

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN KEMAJUAN

1	Judul Penelitian	: Pengembangan Progam Perhitungan Berbasis Internet untuk Pembelajaran dan Penelitian Metode Elemen Hingga
2	Ketua Peneliti:	
	a. Nama Lengkap dan Gelar	: Wong Foek Tjong, Ph.D.
	b. Jenis Kelamin	: L
	c. NIP	: 00-034
	d. Jabatan Fungsional	: Asisten Ahli
	e. Jurusan/Fakultas/Pusat Studi	: Teknik Sipil
3	Alamat Ketua Peneliti	
	a. Alamat Kantor (Telp/fax/e-mail)	: Gedung Radius Prawiro, Ruang W 209, UK Petra 031-298 3041
	b. Alamat Rumah (Telp/fax/e-mail)	: Jl. Siwalankerto Permai I B18, Surabaya 60236 031-843 0578
4	Jumlah Anggota Peneliti	: Enam orang
	a. Nama Anggota Penelitian I	: Liliana, M.Eng., NIP: 03-024
	b. Nama Anggota Penelitian II	: Stefani Virgin, ST
	c. Nama Anggota Penelitian III	: Ferdiana Soekresno, ST
	d. Nama Anggota Penelitian IV	: Christopher Imantaka, ST
	e. Nama Anggota Penelitian V	: Danny Wijaya
	f. Nama Anggota Penelitian VI	: Welly Pontjoharyo
5	Lokasi Penelitian	: UK Petra
6	Kerjasama dengan institusi lain	: -
7	Jangka Waktu Penelitian	: satu tahun
8	Biaya Penelitian	
	a. Sumber dari UK Petra	: Rp 6.000.000,-
	b. Sumber lainnya	: -
	Total	: Rp 6.000.000,-

Mengetahui,
Dekan Fakultas

(Timoticin Kwanda, Ph.D.)
NIP: 88002

Surabaya, 30 Mei 2014
Ketua Peneliti,

(Wong Foek Tjong, Ph.D.)
NIP: 00034

Menyetujui:
Kepala LPPM-UK Petra

(Dr. Juliana Anggono)
NIP: 94016

RINGKASAN

Metode elemen hingga (MEH) merupakan metode perhitungan yang luas digunakan dalam bidang rekayasa dan kelimuan sehingga telah menjadi bagian kurikulum pendidikan banyak program studi bidang rekayasa, termasuk kurikulum Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra (PSTS UK Petra). Agar mahasiswa dapat mempelajari MEH secara efisien diperlukan alat bantu perhitungan MEH. Dalam penelitian ini dikembangkan program perhitungan berbasis internet untuk alat bantu pembelajaran mata kuliah MEH di PSTS UK Petra. Program yang dibuat dapat menunjukkan langkah-langkah perhitungan analisis statik linier struktur rangka dua dimensi dan benda tegangan/regangan bidang. Elemen-elemen yang dipakai adalah elemen-elemen yang dibahas dalam mata kuliah MEH, yakni elemen rangka dua dimensi, elemen CST dan elemen Q4. Pengembangan program dilakukan dalam dua tahap, yaitu program untuk analisis struktur rangka dan program untuk analisis tegangan bidang/regangan bidang. Saat ini program pertama telah selesai dan dapat diakses di situs ta29.petra.ac.id. Program ini telah diujicobakan dalam kelas MEH dan telah mendapat umpan balik dari peserta kuliah MEH. Program kedua masih dalam tahap pengembangan.

PRAKATA

Penulis mengucapkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa saat ini dapat mencapai kemajuan berarti dalam penelitian pengembangan ini.

Penelitian ini dapat dilaksanakan dengan kerjasama yang baik antara semua yang terlibat, yaitu Ibu Liliana sebagai rekan peneliti, Sdri. Stefani V. dan Ferdiana S. sebagai mahasiswa (kini alumni) yang telah mengembangkan program untuk analisis struktur rangka dua dimensi, Sdr. Christopher I. sebagai pemrogram utama, serta Sdr. Danny W. dan Welly P. yang saat ini sedang mengembangkan program untuk analisis benda tegangan/regangan bidang. Penulis berterima kasih kepada mereka semua.

Penulis juga berterima kasih kepada Ibu Dr. Juliana A. dan Bapak Nugraha P.A. selaku pimpinan dan staf Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat atas dukungan dana dan administrasi dalam penelitian ini. Terima kasih juga kepada Bapak Dr. Timoticin selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan serta Bapak Daniel T. selaku Kepala Program Studi Teknik Sipil.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
RINGKASAN	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
BAB III METODE PENELITIAN	11
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	13
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	26
DAFTAR PUSTAKA	27
LAMPIRAN	29

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Respon terhadap pertanyaan kesatu	22
Tabel 2. Respon terhadap pertanyaan kedua	23
Tabel 3. Respon terhadap pertanyaan ketiga	23
Tabel 4. Respon terhadap pertanyaan keempat	23
Tabel 5. Respon terhadap pertanyaan kelima	24
Tabel 6. Respon terhadap pertanyaan keenam	24
Tabel 7. Respon terhadap pertanyaan ketujuh	24
Tabel 8. Respon terhadap pertanyaan kedelapan	25

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Elemen rangka dua dimensi, perpindahan dan gaya nodal	4
Gambar 2. Elemen segitiga regangan konstan, perpindahan dan gaya nodal	7
Gambar 3. Elemen segiempat isoparametrik bilinier	8
Gambar 4. Diagram alir penelitian	12
Gambar 5. Tampilan awal <i>website</i>	14
Gambar 6. Contoh soal	14
Gambar 7. Tampilan <i>input project</i>	14
Gambar 8. Tampilan input <i>nodes, properties, dan elements</i>	15
Gambar 9. Tampilan input <i>loads</i>	15
Gambar 10. Tampilan output <i>undeformed shape</i>	16
Gambar 11. Tampilan output <i>pre-assembly phase</i>	16
Gambar 12. Tampilan output <i>assembly phase</i>	17
Gambar 13. Tampilan output <i>pre-solution phase</i>	17
Gambar 14. Tampilan output <i>modification phase</i>	18
Gambar 15. Tampilan output <i>solution phase</i>	18
Gambar 16. Tampilan output <i>post-processing phase</i>	19
Gambar 17. Tampilan output <i>post-processing phase</i> (lanjutan)	19
Gambar 18. Tampilan output <i>deformed shape</i>	20
Gambar 19. Tampilan layar verifikasi	20
Gambar 20. Tampilan layar verifikasi (lanjutan)	21

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 2. Soal UTS MK Metode Elemen Hingga	29
Lampiran 2. Kuesioner ta29.petra.ac.id	31
Lampiran 3. Laporan keuangan	32

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Metode elemen hingga (MEH) merupakan metode numerik yang paling luas digunakan saat ini di berbagai bidang rekayasa dan ilmu pengetahuan sebagai alat bantu dalam proses desain dan evaluasi produk atau untuk memahami suatu fenomena fisik (Bathe, 1996; Cook, Malkus, Plesha, & Witt, 2002; Felippa, 2013). Kenyataan ini tercermin dari banyaknya *commercial software* bidang rekayasa yang perhitungannya berdasarkan MEH, mulai dari *general purpose software* seperti Abaqus (“Abaqus Overview - Dassault Systèmes,” n.d.), Adina (“ADINA - Finite Element Analysis Software,” n.d.), Ansys (“ANSYS - Simulation Driven Product Development,” n.d.) sampai program-program khusus untuk penelitian, misalnya OpenSees (“Open System for Earthquake Engineering Simulation - Home Page,” n.d.) dan Seismostruct (“SeismoSoft - SeismoStruct,” n.d.) untuk penelitian dalam bidang rekayasa bangunan tahan gempa.

