan W_r . Sistem FWD bekerja jika $W_f > W_r$, RWD bekerja jika $W_f < W_r$, dan 4WD bekerja jika $W_f = W_r$.
5. Membuat simulasi pada sistem FWD, RWD, dan 4WD pada *Simulink-Matlab*.

4. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

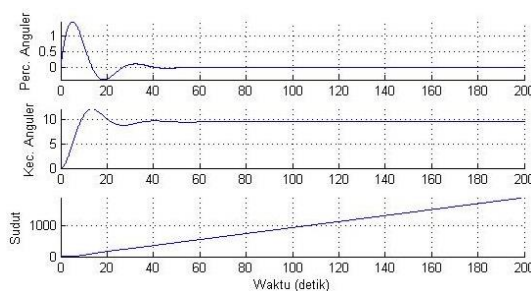
Motor/generator

Pada bagian 2 sudah dibahas tentang persamaan untuk mendapatkan kecepatan roda ketika berbelok. Namun sebelum itu kita perlu mengetahui berapa arus yang dibutuhkan untuk menggerakkan roda.

Gambar 9 merupakan blok Simulink motor dengan menggunakan *Matlab-Simulink*. Dari Gambar 9 input yang diberikan berupa step dengan nilai sebesar 72 V dan hambatan listrik sebesar 0,4832 ohm. Sedangkan Gambar 10 merupakan hasil simulasi pada blok diagram Gambar 9 dengan inputan tersebut. Dari Gambar 10 terlihat bahwa besarnya kecepatan sudut sebesar 10 rad/s. Dari grafik kecepatan terlihat bahwa kecepatan mulai konstan setelah 40 detik. Untuk kendaraan dengan motor listrik waktu ini sangatlah lama. Untuk itu diperlukan sistem kontrol untuk mendapatkan respon yang lebih baik lagi.

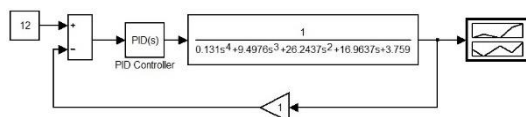


Gambar 9. Blok diagram Simulink-Matlab Motor

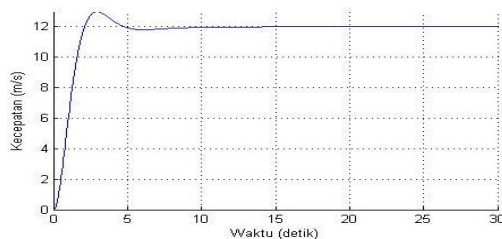


Gambar 10. Respon Sudut Fase, Kecepatan Sudut, dan Percepatan Sudut vs. waktu

Gambar 11 merupakan bentuk dari respon kecepatan kendaraan dengan pengontrolan PID dengan nilai $K_p=16,7$, $K_i=3,82$, dan $K_d=18,17$. Dan Gambar 12 merupakan respon kecepatan setelah dilakukan pengontrolan.



Gambar 11. Blok diagram respon kecepatan kendaraan hybrid dengan PID controller



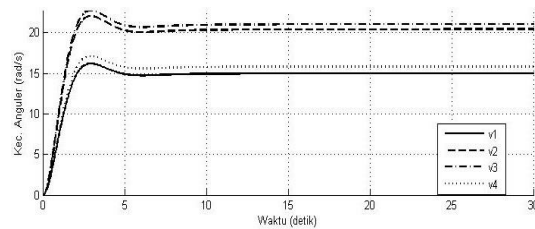
Gambar 12. Respon kecepatan kendaraan hybrid dengan PID controller

Berdasarkan Gambar 12 dapat diketahui keluaran sistem untuk mencapai setpoint memiliki error sistem nol, ini berarti nilai actual dengan nilai yang di inginkan dapat dicapai tanpa adanya penyimpangan. Respon sistem menunjukkan performa yang cukup bagus hal ini dibuktikan dengan rise time dapat dicapai dalam waktu 1,39 detik, over shoot sebesar 8% dan settling time yang dicapai sistem adalah 13,9 detik.

Berdasarkan nilai-nilai yang didapat menunjukkan bahwa respon yang dihasilkan sudah sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

Kendaraan Saat Berbelok Dengan Sistem Penggerak Roda Langsung

Berdasarkan persamaan (5), (6), (11), dan (12), maka akan didapatkan respon kecepatan setiap roda saat bergerak. Gambar 13 merupakan respon kecepatan setiap roda ketika berbelok.

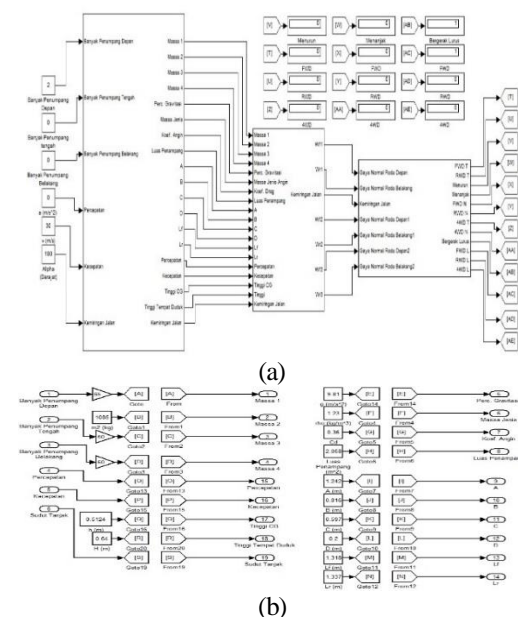


Gambar 13. Variasi Kecepatan Angular Roda Ketika Berbelok.

Berdasarkan Gambar 13, maka dapat kita lihat bahwa kendaraan roda 1 adalah yang paling kecil dibandingkan yang lain sedangkan roda yang mempunyai nilai tertinggi adalah roda 3 dan roda kecepatan roda 2 lebih besar dari roda 4. Sehingga dapat ditentukan bahwa roda 3 membutuhkan arus yang paling besar dari roda yang lain untuk mendapatkan kecepatan yang diinginkan. Begitu juga dengan roda yang lain, semakin besar kecepatan roda, maka semakin besar juga arus yang diperlukan.