Karena MEH telah menjadi metode perhitungan yang penting dalam bidang rekayasa, maka metode ini telah masuk dalam kurikulum pendidikan S1, S2, dan S3 bidang rekayasa di banyak perguruan tinggi di berbagai negara, termasuk di Indonesia. Di Universitas Kristen Petra, mata kuliah MEH ditawarkan sebagai salah satu mata kuliah pilihan di program studi tingkat S1 Teknik Sipil dan Teknik Mesin, dan mata kuliah wajib di program pascasarjana Magister Teknik Sipil bidang studi Rekayasa Struktur.

Untuk dapat mempelajari MEH secara efektif seorang pelajar perlu mendapatkan pengalaman mengerjakan proses-proses perhitungan dalam MEH secara manual, dengan dibantu program komputer yang dapat memproses perhitungan-perhitungan matriks (Welch & Ressler, 2002). Dengan program ini, pelajar akan dapat mencoba dan mendemonstrasikan langkah-langkah perhitungan secara cepat (efisien waktu). Di dalam kelas MEH di program studi S1 Teknik Sipil yang penulis asuh, digunakan program-program Matlab yang dikembangkan oleh penulis sebagai alat bantu untuk pembelajaran MEH. Program-program ini juga ternyata bermanfaat dalam melakukan penelitian dalam bidang MEH pada skripsi mahasiswa.

Saat ini perkembangan internet telah memasuki hampir semua wilayah hidup manusia, termasuk bidang pendidikan dan penelitian. Proses belajar-mengajar dengan

memanfaatkan teknologi internet, yaitu *e-learning*, sudah berkembang dan diintegrasikan dengan cara belajar konvensional (Littlejohn & Pegler, 2007). Kemudahan utama dari penggunaan internet untuk proses belajar-mengajar adalah para pelajar dapat belajar oleh ruang dan waktu dalam belajar. Selain itu, situs-situs yang dikembangkan untuk *e-learning* dapat diakses siapa saja yang hendak memanfaatkannya untuk belajar.

Saat ini terdapat beberapa situs internet untuk mempelajari dan melakukan analisis metode elemen hingga. Situs yang dikembangkan oleh G. Nikishov <http://web-ext.u-aizu.ac.jp/~niki/javaappl/index.html> berguna untuk memperagakan proses *assembly* secara visual. Situs <http://engineering-education.com/miniFEA/about.htm> dikembangkan oleh P.S. Steif untuk membantu mempelajari metode elemen hingga. Terdapat juga situs yang mengarah ke konsultan profesional untuk analisis struktur dengan metode elemen hingga seperti <http://www.onlinefeasolver.com/index.php>. Pengembangan situs khusus untuk melakukan post-processing metode elemen hingga dipresentasikan oleh Weng (2011). Walaupun demikian, situs-situs tersebut tidak sepenuhnya cocok dengan kebutuhan silabus pembelajaran MEH program S1 Teknik Sipil Universitas Kristen Petra.

Termotivasi oleh manfaat dan potensi teknologi internet untuk pembelajaran dan penelitian, maka penulis mengembangkan program perhitungan berbasis internet untuk alat bantu pembelajaran MEH dan untuk melakukan penelitian-penelitian dasar MEH. Untuk tahap awal, program ini dibatasi untuk perhitungan analisis statik linier struktur rangka dua dimensi dan analisis tegangan bidang/regangan bidang dengan elemen-elemen dasar yang dipelajari dalam kuliah MEH program S1 Teknik Sipil. Ke depan program ini dapat dikembangkan lebih lanjut melalui penelitian-penelitian MEH, diarahkan untuk analisis dinamik, stabilitas, nonlinier material dan geometri.

1.2. Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan program perhitungan metode elemen hingga berbasis internet untuk analisis struktur rangka dua dimensi serta analisis tegangan/ regangan bidang dengan elemen segitiga regangan konstan dan elemen segiempat isoparametrik bilinear. Program ini relatif mudah dikembangkan terus untuk elemen-elemen lainnya dan untuk analisis dinamik dan stabilitas.

1.3. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Model struktur yang ditinjau adalah struktur rangka bidang (*plane frame structures*), dan benda tegangan/ regangan bidang (*plane stress/strain solids*).
- Analisis struktur dibatasi untuk analisis statik linier.
- Metode perhitungannya adalah metode kekakuan langsung (*the direct stiffness method*) dengan menggunakan elemen rangka bidang, elemen segitiga regangan konstan (*the constant strain triangular element*), dan elemen segiempat isoparametrik bilinear (*the bilinear isoparametric quadrilateral element*).
- Elemen rangka bidang memasukkan seluruh pengaruh deformasi, yakni deformasi lentur, geser, dan aksial.
- Untuk masalah tegangan/ regangan bidang termasuk kasus tumpuan miring, tumpuan pegas dan jenis material ortotropik.
- Pemrograman berbasis internet menggunakan bahasa pemrograman HTML, PHP, Javascript dan JQuery.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini menghasilkan suatu program dan situs internet yang dapat digunakan dalam proses-belajar mengajar MEH dan analisis struktur di Program studi Teknik Sipil. Khususnya situs ini akan membantu para pelajar MEH memahami prosedur perhitungan elemen hingga secara menyeluruh. Selain itu program ini bisa dikembangkan untuk penelitian-penelitian MEH lebih lanjut seperti aplikasi untuk analisis dinamik, stabilitas, dan analisis nonlinier material dan geometri.