Sistem Manajemen Penggerak

Berdasarkan sistem manajemen penggerak roda pada bagian 3.2 maka diperoleh Simulink-Matlab seperti pada terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14. (a) Matlab-Simulink Manajemen Penggerak Roda Otomatis (b) Subsystem input spesifikasi kendaraan

Dari Gambar 14 (a) terlihat bahwa input banyak penumpang depan adalah 2 orang dimana kendaraan bergerak dengan kemiringan jalan 180° dengan kecepatan yang konstan sebesar 30 m/s. dari Gambar 14 (a) juga terlihat bahwa *output* kendaraan bergerak tanpa ada kemiringan jalan (lurus) dan sistem penggerak yang digunakan adalah FWD. hal ini bisa terlihat dari nilai *output* bergerak lurus dan FWD bernilai 1 sedangkan *output* yang lain bernilai 0. Ketika nilai dari kemiringan jalan dirubah 12° , maka kendaraan dalam keadaan menurun dengan sistem penggerak yang digunakan adalah FWD. namun ketika nilai dari kemiringan jalan dirubah menjadi 150° , maka kendaraan dalam keadaan menanjak dengan sistem penggerak RWD. Ketika nilai percepatan divariasikan, maka akan didapatkan sistem penggerak yang sesuai dengan sistem yang telah dibuat.

5. KESIMPULAN

Pada bab ini akan disimpulkan hasil dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Sistem kontrol yang telah dibuat untuk mengendalikan kecepatan roda sudah layak dengan nilai $K_P=16,7$, $K_I=3,82$, dan $K_D=18,17$.
2. Roda 3 membutuhkan arus yang paling besar, diikuti oleh roda 2 dan roda 4. Sedangkan roda 1 adalah yang paling kecil. Semakin besar kecepatan roda, maka semakin besar juga arus yang diperlukan.
3. Besarnya arus yang masuk pada setiap motor di roda ketika berbelok dengan $v_1 = 15$ m/s bervariasi, pada roda 1 sebesar 25 A, roda 2 sebesar 34,0625 A, roda 3 sebesar 35,1 A dan roda 4 sebesar 26,4 A.
4. Sistem penggerak roda FWD, RWD, dan 4WD dipengaruhi oleh besarnya gaya normal roda depan dan belakang. Sedangkan besarnya gaya normal roda ditentukan oleh banyaknya penumpang, letak penumpang, percepatan, kecepatan, dan kemiringan jalan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen. G. H. *et. al.* 1996. *Design of a Permanent-magnet Direct-driven Wheel Motor Drive for Electric Vehicle*. School of Electrical and Electronic Engineering. Nanyang Technological University. Nanyang Avenue. Singapore.
- [2] Gair S. *et. al.* 2004. *Electronic Differential with Sliding Mode Controller for a Direct Wheel Drive Electric Vehicle*. University of Strathclyde. Glasgow G1 1m. UK.
- [3] Guilin T. *et. al.* 2004. *A Novel Driving and Control System for Direct-wheel-driven Electric Vehicle*. College of Electrical & Electronic Engineering. Huazhong University of Science and Technology. China.
- [4] Mutoh N. *et. al.* 2012. *Driving and Braking Torque Distribution Methods for Front and Rear Wheel Independent Drive Type Electric Vehicles on Roads with Low Friction Coefficient*. Graduate School of System Design. Tokyo Metropolitan University. Tokyo.
- [5] Peng Y. *et. al.* 2013. *Control Strategy of Four-wheel Drive Plug-in Hybrid Electric Vehicle*. College of Automotive Engineering. Jilin University. Changchun. China.
- [6] Sutantra, I. N dan Sampurno B, 2010. *Teknologi Otomotif Edisi Ke-2*. Penerbit Guna Widya, Surabaya. Indonesia.

PROTOTYPE SISTEM HEADLAMP DENGAN PERGERAKAN ADAPTIVE STEERING

Ian Hardianto Siahaan, David Setiawan Prayogo

Prodi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra (10 pt)^{1,2)}
Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia^{1,2)}
Phone: 0062-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658^{1,2)}
E-mail : ian@peter.petra.ac.id

ABSTRAK

Sistem penerangan pada sebuah kendaraan mempunyai peranan penting dalam hal kenyamanan maupun keselamatan berkendara. Pemerintah Indonesia sendiri telah mensosialisasikan pentingnya menyalakan lampu kendaraan pada siang hari untuk membantu pengendara lainnya untuk mengantisipasi keberadaan kendaraan tersebut terhadap kendaraan lainnya. Dari sisi fungsionalnya sebuah headlamp dari kendaraan harus berfungsi secara optimal untuk mengantisipasi kedua hal tersebut. Pada kendaraan konvensional saat ini, keberadaan sistem headlampnya masih memiliki penerangan yang hanya mengarah ke depan saja, tetapi seiring dengan majunya teknologi maka terdapat banyak teknologi yang telah disediakan untuk menambah fungsi sebuah headlamp agar dapat mengikuti arah steer yang telah ditentukan. Peneliti mengembangkan prototype sebuah lampu yang bergerak secara adaptive dengan menggunakan servo sebagai penggerakannya. Dengan sistem memanfaatkan pergerakan sistem kemudi pada kendaraan tersebut sipengemudi dapat mengontrol gerakan adaptive headlamp kendaraan tersebut sesuai harapan dan keinginan rancangan, dimana dalam hal ini headlamp dapat bergerak sesuai dengan arah yang ditentukan melalui steering wheel, ini membuat pandangan pengendara semakin luas dan menjadi lebih focus. Servo motor yang digunakan pada penelitian ini memanfaatkan Hextonik HXT12K-Hi Torque Large Servo pada kondisi maksimum 6.0 V sebesar 14.98 kg-cm. Regulator adaptor diinterface untuk menurunkan tegangan DC 12 Volt oleh karena servo motor dalam hal ini hanya mampu menerima tegangan maksimumnya sesuai spesifikasi yang telah disebutkan. Microcontroller yang digunakan dalam hal ini merupakan sebuah hardware yang diprogram untuk dapat menggerakkan servo motor tersebut yang mendapat input dari sensor steering angle dalam hal ini potensio linier yang digunakan sebagai drivernya. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan bahwa setiap 120 derajat dari putaran steer maka headlamp akan berbelok 5 derajat dari sudut normal yaitu 0 derajat. Dan pada putaran maximal maka servo juga akan berbelok secara maximal. Disebabkan karena pada realita steering dalam mobil menghasilkan 720 derajat untuk 2 putaran sehingga mikrocontroller disetting agar ketika steer berputar maksimal servo juga berbelok dengan maksimal.

Kata kunci: Headlamp, Adaptive Steering, microcontroller, servomotor

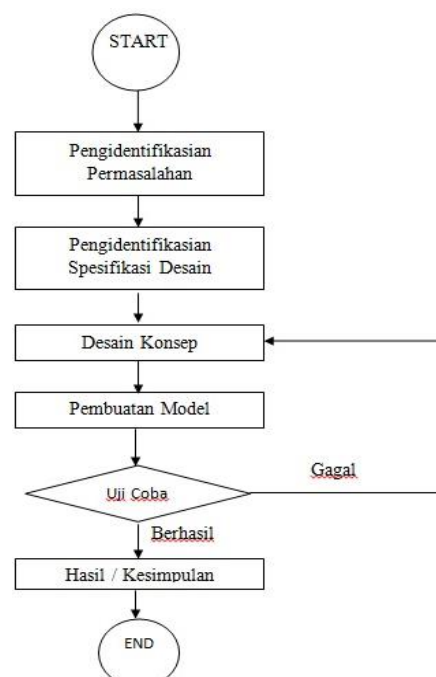
1. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan dunia otomotif di seluruh dunia dan untuk memenuhi kebutuhan yang diperlukan oleh pengguna kendaraan bermotor khususnya pengendara mobil, maka peneliti mendapatkan sebuah inspirasi mengembangkan sesuatu yang dapat berguna bagi pengendara mobil. Dengan berkembangnya teknologi pada dunia otomotif, para perancang mobil memberikan tambahan fasilitas pada mobil zaman sekarang untuk meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengendara. Para perancang ini juga memperbaiki kekurangan yang ada pada sebuah mobil sehingga dapat meningkatkan kenyamanan pengendara saat berkendara dan juga memenuhi kebutuhan bagi pengguna kendaraan tersebut. Sebagai contoh saja mobil sekarang dilengkapi dengan *airbag* yang bertujuan untuk meningkatkan keselamatan pengendara pada saat terjadi tabrakan. Tidak hanya tambahan fasilitas saja tetapi ada juga part mobil yang hanya dimodifikasi saja.

Peneliti berencana mengembangkan sebuah headlamp yang dapat membantu menambah jarak pandang dari pengendara agar lebih luas. Dan juga pengendara juga lebih fokus dalam mengendarai mobil. Perubahan yang dilakukan oleh peneliti cukup banyak dari pengembangan headlamp yang hanya menggunakan reflector hingga pada saat ini menggunakan *projector* yang dapat membuat lampu yang ada semakin fokus ke depan mobil. Peneliti terus mengembangkan teknologi yang ada pada headlamp.

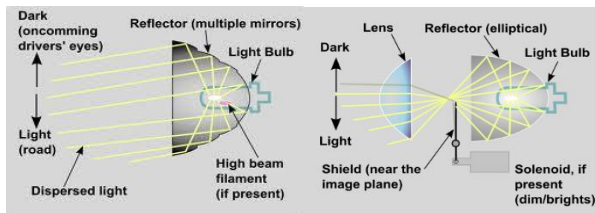
2. METODOLOGI PENELITIAN

Perancangan adaptive Steering untuk Prototype sistem headlamp dilakukan berdasarkan flowchart berikut ini.



3. TINJAUAN PUSTAKA

Dunia modifikasi di dunia mulai berkembang seiring dengan munculnya teknologi-teknologi baru untuk melengkapi fitur yang memang belum ada sebelumnya ataupun mengganti *part* untuk merubah penampilan sebuah kendaraan sesuai dengan keinginan pemilik kendaraan. Bahkan ada yang rela menghabiskan berjuta – juta rupiah hanya untuk membuat tampilan kendaraanya lebih bagus. Banyak desainer yang memikirkan hal agar sebuah kendaraan dirancang dengan fungsi yang optimal. Sehingga para peneliti meneliti kekurangan setiap produk mobil yang sudah ada atau sudah digunakan oleh masyarakat untuk menghasilkan mobil baru yang lebih baik dari sebelumnya. Sistem penerangan yang ada pada mobil mempunyai peranan sangat penting untuk sebuah kendaraan. Sistem penerangan yang digunakan oleh sebuah mobil yang sudah lama menggunakan bola lampu biasa. Hingga sekarang mobil tetap menggunakan bola lampu biasa bahkan ada yang sudah dimodifikasi dengan lampu yang bermacam-macam, sebagai contoh adalah bola lampu *xenon* bahkan ada yang menggunakan *LED*. Penggunaan *projector* pun juga semakin populer di kalangan masyarakat dari bentuk dari sebelumnya *reflector*. Pada gambar berikut dijelaskan mengenai cara kerja dari sebuah *headlamp* yang menggunakan *reflector* dan cara kerja *headlamp* yang menggunakan *projector*.



Gambar 1. Sistem Headlamp Menggunakan Reflector dan Projector

Bentuk dari lampu mobil pun sekarang tidak hanya berbentuk segi empat atau lingkaran tetapi bentuk bisa disesuaikan dengan penampilan mobil agar lebih menarik. Sebagai contoh adalah mobil Toyota Kijang lama dengan Kijang yang baru bentuk dari lampunya saja dapat dilihat sangat berbeda dengan generasi sebelumnya.



Gambar 2. Toyota Kijang Lama dan Baru

Mobil mewah yang sudah ada sekarang menggunakan teknologi yang bisa membuat *headlamp* yang dapat bergerak adalah mobil *Honda Odyssey* yang menggunakan sensor untuk mengetahui arah jalan yang akan dituju, sehingga terdapat pergerakan lampu pada mobil ini. Namun dengan canggihnya teknologi ini. Tidak semua orang bisa memasang atau memperbaiki sistem tersebut. Bahkan mencari part

penggantinya pun sangat susah, jika ada juga harganya cukup mahal. Ada juga pada *Mitsubishi Pajero Sport* yang menggunakan *switch*/tombol untuk mengarahkan arah lampu secara *vertical*. Sehingga pengendara dapat mengatur sendiri ketinggian lampu tetapi dengan *limit* tertentu. Dalam arti ketinggian lampu dapat disesuaikan sesuai batas yang diberikan oleh *switch* tersebut, agar ketinggian lampu tidak mengganggu pandangan dari kendaraan lain yang berlawanan arah dengan pengendara

4. PERENCANAAN

Persiapan yang dilakukan peneliti adalah mencari part yang akhirnya harus dirakit sehingga terwujudnya sebuah *headlamp* yang sudah direncanakan. Contoh part yang akan digunakan:

Projector

Penggunaan *headlamp* yang dipilih adalah *projector* karena *projector* memiliki dimensi yang lebih kecil daripada *reflector*. Sehingga memberikan space yang cukup luas untuk *cover* lampu sebuah mobil. Dan juga lebih mudah dalam pergerakan lampunya daripada *reflector* yang memang sudah di desain sesuai dengan dimensi *cover* lampu.