Luaran dari penelitian ini adalah program berbasis internet dan situs pembelajaran analisis struktur dengan metode elemen hingga yang interaktif.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Metode Kekakuan Langsung

Metode kekakuan langsung merupakan implementasi dari metode elemen hingga yang paling luas digunakan (Cook et al., 2002; Felippa, 2013; Hutton, 2004; Logan, 2007). Dalam metode ini, persamaan keseimbangan struktur dalam bentuk matriks

$$\mathbf{K}\mathbf{D} = \mathbf{F} \quad (1)$$

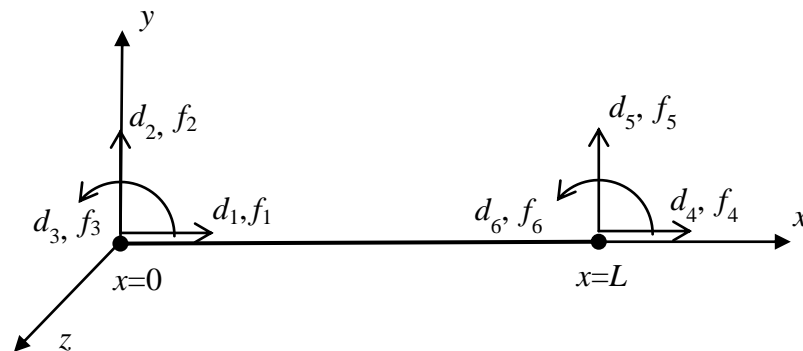
di mana \mathbf{K} adalah matriks kekakuan struktur, \mathbf{D} adalah vektor (matriks kolom) perpindahan titik-titik nodal, dan \mathbf{F} adalah vektor gaya pada titik-titik nodal, dirakit (*assembled*) dari persamaan-persamaan keseimbangan seluruh elemen yang membentuk struktur itu. Persamaan keseimbangan suatu elemen adalah

$$\mathbf{k}\mathbf{d} = \mathbf{f} \quad (2)$$

di mana \mathbf{k} adalah matriks kekakuan elemen, \mathbf{d} adalah vektor perpindahan titik-titik nodal elemen, dan \mathbf{f} adalah vektor gaya pada titik-titik nodal elemen. Orde dari matriks-matriks dalam persamaan (1) adalah sebesar jumlah derajat kebebasan strukturnya (DOF), yang dalam praktek rekayasa bisa saja jumlahnya sampai jutaan. Jadi, dalam implementasi dengan komputer perlu digunakan algoritma yang dapat menyimpan matriks \mathbf{K} secara efisien dan yang dapat memproses pemecahan persamaan aljabar linier secara efisien.

2.2. Elemen Rangka Bidang

Tinjau suatu elemen rangka (*frame element*) yang panjangnya L seperti pada Gambar 1.



Gambar 3. Elemen rangka dua dimensi, perpindahan dan gaya nodal

Garis dalam Gambar 1 mewakili sumbu netral dari elemen rangka. Perpindahan-perpindahan d_1 dan d_4 adalah perpindahan aksial penampang pada $x=0$ dan $x=L$, dan d_2 dan d_5 adalah perpindahan transversal penampang. Perpindahan d_3 dan d_6 adalah rotasi penampang terhadap sumbu yang sejajar sumbu z dan melalui titik-titik nodal. Gaya-gaya f_1 dan f_4 adalah gaya aksial pada $x=0$ dan $x=L$, f_2 dan f_5 adalah gaya-gaya transversal, dan f_3 dan f_6 adalah momen-momen. Gaya-gaya nodal f_1, f_2, \dots, f_6 ini merupakan penggabungan dari gaya-gaya dalam dan gaya-gaya nodal ekuivalen dari aksi-aksi yang bekerja dalam elemen, misalnya beban terdistribusi sepanjang elemen, perubahan temperatur. Perpindahan-perpindahan dan gaya-gaya nodal ini dituliskan dalam bentuk matriks sbb.:

$$\mathbf{d} = \{d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5 \ d_6\}^T \quad (3)$$

$$\mathbf{f} = \{f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6\}^T \quad (4)$$

2.2.1. Matriks Kekakuan Elemen

Misalkan elemen ini terbuat dari material yang homogen dan isotropik dengan modulus elastisitas E dan rasio Poisson ν , serta luas penampang A dan momen inersia penampang terhadap sumbu yang melalui bidang netral dan sejajar sumbu z adalah I . Matriks kekakuan elemen ini adalah (Cook et al., 2002; Logan, 2007)

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 12C_2 & 6C_2L & 0 & -12C_2 & 6C_2L \\ 0 & 6C_2L & (4 + \varphi)C_2L^2 & 0 & -6C_2L & (2 - \varphi)C_2L^2 \\ -C_1 & 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & -12C_2 & -6C_2L & 0 & 12C_2 & -6C_2L \\ 0 & 6C_2L & (2 - \varphi)C_2L^2 & 0 & -6C_2L & (4 + \varphi)C_2L^2 \end{bmatrix} \quad (5a)$$

dengan

$$C_1 = \frac{EA}{L} \text{ dan } C_2 = \frac{EI}{L^3 (1+\varphi)}, \quad \varphi = \frac{12EI}{k_s AGL^2} \quad (5b)$$

Dalam persamaan (5b),

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

adalah modulus geser dan k_s adalah faktor koreksi geser yang bergantung kepada bentuk penampang, misalnya untuk penampang berbentuk segiempat $k_s=5/6$.

Matriks kekakuan elemen rangka batang (*truss element*) dapat dipandang sebagai kasus khusus dari elemen rangka dengan $I=0$ dan semua rotasi pada titik nodal

dimatikan (yakni, semua rotasi titik nodal ditentukan sama dengan nol pada awal analisis).

2.2.2. Transformasi Matriks Kekakuan Elemen

Matriks kekakuan pada persamaan (5a) diturunkan dengan mengacu kepada sistem koordinat lokal yang didefinisikan untuk setiap elemen. Untuk mendapatkan matriks kekakuan elemen yang mengacu kepada koordinat global dibutuhkan transformasi dari koordinat lokal ke global dengan persamaan

$$\mathbf{k}_g = \mathbf{T}^T \mathbf{k} \mathbf{T} \quad (7)$$

di mana \mathbf{k}_g adalah matriks kekakuan elemen yang dinyatakan dalam koordinat global dan \mathbf{T} adalah matriks transformasi sbb.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8a)$$

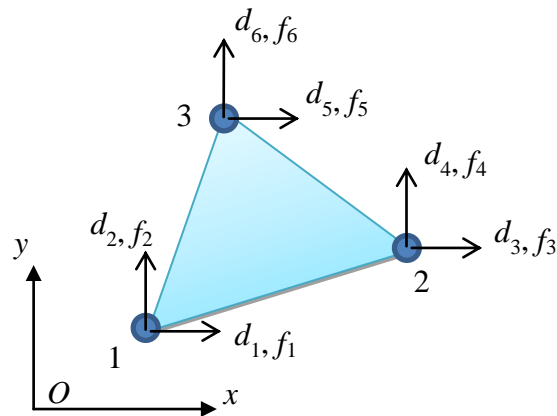
$$C = \cos \theta, S = \sin \theta \quad (8b)$$

dan θ adalah sudut yang dibentuk antara sumbu x lokal dengan sumbu X global.