Gambar 3. Projector Headlamp

Servo Motor

Digunakan sebagai penggerak yang menggerakkan *projector*. Batasan yang diperoleh dari servo ini hanya 60 derajat dan dibagi 30 derajat ke kiri dan 30 derajat ke kanan. Pemilihan servo juga dihitung berdasarkan torsi yang ada pada setiap jenis-jenis motor servo. Pada proses persiapan ini peneliti memilih servo berdasarkan torsi yang diperlukan oleh servo untuk memutar bagian-bagian dari lampu beserta *projector* itu sendiri.

$$F = 246.7 \text{ gr} = 0.2467 \text{ kg}$$

$$\text{Asumsi setelah diberi lampu dan kebel – kabel} = 0.9 \text{ kg}$$

$$r = 3 \text{ mm} = 0.3 \text{ cm}$$

$$T = F \cdot r$$

$$= 0.9 \cdot 0.3$$

$$= 0.27 \text{ kg.cm}$$

Sehingga diperlukan servo dengan torsi yang lebih dari 0.27 kg cm. Berdasarkan servo motor DC yang ada di pasaran maka dipilih servo motor yang mendekati perhitungan dengan spesifikasi sebagai berikut:

Hextronik HXT12K - Hi Torque Large Servo

Basic Information	
Modulation:	Digital
Torque:	4.0N: 180.0 oz-in (12.96 kg-cm) 6.0N: 208.0 oz-in (14.56 kg-cm)
Speed:	4.0N: 0.17 sec/60° 6.0N: 0.13 sec/60°
Weight:	1.69 oz (47.9 g)
Dimensions:	Length: 1.56 in (39.6 mm) Width: 0.79 in (20.3 mm) Height: 1.50 in (38.1 mm)
Motor Type:	7 (A07)
Gear Type:	Metal
Rotation/Support:	Single Bearing



Gambar 4. Servo Motor

Regulator Adaptor

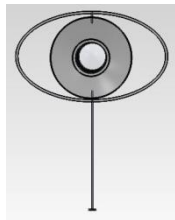
Pada saat menentukan regulator adaptor penulis membuat regulator adaptor sesuai dengan rancangan telah disesuaikan, yang fungsinya digunakan untuk menurunkan tegangan DC 12 volt. Hal ini disebabkan karena servo hanya menerima tegangan maximum 6 volt.



Gambar 5. Regulator adaptor

Pipa Aluminium

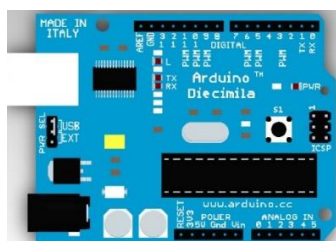
Pipa ini digunakan dengan fungsi sebagai penyangga dari lampu *projector*. Pemilihan pipa *aluminium* dibandingkan dengan *stainless steel* karena sifatnya yang sama dengan *aluminium* yaitu tidak mudah terkorosi tetapi juga berat dari pipa aluminium ringan dan juga kuat, tidak seberat yang dipunya oleh *stainless steel* dan juga harga yang tidak mahal dibandingkan dengan *stainless steel*. Pembuatan pipa dengan proses mencetak karena diameter pipa yang dirasa kecil sehingga tidak mungkin dengan menggunakan proses bubut.



Gambar 6. Pipa Aluminium

Mikrocontroller

Microcontroller adalah suatu *hardware* yang dapat diprogram untuk menggerakkan servo hingga batas tertentu. *Microcontroller* mendapat input yang berasal dari *Sensor Steering Angle* yang hanya ada pada mobil yang menggunakan *Electric Power Steering* yang fungsi utamanya adalah mengatur sudut belok roda. Data yang keluar dari *Sensor Steering Angle* yang akan masuk ke *ECU* juga diterima oleh *microcontroller* sehingga *microcontroller* dapat bekerja untuk menggerakkan *servo* yang akhirnya *projector* juga dapat bergerak sesuai dengan putaran *servo*.



Gambar 7. Mikrocontroller

5. PEMBAHASAN

Proses Desain Headlamp Adaptive

Dalam memodifikasi sebuah *headlamp* banyak aspek yang harus dipertimbangkan. Agar tidak mengurangi fungsi dari sebuah *headlamp* sebelumnya. Desain *headlamp* dibuat untuk menambah *fungsional* dari sebuah *headlamp* tanpa mengurangi nilai fungsionalnya.

Konsep Pembuatan Headlamp Adaptive

Pada konsep pembuatan sebelumnya peneliti membuat lampu model Toyota Rush yang akhirnya mendapatkan banyak kelemahan dari konstruksi tersebut.

- Sebagai contoh adalah penempatan gear yang dirasa masih sulit untuk mendapatkan tempat yang kosong di dalam ruang kemudi.
- penempatan servo yang menjadikan batang besi seperti pengungkit
- dan baut yang berfungsi sebagaiudukan sebuah projector masih dianggap menghalangi sinar lampu karena baut tersebut berdiri dari bawah projector hingga menembus projector.



Gambar 8. Project Lama

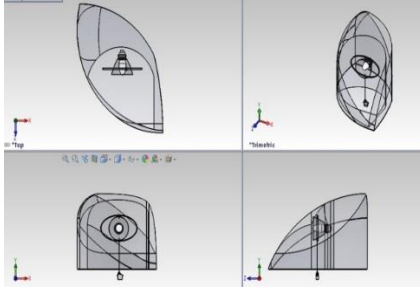
Cara kerja dari project lama secara mekanis adalah dimana steer yang bergerak memutar roda gigi rasio yang akhirnya dapat memutar servo driver sehingga servo dapat bergerak. Pada servo sendiri terdapat batang aluminium yang panjang untuk mendorong dan menarik projector sehingga projector dapat membelok ke kanan ataupun ke kiri.

Dari kekurangan yang terdapat pada konsep headlamp adaptive yang lama dirasa yang memiliki banyak kekurangan maka desain dari Headlamp Adaptive diganti dengan konsep yang baru. Konsep baru dari pembuatan *headlamp adaptive* bisa dicontohkan dengan menggunakan headlamp mobil Nissan Livina dengan bentuk seperti di bawah ini. Karena pada Toyota Rush tidak terdapat EPS (Electric Power Steering) sehingga tidak bisa dipasang microcontroller karena tidak ada input data yang masuk menuju ke microcontroller.