2.3. Elemen Segitiga Regangan Konstan

Elemen ini merupakan elemen yang telah hadir pada waktu permulaan perkembangan metode elemen hingga (Turner, Clough, Martin, & Topp, 1956). Elemen ini merupakan elemen yang paling sederhana untuk memecahkan masalah tegangan/regangan bidang. Dia dinamakan elemen segitiga regangan konstan (*the constant strain triangular element*, disingkat CST) karena berdasarkan asumsi medan perpindahan linier diperoleh regangan yang konstan dalam suatu elemen. Dalam aplikasi dengan *software* modern secara visual akan terlihat bahwa struktur yang dimodelkan dengan elemen-elemen ini akan mempunyai satu warna untuk setiap elemen, tanpa ada gradasi warna.

Elemen CST mempunyai enam DOF seperti dilukiskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Elemen segitiga regangan konstan, perpindahan dan gaya nodal

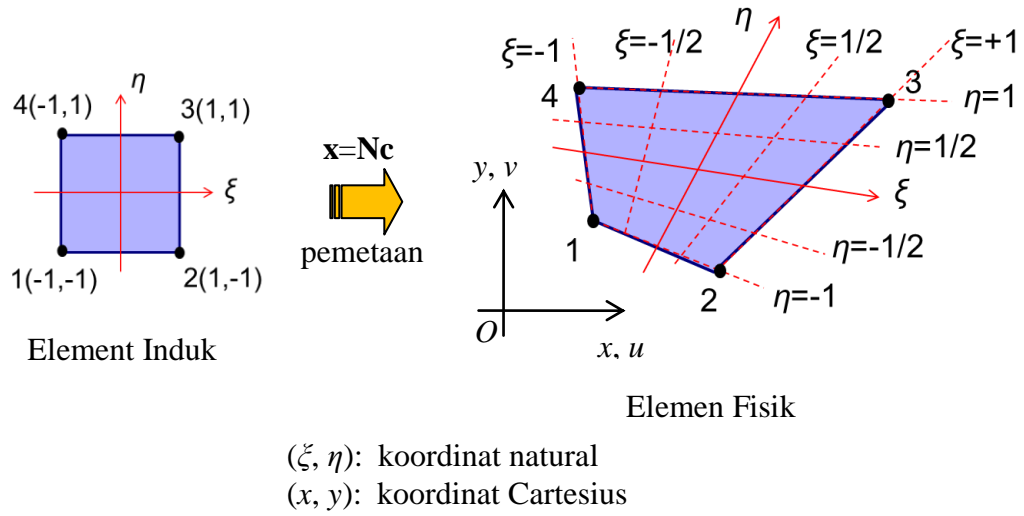
Gaya-gaya nodal f_1 s/d f_6 merupakan gabungan dari gaya-gaya interaksi antara elemen yang satu dengan yang elemen lainnya dan gaya-gaya nodal ekuivalen akibat aksi-aksi pada elemen CST, misalnya *body force* dan *surface (edge) traction*. Persamaan keseimbangan untuk elemen ini dapat diperoleh, antara lain, dengan menggunakan prinsip energi potensial total stasioner dan prinsip perpindahan virtual (Cook et al., 2002; Felippa, 2013; Hutton, 2004; Logan, 2007; Weaver & Johnston, 1984).

Karena CST merupakan elemen dua dimensi yang paling sederhana, maka elemen ini banyak dibahas dalam buku-buku dan kuliah-kuliah pengenalan metode elemen hingga, walaupun dalam praktek sebenarnya tidak dianjurkan untuk digunakan karena elemen ini tidak akurat.

2.4. Elemen Segiempat Isoparametrik Bilinier

Elemen segiempat isoparametrik bilinier (Q4) merupakan elemen yang banyak digunakan untuk memecahkan masalah benda yang dapat dimodelkan sebagai bidang, seperti pada masalah tegangan/regangan bidang. Oleh karena itu Q4 terkandung dalam banyak *commercial software*, termasuk dalam SAP2000 yang digunakan dalam pengajaran MEH di Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra. Karena elemen ini banyak digunakan dalam praktek dan konsep isoparametrik merupakan konsep penting di dalam MEH, maka elemen Q4 ini masuk di dalam silabus mata kuliah MEH di Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra.

Konsep dasar *pemetaan isoparametrik* diperlihatkan pada Gambar 3. Tinjau suatu elemen segiempat dengan titik-titik nodal 1, 2, 3, 4 dengan urutan arah berlawanan jarum jam.



Gambar 3. Elemen segiempat isoparametrik bilinear

Elemen ini (*physical element*) dipandang sebagai peta dari elemen induk (*parent element*) yang berbentuk bujursangkar yang panjangnya dua (*the bi-unit square*). Dengan pandangan ini titik-titik pada elemen fisik yang dinyatakan dengan sistem koordinat Cartesius xy merupakan peta dari titik-titik pada elemen induk yang dinyatakan dengan sistem koordinat $\xi\eta$, yang disebut sistem koordinat natural. Pemetaan ini dirumuskan sbb.:

$$\mathbf{x} = \mathbf{N}\mathbf{c} \quad (9a)$$

dengan $\mathbf{x} = \{x \ y\}^T$ adalah vektor koordinat Cartesius dari suatu titik pada elemen fisik, \mathbf{N} adalah matriks fungsi bentuk,

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (9b)$$

dan \mathbf{c} adalah vektor koordinat titik-titik nodal elemen fisik,

$$\mathbf{c} = \{x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4\} \quad (9c)$$

Fungsi-fungsi bentuk dalam persamaan (9b) merupakan fungsi dari bilinear dari koordinat natural $\xi\eta$, yaitu

$$\begin{aligned} N_1 &= (1 - \xi)(1 - \eta) & N_2 &= (1 + \xi)(1 - \eta) \\ N_3 &= (1 + \xi)(1 + \eta) & N_4 &= (1 - \xi)(1 + \eta) \end{aligned} \quad (10)$$

Interpolasi fungsi perpindahan memiliki bentuk yang serupa dengan pemetaan koordinat, yaitu

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{d} \quad (11a)$$

dengan $\mathbf{u} = \{u \quad v\}^T$ adalah vektor perpindahan suatu titik pada elemen fisik, \mathbf{N} adalah matriks fungsi bentuk yang persis sama seperti fungsi bentuk dalam persamaan (9a), dan \mathbf{d} adalah vektor koordinat titik-titik nodal elemen fisik,

$$\mathbf{d} = \{u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad u_4 \quad v_4\} \quad (11b)$$

Dalam persamaan (11) ini u dan v adalah komponen-komponen vektor perpindahan suatu titik dalam arah x dan y .