Gambar 9. Headlamp Nissan Livina

Setelah menemukan *headlamp* yang akan dimodifikasi maka langkah berikutnya adalah membuat gambar konsep yang akan dilakukan agar *headlamp* dapat bekerja sesuai dengan apa yang diharapkan. Gambar konsep yang akan digunakan sebagai berikut:



Gambar 10. Desain Rancangan Headlamp Adaptive

Pembuatan desain ini mempertimbangkan beberapa alasan

- Pembuatan frame lampu yang menggunakan bentuk oval, sebenarnya itu hanya penyangga agar projector dapat berdirisesuai dengan posisi dan dapat berbelok seperti halnya yang telah direncanakan. Frame ini mengadopsi desain dari sebuah globe tidak langsung menebus pada bolanya tetapi hanya dikaitkan pada ujung – ujung bolanya. Frame juga dibuat dengan bentuk oval/lonjong, dikarenakan bentuk projector tampak depan dan tampak samping mempunyai ukuran yang berbeda sehingga jika frame dibuat dengan bentuk lingkaran maka projector akan menabrak frame tersebut.

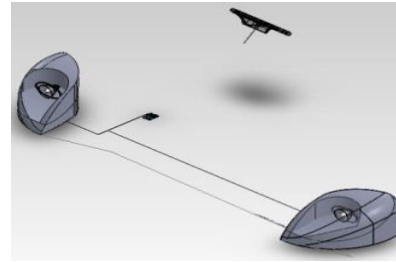


Gambar 11. Tampak Samping Dan Tampak Depan Projector

- Penempatan servo yang terletak dibawah headlamp karena dibawah headlamp masih terdapat space yang luas dan dan servo dapat langsung ditempelkan di tempat tersebut dengan baut saja.
- Penggunaan microcontroller juga harus dipertimbangkan karena pada bagian dalam mobil masih sulit untuk menemukan tempat yang kosong untuk penempatan sebuah gear. Jadi penggunaan microcontroller lebih praktis daripada menggunakan gear. Dengan ini maka diagram skematik yang didapatkan agar microcontroller dapat berfungsi.

Penjelasan dari diagram ini adalah steer yang digunakan sebagai pengontrol roda terdapat sensor steering angle yang dapat memberikan informasi kepada ECU agar roda dapat berbelok. Sama halnya seperti cara kerjanya terhadap lampu adaptive ini. Steer memberikan informasi kepada microcontroller sehingga microcontroller dapat menggerakkan

servo yang akhirnya lampu projector dapat bergerak sesuai dengan data input yang telah diberikan pada microcontroller. Berikut adalah gambar sesungguhnya dari desain yang akan dibuat oleh peneliti.



Gambar 12. Desain Baru Headlamp Adaptive

Penjelasan untuk gambar ini adalah dimana arah steer berbelok maka projector juga bergerak sesuai dengan arah steer yang sudah ditentukan. Untuk sudut dari steer dan projector memiliki sudut maksimal yang berbeda. Steer memiliki sudut yang lebih besar dibandingkan dengan projector, maka microcontroller sudah disetting sesuai dengan titik maksimal dari steer dan servo sendiri sehingga ketika steer berbelok maksimal servo juga berbelok maksimal tanpa mengalami kerusakan.

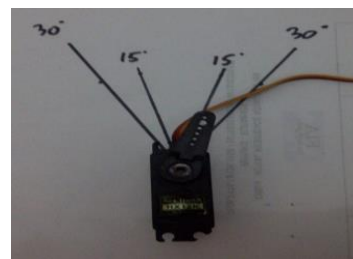
Rancangan Perencanaan

Pengujian untuk upload data input dari adruino dan pergerakan servo dapat dibuktikan dengan gambar seperti dibawah ini. Hal yang perlu disampaikan adalah sensor steer diganti menggunakan potensio linier karena input yang akan digunakan untuk microcontroller sama dengan sensor steering angle.



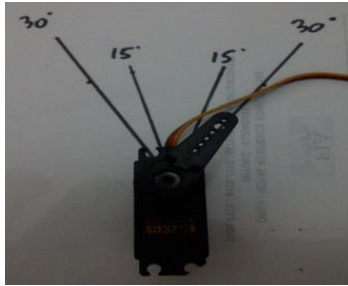
Gambar 13. Potensio Linier Sebagai Driver

Pada uji coba peneliti hanya memberi patokan pada putaran steer pertama dan kedua saja karena potak steer sudah cukup memberikan nilai yang digerakkan oleh servo. Pada putaran steer 360 derajat ke kanan servo memberikan nilai pergerakan sebesar 15 derajat.



Gambar 14. Pergerakan Servo Untuk 1 Putaran Steer

Dan juga sudut pada putaran kedua menghasilkan 30 derajat ke kanan untuk pergerakan servo.



Gambar 15. Pergerakan Servo Untuk 2 Putaran Steer

Dari pengujian ini didapat data sebagai berikut dengan bentuk table pergerakan steer dengan perbandingan sudut servo.

Tabel 1. Tabel Hasil Uji Coba

Sudut Putaran Steer (derajat)	Sudut Pergerakan Projector (derajat)
0	0
90	3.75
180	7.5
270	11.25
360	15
450	18.75
540	22.5
630	26.25
720	30

Berdasarkan hasil pengujian yang telah selesai diuji didapatkan tabel seperti di atas. Sesuai dengan tabel diatas disimpulkan bahwa setiap 120 derajat dari putaran *steer* maka lampu akan berbelok 5 derajat dari sudut normal yaitu 0 derajat. Dan pada putaran maximal maka servo juga akan berbelok secara *maximal*. Disebabkan karena pada realita *steer* dalam mobil menghasilkan 720 derajat untuk 2 putaran sehingga mikrocontroller disetting agar ketika *steer* berputar maksimal servo juga berbelok dengan maksimal.

6. KESIMPULAN

Berdasarkan dengan perencanaan dan pembuatan sebuah *headlamp* dengan pergerakan *adaptive* maka dapat disimpulkan:

- Penggunaan microcontroller lebih mudah penempatannya dibandingkan dengan menggunakan gear
- Untuk microcontroller dapat mengubah sudut sesuai dengan keinginan dari pengemudi karena hanya dengan input data saja, sehingga tidak repot seperti yang terjadi pada saat menggunakan gear.

7. Daftar Pustaka

- [1] R.S Khurmi, J.K Gupta, "A text book of Machine Design", MKS & SIUNITS.
- [2] Blocher, Richard, dipl. Phys., "Dasar Elektronika", Yogyakarta, Andi.
- [3] Rashid, M.H, *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*. Jakarta: Academic Press, 2006

- [4] Younkin, *Power Industrial Servo Control Systems, Fundamentals and Applications*. CRC, 2002.

STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK *SHOCK ABSORBER* UNTUK Mencari Komponen Pengganti *SHOCK ABSORBER* SISTEM SUSPensi MOBIL PEDESAAN (GEA)

Wiwiek Hendrowati^{1,a,*}, Harus L.G.^{1,b}, Agus S.P.^{1,c} dan I.N. Sutantra^{1,d}

¹Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS

Jl.Arif Rahman Hakim, Kampus ITS Keputih, Sukolilo-Surabaya (60111)

E-mail : ^awiwiek@me.its.ac.id, ^bharuslg@me.its.ac.id, ^cpramono@me.its.ac.id, ^dtantra@me.its.ac.id

ABSTRAK

Mobil GEA (*Gulirkan Energi Alternatif*) yang dibuat oleh PT INKA masih menggunakan sistem suspensi produk import. Maka dari itu, untuk mendapatkan performa kendaraan yang bagus sistem suspensi tersebut perlu diuji karakteristiknya. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk mencari komponen pengganti (*interchange*) dari sistem suspensi mobil GEA. Sistem suspensi terdiri dari *shock absorber* dan pegas. *Shock absorber* digunakan untuk meredam getaran yang ditimbulkan profil jalan dan mempengaruhi kenyamanan kendaraan. Pada penelitian ini dibahas tentang nilai koefisien redaman dari beberapa *shock absorber* yang dapat digunakan untuk mengganti *shock absorber* dari sistem suspensi mobil GEA. Pemilihan *shock absorber* berdasarkan kapasitas suspensi mobil yang sebanding dengan mobil GEA, yaitu *shock absorber* mobil Granmax dan Carry. *Shock absorber* dipasang pada alat uji dan diuji dengan memberi tekanan dan tarikan pada *shock absorber*. Gaya yang dibutuhkan untuk menekan *shock absorber* dinamakan *Compression Force*. Sedangkan gaya yang dibutuhkan untuk menarik rod *shock absorber* dinamakan *Rebound Force*. Hasil pengujian yang dilakukan, nilai redaman(C) GEA sebesar 6985.76 Ns/m untuk C rebound dan 3515.46 Ns/m untuk C compress. Pada kondisi rebound tampak bahwa nilai C rebound Granmax yang paling mendekati nilai C rebound GEA, yaitu 7472.46 Ns/m. Sedangkan pada kondisi compress, nilai C compress Carry yang paling mendekati nilai C compress GEA, yaitu 3779.73 Ns/m.

Kata kunci: Sistem suspensi, *shock absorber*, nilai C redaman, C rebound, C compress,, mobil GEA.

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia, industri otomotif yang berkembang saat ini mendapat dukungan penuh dari pemerintah. Hal ini dibuktikan dengan dibuatnya mobil nasional sebagai alat transportasi perkotaan yang diberi nama GEA (*Gulirkan Energi Alternatif*) oleh PT INKA. Beberapa komponen yang terdapat pada mobil GEA masih digunakan produk import, salah satunya adalah sistem suspensi. Sistem suspensi terdiri dari *shock absorber* dan pegas. Kemampuan *shock absorber* dalam meredam getaran yang ditimbulkan profil jalan akan mempengaruhi kenyamanan dari kendaraan tersebut.

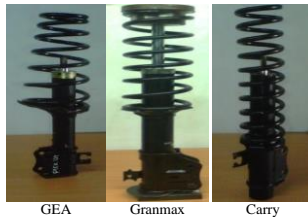
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membahas sistem suspensi kendaraan penumpang. Studi yang dilakukan M.M.Sani, pada tahun 2008 [1] tentang karakteristik dinamis dari sistem suspensi. Nilai dari *shock absorber* kendaraan penumpang untuk kepegasannya antara 20N/mm-60N/mm, dan redamannya antara 1Ns/mm-6Ns/mm. Pada tahun 2011, Winda Oktavia [2] melakukan analisa terhadap energi disipasi yang ditimbulkan akibat eksitasi permukaan jalan pada suspensi mobil GEA. Analisa dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* untuk mensimulasikan eksitasi yang terjadi. Penelitian dititikberatkan pada daya bangkitan yang dapat dihasilkan dari sistem suspensi GEA. Pada tahun 2012, Harus L.G. [3], melakukan pemodelan, simulasi dan analisa energi terdisipasi dari *shock absorber* pada sistem suspensi mobil perkotaan akibat harmonik. Kendaraan dimodelkan sebagai sistem massa, pegas dan peredam dengan 4 derajat kebebasan atau *half-car model* dengan damping ratio bernilai $\zeta=0.3$ dan $\zeta=0.5$, dan kecepatan kendaraan bernilai $V=40\text{km/jam}$ dan $V=80\text{km/jam}$. Untuk eksitasi harmonik digunakan profil jalan berbentuk sinusoidal dengan amplitudo 0.1m dan panjang gelombang 6m. Hasil simulasi menunjukkan daya terdisipasi akibat beban harmonik, daya terdisipasi rata-rata terbesar terjadi pada *shock absorber* bagian depan yaitu sebesar 4kW, dengan nilai damping ratio

0.5 dan kecepatan 80km/jam. Hasil yang didapatkan bisa dijadikan acuan/dasar dalam merancang besarnya energi yang akan dikonversi menjadi energi listrik pada *regenerative suspension*.

Sebagai kelanjutan dari penelitian-penelitian sebelumnya, pada penelitian ini dilakukan uji eksperimen untuk mendapatkan performa suspensi dan untuk mencari suspensi pengganti (*interchange*) dari suspensi mobil GEA, khususnya *shock absorber*. Pemilihan *shock absorber* pengganti berdasarkan kapasitas suspensi mobil yang sebanding dengan mobil GEA, yaitu suspensi mobil Granmax dan Carry. Suspensi pengganti diperoleh dengan cara membandingkan nilai redaman dan karakteristik gaya *shock absorber* pada saat *compress* dan *rebound* dari suspensi.

2. METODOLOGI

Dalam penelitian ini membahas tentang performa suspensi GEA, Granmax dan Carry, yang terdiri dari *shock absorber* dan pegas. Beberapa suspensi yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada Gambar 1. Semua suspensi memiliki tipe *semi trailing*, dimana *shock absorber* dan pegas dipasang paralel. Masing-masing suspensi mempunyai dimensi dan geometri yang berbeda. Karakteristik yang dibahas dari penelitian ini adalah nilai C redaman dari *shock absorber*. Nilai C redaman *shock absorber* diperoleh dari hasil pengujian pada alat uji gambar 2. Pengujian dilakukan dengan memberi perlakuan berupa tarikan (*rebound*) dan tekanan (*compress*) kepada *shock absorber* secara berkala dalam selang waktu tertentu. Alat akan merecord data berupa gaya yang dibutuhkan selama penarikan dan penekanan. Gaya yang dibutuhkan untuk menekan *shock absorber* dinamakan gaya *compress* yang tercatat sebagai *Compression Force*. Sedangkan gaya yang dibutuhkan untuk menarik rod *shock absorber* setelah diberi beban *compress* dinamakan gaya balik atau *Rebound Force*.