Kata “isoparametrik” mengacu kepada penggunaan interpolasi yang sama baik untuk interpolasi geometri, persamaan (9a), maupun untuk interpolasi perpindahan, persamaan (11a). Berdasarkan konsep inilah persamaan keseimbangan elemen diturunkan, yang dalam implementasinya memerlukan perhitungan integrasi numerik untuk menghitung matriks kekakuan elemen (Bathe, 1996; Cook et al., 2002; Felippa, 2013; Hughes, 1987; Zienkiewicz & Taylor, 2000).

2.5. PHP Hypertext Preprocessor

PHP adalah bahasa pemrograman yang memungkinkan para *web developer* untuk membuat aplikasi web yang dinamis dengan cepat. PHP merupakan singkatan dari “PHP: Hypertext Preprocessor”. PHP ditulis dan diperkenalkan pertama kali sekitar tahun 1994 oleh Rasmus Lerdorf melalui situsnya untuk mengetahui siapa saja yang telah mengakses ringkasan online-nya. PHP merupakan salah satu bahasa *script* yang terbilang baru dan tersedia secara bebas dan masih memungkinkan untuk dikembangkan lebih lanjut. PHP dapat diintegrasikan (*embedded*) ke dalam *web server*, atau dapat berperan sebagai program CGI yang terpisah (Welling & Thomson, 2001).

Contoh terkenal dari aplikasi PHP adalah phpBB dan MediaWiki (*software* di belakang Wikipedia). PHP juga dapat dilihat sebagai pilihan lain dari ASP.NET/C#/VB.NET Microsoft, ColdFusion Macromedia, JSP/Java Sun Microsystems, dan CGI/Perl. Contoh aplikasi lain yang lebih kompleks berupa CMS yang dibangun menggunakan PHP adalah Mambo, Joomla!, Postnuke, Xaraya, dan lain-lain.

Salah satu keunggulan lain PHP adalah sangat mudah untuk dipelajari dan dipahami oleh pemula, sedangkan programmer profesional akan menjumpai banyak sekali fitur-fitur yang *advanced*. Hampir seluruh aplikasi berbasis web dapat dibuat dengan PHP, namun fungsi PHP yang paling utama adalah untuk menghubungkan database dengan web. Dengan PHP, membuat aplikasi web yang terkoneksi ke database menjadi sangat mudah.

Pada saat ini bahasa PERL dan CGI sudah jauh ketinggalan jaman sehingga sebagian besar *web designer* banyak beralih ke bahasa *server-side scripting* yang lebih dinamis seperti PHP. Seluruh aplikasi berbasis web dapat dibuat dengan PHP. Namun kekuatan yang paling

utama PHP adalah pada konektivitasnya dengan *system database* di dalam web. Kemampuan dari PHP, antara lain:

a. Koneksi ke database

PHP mendukung banyak sekali database dalam *native mode* dan melalui ODBC. Sistem database yang telah didukung oleh PHP hingga saat ini adalah: Oracle, Sybase, mSQL, MySQL, Solid, Generic, ODBC, PostgreSQL, Adabas D, FilePro, Velocis, dBase, Unix dbin dan semua database dengan interface ODBC.

b. *Session*

Session adalah mekanisme penyimpanan sebuah variabel data dengan waktu tertentu pada sisi client (*browser*). Administrator dapat membuat *session* menggunakan function `session_start()` yang fungsinya untuk melakukan inisialisasi *session*. Letak penulisan *session* yaitu sebelum *header* atau sebelum `<html>` maupun `<head>`. *Session* ini akan dimulai ketika pengunjung mulai masuk website dan akan berakhir begitu pengunjung tersebut menutup website. Dalam *session* ini, setiap pengunjung akan diberikan sebuah *id* yang disebut dengan `session_id`.

c. *Server side*

Script PHP tidak memerlukan adanya kompatibilitas *browser* atau harus menggunakan *browser* tertentu. *Server* yang mengerjakan *script* tersebut dan hasil yang dikirimkan kembali ke *browser* biasanya dalam bentuk teks ataupun gambar sehingga dapat dikenali oleh *browser* apapun.

d. *Open Source*

Source code dari PHP dapat digunakan, diganti atau diubah tanpa dikenai biaya.

e. *Multi Platform*

Script PHP selain dapat dijalankan pada *platform* LINUX, juga dapat dijalankan pada platform Windows dengan menggunakan *software* PHP untuk Windows, dengan *web server* IIS pada Windows 2000/XP ataupun PWS pada Windows 98.

BAB III METODE PENELITIAN

Pengembangan program berbasis internet dilakukan dua tahap, yaitu:

1. Pengembangan program untuk analisis struktur rangka bidang.
2. Pengembangan program untuk analisis tegangan/regangan bidang.

Dalam setiap tahap pengembangan tersebut dilakukan langkah-langkah seperti diperlihatkan pada bagan alir penelitian (Gambar 4). Langkah pertama adalah studi literatur mengenai pemrograman metode elemen hingga. Dari studi ini dipilih algoritma yang sesuai dengan apa yang diajarkan dalam mata kuliah MEH serta mudah diimplementasikan ke dalam bahasa-bahasa pemrograman yang digunakan.

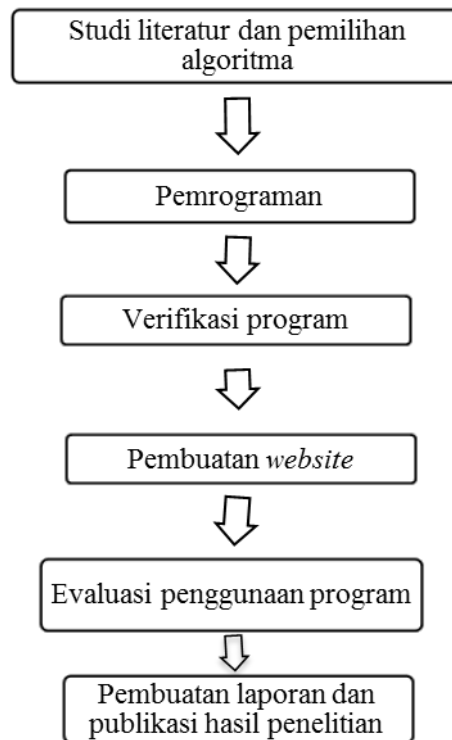
Langkah kedua adalah penulisan program komputer berdasarkan algoritma terpilih. Bahasa pemrograman yang dipakai meliputi Javascript, JQuery, PHP, dan HTML untuk perhitungan numerik, grafik, animasi, dan tampilan pada *website*.

Langkah ketiga adalah melakukan verifikasi program secara menyeluruh dengan menggunakan sejumlah *benchmark problems* untuk struktur rangka bidang, rangka batang bidang, dan tegangan/regangan bidang.

Setelah seluruh program siap, diverifikasi dan didokumentasikan dengan baik, program ditampilkan dalam *website* supaya dapat diakses oleh siapapun melalui internet.

Setelah itu *website* ini diperkenalkan kepada peserta didik dan mereka diminta untuk memberikan umpan balik melalui kuesioner (lihat Lampiran).

Langkah terakhir adalah melakukan dokumentasi hasil penelitian serta publikasi pada seminar internasional atau jurnal nasional.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Saat ini tahap pertama, yakni pengembangan program untuk analisis struktur rangka bidang telah selesai dilakukan dan hasilnya dapat diakses pada situs <http://ta29.petra.ac.id>. Pengembangan program ini didokumentasikan secara lengkap dalam Skripsi (Virgin & Soekresno, 2013). Tahap kedua, yakni pengembangan program untuk analisis tegangan/regangan bidang sudah mencakup pemrograman semua yang diperlukan dalam perhitungan dengan element-elemen CST dan Q4. Yang sedang dilakukan saat ini adalah pengembangan tampilan grafis hasil-hasil analisis serta pengembangan fasilitas personalisasi dari pengguna program.

4.1. Prosedur Penggunaan Program

Tampilan awal dari halaman situs <http://ta29.petra.ac.id> akan muncul tampilan seperti Gambar 5. Apabila pengguna ingin menyelesaikan sebuah soal analisis struktur seperti pada Gambar 6 maka langkah-langkah yang harus dilakukan adalah sebagai berikut: Pilih menu *Direct Stiffness Method* dan buat *project* baru seperti terlihat pada Gambar 7. Data kemudian dimasukkan seperti dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9, setelah itu akan muncul gambar *undeformed shape* berdasarkan *input* yang dimasukkan (Gambar 10). Setelah itu pengguna dapat melihat langkah-langkah perhitungan metode kekakuan langsung secara lengkap sampai didapatkan hasil perpindahan titik nodal, reaksi perletakan (Gambar 11-18).

4.2. Verifikasi Program

Program telah diverifikasi dengan menggunakan sejumlah masalah struktur rangka dan rangka batang yang terdapat dalam berbagai sumber, terutama Computers & Structures (2007). Verifikasi ini dapat dilihat dalam situs ta29.petra.ac.id seperti terlihat pada Gambar 19 dan 20. Hasil-hasil verifikasi menunjukkan (Virgin & Soekresno, 2013) bahwa perhitungan berjalan dengan baik untuk semua kasus yang ditinjau.



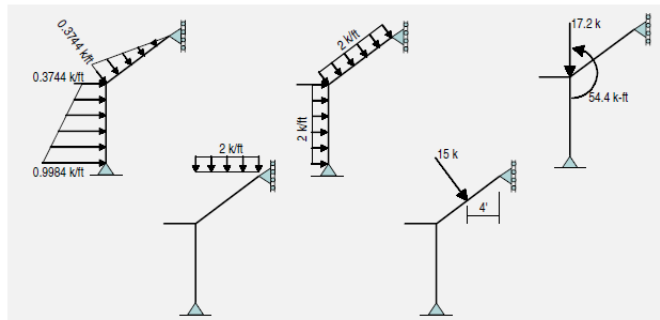
Introduction to Finite Element Method

Civil Engineering Department - Petra Christian University

[HOME](#)

[DIRECT STIFFNESS METHOD](#)

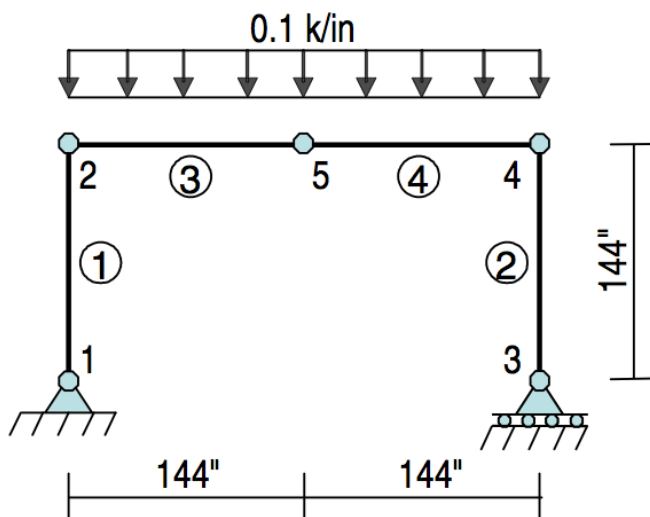
[ABOUT US](#)



Welcome! This site has features that help you understanding the Direct Stiffness Method. This website is the stepping-stones for the development of internet-based computational program for learning and research of Finite Element Method.

"The Direct Stiffness Method (DSM) is by far the most common implementation of Finite Element Method (FEM). In particular, all major commercial FEM codes are based on DSM." – Felippa

Gambar 5. Tampilan awal *website*



Material Properties :

$$E = 29,900 \text{ k/in}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$G = 11,500 \text{ k/in}^2$$

Section Properties :

$$A = 9.12 \text{ in}^2$$

$$I = 110 \text{ in}^4$$

$$A_v = 2.28 \text{ in}^2$$

Gambar 6. Contoh soal (diambil dari Computers & Structures, 2007)

- [Projects \(click to expand\)](#)

ID

9

Name

MA/018

Description

Laporan

EDIT











DELETE

[Add New Project](#)

Click an item above to select a Project

Gambar 7. Tampilan *input project*

- Nodes *(click to expand)*

ID	X Coordinate	Y Coordinate	Boundary Condition		
1	0	0	Hinge	 EDIT	 DELETE
2	0	144	None	 EDIT	 DELETE
3	288	0	Roll1	 EDIT	 DELETE
4	288	144	None	 EDIT	 DELETE
5	144	144	None	 EDIT	 DELETE









Add New Node

- Properties *(click to expand)*

ID	E	v	A	I	ks		
1	29900	0.3	9.12	110	0.25	 EDIT	 DELETE

Add New Property

- Elements *(click to expand)*

ID	First Node	Second Node	Property		
1	Node #1	Node #2	Property #1	 EDIT	 DELETE
2	Node #3	Node #4	Property #1	 EDIT	 DELETE
3	Node #2	Node #5	Property #1	 EDIT	 DELETE
4	Node #5	Node #4	Property #1	 EDIT	 DELETE

Add New Element

Gambar 8. Tampilan input *nodes*, *properties*, dan *elements*

- Loads *(click to expand)*

- Joint Loads *(click to expand)*

ID	Target Node	Fx	Fy	M
----	-------------	----	----	---

Add New Joint Load

- Distributed Loads *(click to expand)*

ID	Target Element	Global WX	Global WY	Local WX	Local WY		
1	Element #3	0	-0.1	0	0	 EDIT	 DELETE
2	Element #4	0	-0.1	0	0	 EDIT	 DELETE