Gambar 1. Suspensi



Gambar 2. Alat Uji Shock Absorber

Pengujian dilakukan dengan memberi *stroke* sebesar ± 20 mm dan dilakukan dalam lima tahapan atau step. Dimana masing-masing step diberi kecepatan *compress* dan *rebound* yang berbeda-beda, yaitu 0.05 m/s, 0.1 m/s, 0.12 m/s, 0.15 m/s dan 0.2 m/s. Pengujian tiap step dilakukan pengambilan data sebanyak 1000 kali dengan frekuensi dan amplitudo berbeda pada masing-masing step. Pada step satu, frekuensi sebesar 318.3 Hz dan amplitudo sebesar 3.14 ms. Step dua frekuensi sebesar 836.61 Hz dan amplitudo 1.57 ms. Step tiga sebesar 763.94 Hz dan amplitudo 1.308 ms. Step empat sebesar 954.92 Hz dan amplitudo 1.042 ms. Step lima sebesar 1273.23 Hz dan amplitudo 0.785 ms. Dari data-data hasil pengujian tersebut dirata-rata untuk mendapatkan *compression force* dan *rebound force*. Dari *compression force* dan *rebound force* akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui *C compress* dan *C rebound* dari masing-masing *shock absorber*. Dimana persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$F = c \cdot v ; c = \frac{F}{v}$$

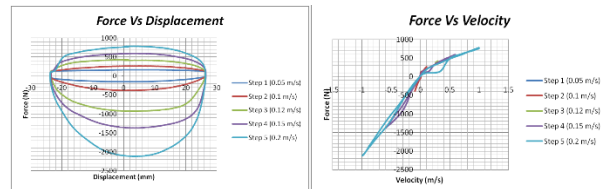
3. HASIL PENGUJIAN

Pada Gambar 3, 4 dan 5. terlihat grafik hubungan antara *Force Vs Displacement* dan *Force Vs Velocity* dari *shock absorber* masing-masing suspensi. Dari grafik terlihat bahwa, dengan gaya yang sama, pada saat *compress* respon kecepatannya lebih tinggi dibandingkan dengan saat *rebound*. Hal ini karena dipengaruhi oleh nilai redaman yang berbeda dari *shock absorber* pada saat terkena *compress* dan *rebound*. Grafik yang dihasilkan membentuk hampir menyerupai elips tidak sempurna.

Shock Absorber GEA

Dari Gambar 3 menunjukkan bahwa, pada saat *compress*, gaya yang diterima *shock absorber* GEA akan membuat perpindahan *shock absorber* lebih besar dengan kata lain, mempunyai kecepatan yang besar. Sedangkan pada saat *rebound*, gaya yang besar digunakan untuk menarik rod dengan kecepatan rendah. Untuk kecepatan yang sama, pada saat *compress* dan *rebound*, gaya yang diperlukan saat *rebound* lebih besar dari 5 kali lipat gaya pada saat *compress*. Kedua fenomena ini terjadi karena adanya perbedaan nilai *C* redaman pada *shock absorber* yang

menerima gaya *compress* dan *rebound*. Selanjutnya, data-data yang diperoleh dari pengujian ditabelkan dan dirata-rata. Pencatatan data dilakukan sebanyak seribu kali, dari jumlah itu diambil rata-rata gaya *compress* dan *rebound* pada masing-masing step pengujian yang terdiri dari berbagai kecepatan. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.

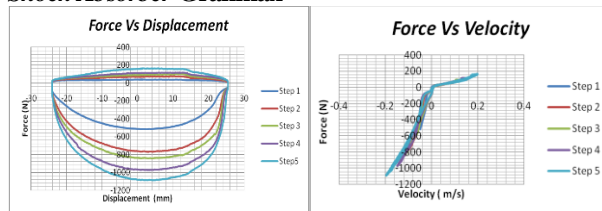


Gambar 3. Grafik Pengujian Shock Absorber GEA

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Shock Absorber GEA

V	F compress	F rebound	C compress	C rebound
0.05	168.5	160.6	3370	3212
0.1	270.5	393.3	2705	3933
0.12	434.5	946.8	3620.83	7890
0.15	597	1386.2	3980	9241.33
0.2	780.3	2130.5	3901.5	10652.5
Average			3515.46	6985.76

Shock Absorber Granmax



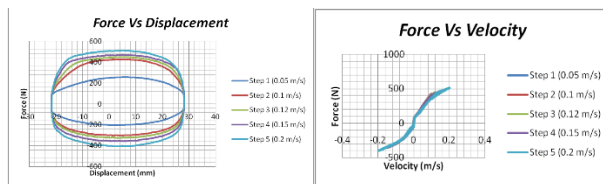
Gambar 4. Grafik Pengujian Shock Absorber Granmax

Dari Gambar 4 menunjukkan bahwa, pada saat *compress*, gaya yang diterima *shock absorber* Granmax akan membuat perpindahan *shock absorber* lebih besar dengan kata lain, mempunyai kecepatan yang besar. Sedangkan pada saat *rebound*, gaya yang besar digunakan untuk menarik rod dengan kecepatan yang rendah. Untuk kecepatan yang sama, pada saat *compress* dan *rebound*, gaya yang diperlukan saat *rebound* lebih besar dari 5 kali lipat gaya pada saat *compress*. Dibandingkan dengan *shock absorber* GEA, maka *shock absorber* Granmax mempunyai kecepatan respon yang lebih besar pada saat *rebound*. Kedua fenomena ini terjadi karena adanya perbedaan nilai *C* redaman pada *shock absorber* yang menerima gaya *compress* dan *rebound*. Selanjutnya, data-data yang diperoleh dari pengujian ditabelkan dan dirata-rata. Pencatatan data dilakukan sebanyak seribu kali, dari jumlah itu diambil rata-rata gaya *compress* dan *rebound* pada masing-masing step pengujian yang terdiri dari berbagai kecepatan. Hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Shock Absorber Granmax