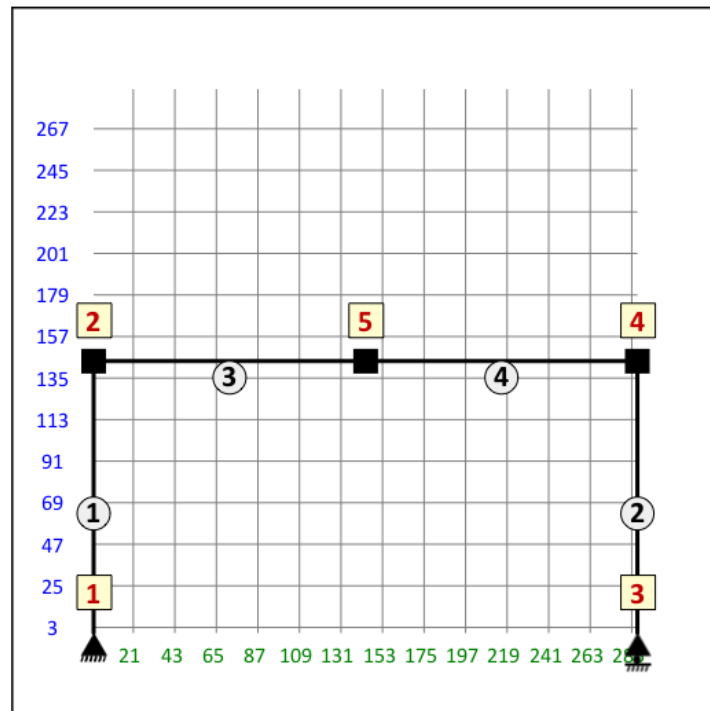
Add New Distributed Load

- Prescribed Displacements *(click to expand)*

ID	Target Node	dx	dy	Ø
----	-------------	----	----	---

Add New Prescribed Displacement

Gambar 9. Tampilan input *loads*



Gambar 10. Tampilan output *undeformed shape*

- Pre-Assembly Phase

- Element #1

k^A Matrix :

	1	2	3	4	5	6
1	1893.66667	0	0	-1893.66667	0	0
2	0	12.32319	887.26975	0	-12.32319	887.26975
3	0	887.26975	86723.69977	0	-887.26975	41043.14422
4	-1893.66667	0	0	1893.66667	0	0
5	0	-12.32319	-887.26975	0	12.32319	-887.26975
6	0	887.26975	41043.14422	0	-887.26975	86723.69977

Gambar 11. Tampilan output *pre-assembly phase*

Assembly K Matrix :

	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	12.32319	0	-887.26975	-12.32319	0	-887.26975	0	0	
2	0	1893.66667	0	0	-1893.66667	0	0	0	
3	-887.26975	0	86723.69977	887.26975	0	41043.14422	0	0	
4	-12.32319	0	887.26975	1905.98986	0	887.26975	0	0	
5	0	-1893.66667	0	0	1905.98986	887.26975	0	0	
6	-887.26975	0	41043.14422	887.26975	887.26975	173447.39954	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	12.32319	0	-88
8	0	0	0	0	0	0	0	1893.66667	
9	0	0	0	0	0	0	-887.26975	0	867
10	0	0	0	0	0	0	-12.32319	0	88
11	0	0	0	0	0	0	0	-1893.66667	
12	0	0	0	0	0	0	-887.26975	0	410
13	0	0	0	-1893.66667	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	-12.32319	-887.26975	0	0	
15	0	0	0	0	887.26975	41043.14422	0	0	

Gambar 12. Tampilan output *assembly phase*

F (unsolved)

d (unsolved)

F1x	=	F1x	d1x	=	0
F1y	=	F1y	d1y	=	0
M1	=	0	Ø1	=	Ø1
F2x	=	0	d2x	=	d2x
F2y	=	-7.2	d2y	=	d2y
M2	=	-172.8	Ø2	=	Ø2
F3x	=	0	d3x	=	d3x
F3y	=	F3y	d3y	=	0
M3	=	0	Ø3	=	Ø3
F4x	=	0	d4x	=	d4x
F4y	=	-7.2	d4y	=	d4y
M4	=	172.8	Ø4	=	Ø4
F5x	=	0	d5x	=	d5x
F5y	=	-14.4	d5y	=	d5y
M5	=	0	Ø5	=	Ø5

Gambar 13. Tampilan output *pre-solution phase*

Matrix Partition

$$K_{aa} \times da + K_{ap} \times dp = Fa$$

86723.69977	887.26975	0	41043.14422	0	0	0	0	0
887.26975	1905.98986	0	887.26975	0	0	0	0	0
0	0	1905.98986	887.26975	0	0	0	0	0
41043.14422	887.26975	887.26975	173447.39954	0	0	0	0	0
0	0	0	0	12.32319	-887.26975	-12.32319	0	-887.26
0	0	0	0	-887.26975	86723.69977	887.26975	0	41043.1
0	0	0	0	-12.32319	887.26975	1905.98986	0	887.26
0	0	0	0	0	0	0	1905.98986	-887.26
0	0	0	0	-887.26975	41043.14422	887.26975	-887.26975	173447.3
0	-1893.66667	0	0	0	0	-1893.66667	0	0
0	0	-12.32319	-887.26975	0	0	0	-12.32319	887.26
0	0	887.26975	41043.14422	0	0	0	-887.26975	41043.1

Gambar 14. Tampilan output *modification phase*

Solution Phase

F (solved)

F1x	=	0
F1y	=	14.4
M1	=	0
F2x	=	0
F2y	=	-7.2
M2	=	-172.8
F3x	=	0
F3y	=	14.4
M3	=	0
F4x	=	0
F4y	=	-7.2
M4	=	172.8
F5x	=	0
F5y	=	-14.4
M5	=	0

d (solved)



d1x	=	0
d1y	=	0
Ø1	=	-0.03026
d2x	=	4.35778
d2y	=	-0.0076
Ø2	=	-0.03026
d3x	=	8.71555
d3y	=	0
Ø3	=	0.03026
d4x	=	4.35778
d4y	=	-0.0076
Ø4	=	0.03026
d5x	=	4.35778
d5y	=	-2.77076
Ø5	=	0

Gambar 15. Tampilan output *solution phase*

- Post-Processing Phase

- Internal Forces (f)

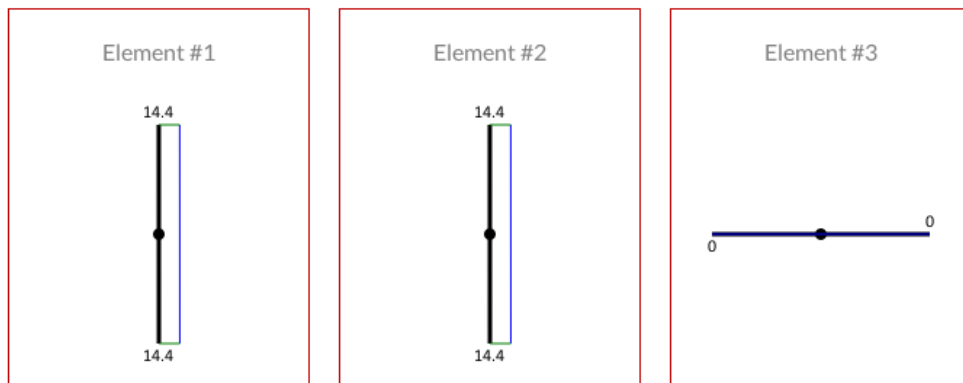
Element #1

	14.4	14.4	
	0	0	
	0	0	

Gambar 16. Tampilan output *post-processing phase*

- Axial Force Diagrams

Scale for Axial Force Diagrams [Set Scale](#)



+ Shear Force Diagrams

+ Bending Moment Diagrams

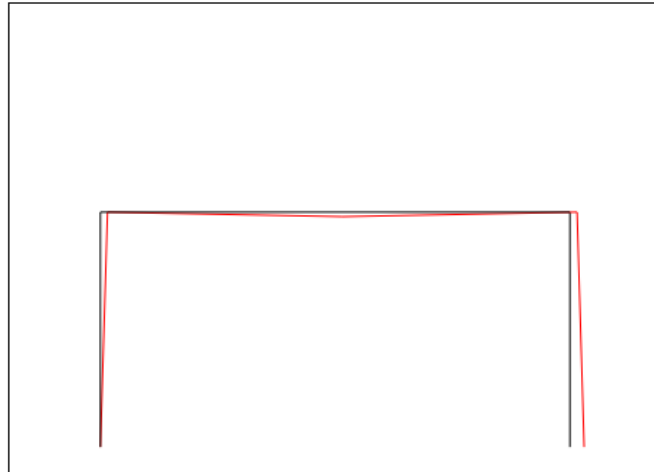
Gambar 17. Tampilan output *post-processing phase* (lanjutan)

• Deformed Shape

Scale for Deformed Shape

Set Scale

#	x	y	dx	dy	x'	y'
Node #1	0	0	0	0	0	0
Node #2	0	144	4.35778	-0.0076	4.35778	143.9924
Node #3	288	0	8.71555	0	296.71555	0
Node #4	288	144	4.35778	-0.0076	292.35778	143.9924
Node #5	144	144	4.35778	-2.77076	148.35778	141.22924



Gambar 18. Tampilan output *deformed shape*

3. Bending, Shear, and Axial Deformations (Source: SAP Verification Manual Problem 018, 2007)

PROBLEM DESCRIPTION:

A portal frame is subjected to a uniform vertical load. Frame is calculated in four different models.

Model A: bending, shear, and axial deformations

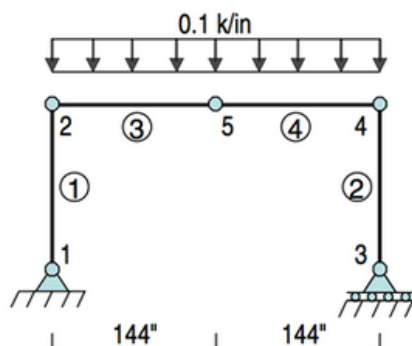
Model B: bending deformations only

Model C: shear deformations only

Model D: axial deformations only

For the model with bending deformations ignored, factor for $I = 10,000,000$. For the model with shear deformations ignored, $\phi = 0$ so the factor for $k_s = 1,000,000$. For the model with axial deformations ignored, factor $A = 100,000$.

PROPERTIES and LOADING:



Material Properties :

$$E = 29,900 \text{ k/in}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$G = 11,500 \text{ k/in}^2$$

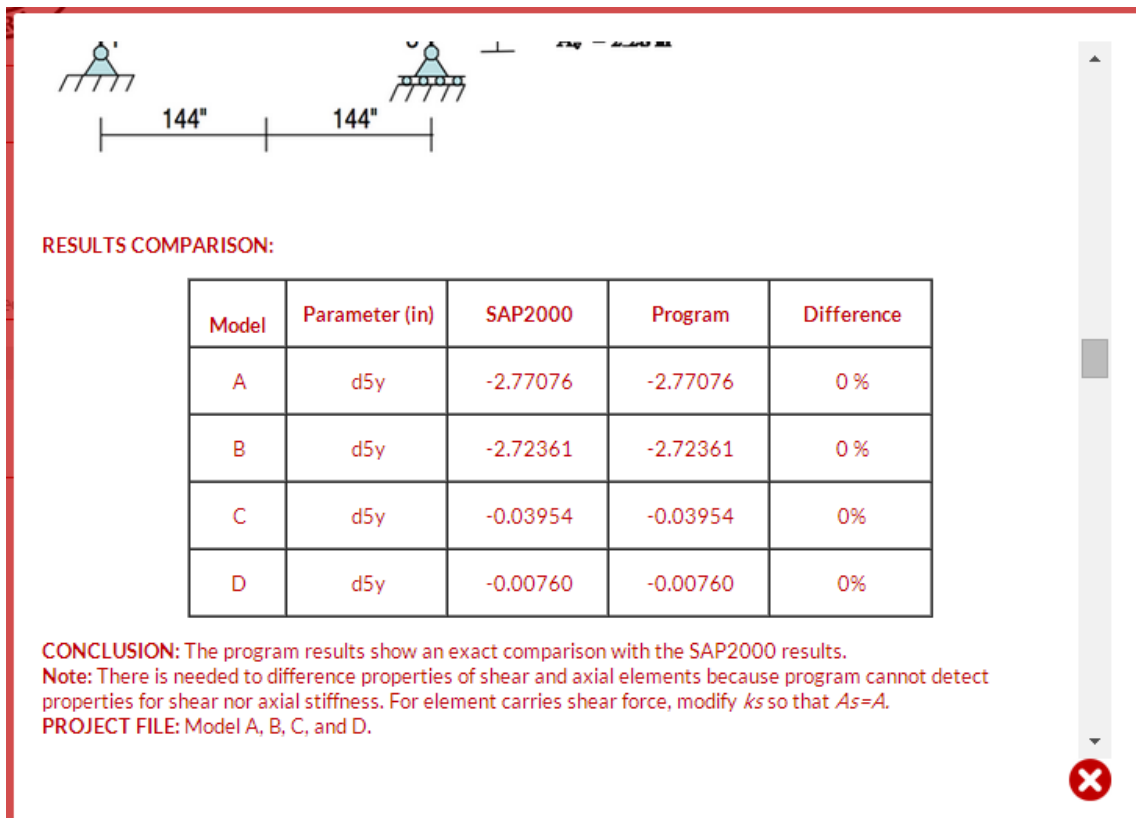
Section Properties :

$$A = 9.12 \text{