V	F compress	F rebound	C compression	C rebound
0.05	39.1	526.3	782	10526
0.1	77.3	774.9	773	7749
0.12	99.4	850.1	828.33	7084.16
0.15	118.7	981.7	791.33	6544.66
0.2	164.9	1091.7	824.5	5458.5
Average			799.83	7472.46

Shock Absorber Carry



Gambar 5. Grafik Pengujian Shock Absorber Carry

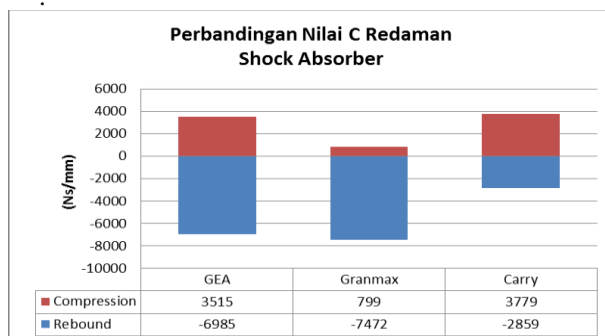
Dari Gambar 5 menunjukkan bahwa, pada saat *compress* dan *rebound*, gaya yang diterima dan digunakan pada *shock absorber* Carry membuat perpindahan *shock absorber* yang hampir sama, dengan kata lain, mempunyai kecepatan yang sama besar. Untuk kecepatan yang sama, pada saat *compress* dan *rebound*, gaya yang diperlukan saat *compress* lebih sama besar dengan gaya pada saat *rebound*. Dibandingkan dengan *shock absorber* yang lainnya, maka *shock absorber* Carry mempunyai kesamaan respon yang antara pada saat *compress* dan *rebound*. Pencatatan data dilakukan sebanyak seribu kali, dari jumlah itu diambil rata-rata gaya *compress* dan *rebound* pada masing-masing step pengujian yang terdiri dari berbagai kecepatan. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Shock Absorber Carry

V	F compress	F rebound	C compress	C rebound
0.05	258.5	206.2	5170	4124
0.1	427.8	303	4278	3030
0.12	449.2	327.4	3743.33	2728.33
0.15	472.1	356.5	3147.33	2376.66
0.2	512	407.2	2560	2036
Average			3779.73	2859

4. PEMBAHASAN

Dari table-table di atas dapat dilihat bahwa nilai C redaman baik itu akibat *compress* maupun *rebound* mempunyai nilai yang berbanding lurus dengan F *compress* dan F *rebound*. Dan untuk memperoleh perbandingan antara nilai C redaman dari *shock absorber* GEA, Granmax dan Carry diperlihatkan pada Gambar 6



Gambar 6. Grafik Perbandingan Nilai C Redaman Shock Absorber

Dari Gambar 6 terlihat bahwa nilai C redaman dari masing-masing *shock absorber*. C *compress* digunakan pada saat *compress* dan C *rebound* digunakan pada saat *rebound*. Dari grafik batang di atas, terlihat bahwa, untuk kondisi *compress*, *shock absorber* GEA (mempunyai C redaman = 3515 Ns/m) mempunyai nilai C redaman yang

hampir sama seperti *shock absorber* Carry yaitu 3779 Ns/m. Namun pada kondisi *rebound*, *shock absorber* GEA (mempunyai C redaman=6985 Ns/m) mempunyai mempunyai nilai C redaman yang hampir sama seperti *shock absorber* Granmax yaitu 7472Ns/m. Jadi, *shock absorber* Granmax dan Carry tidak mempunyai nilai C redaman yang sesuai dengan nilai C redaman *shock absorber* GEA, baik saat *compress* atau *rebound*. Maka dari itu hal ini juga harus dilakukan penelitian lebih jauh tentang karakteristik dinamis dari masing-masing *shock absorber*. Sehingga dapat dipastikan tentang komponen *interchange* dari *shock absorber* GEA.

5. KESIMPULAN

Dari berbagai macam jenis pengujian dan analisa yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan diantaranya sebagai berikut:

1. Nilai C redaman *shock absorber* GEA pada saat *compress*, 3515 Ns/m dan pada saat *rebound* 6985 Ns/m
2. Nilai C redaman *shock absorber* Granmax pada saat *compress*, 799 Ns/m dan pada saat *rebound* 7472 Ns/m
3. Nilai C redaman *shock absorber* Carry pada saat *compress*, 3779 Ns/m dan pada saat *rebound* 2859 Ns/m
4. Nilai C redaman *shock absorber* GEA pada saat *compress* mirip dengan nilai C redaman *shock absorber* Carry, 3779 Ns/m dan nilai C redaman *shock absorber* GEA pada saat *rebound* mirip dengan nilai C redaman *shock absorber* Granmax, 7472 Ns/m
5. Tidak adanya kemiripan nilai C redaman pada C *compress* dan C *rebound* dalam satu *shock absorber* ini maka tidak ada *shock absorber* yang dapat menggantikan komponen *shock absorber* GEA

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R.R. Winda, Oktavia, "Analisa Respon dan Energi Terdisipasi pada Sistem Suspensi Mobil GEA Akibat Eksitasi Profil Jalan," Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, 2011.
- [2] M.S.M. Sani *et. al.*, "Study on Dynamic Characteristics of Automotive Shock Absorber System", Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, Tun Abdul Razak Highway, Malaysian Science and Technology Congress, MSTC08, 16~17 Dec, KLCC, Malaysia, 2008.
- [3] Harus. L.G, Wiwiek H., "Analisa Energi Terdisipasi Pada Shock Absorber Mobil Perkotaan Akibat Beban Harmonik", ITS-Article-21105130000610, Publication url: <http://digilib.its.ac.id/24794.html>.
- [4] Deutschman, Aaron D., *Machine Design Theory and Practice*, Macmillan Publishing Co, New York, 1975.
- [5] Thomson, William., Prasetyo, Lea "Teori Getaran Dengan Penerapannya", Departement of Mechanical Engineering, University Of California, Santa Barbara, California.
- [6] Sutantra, I Nyoman, *Teknologi Otomotif Edisi Kedua*, Teknik Mesin ITS, Surabaya, 2010.
- [7] Singresu S. Rao. *Mechanical Vibrations*. Perason Education South Asia Pte Ltd. Singapore, 2005.

ISBN 978-979-25-4418-3



Panitia Seminar Nasional Teknik Mesin 9
Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri
Universitas Kristen Petra
JL. Siwalankerto 121-131, Surabaya
<http://sntm.petra.ac.id>
Email: sntm@petra.ac.id
telp:(031) 298-3464, 298-3465, 298-3472
Fax:(031) 841-7658

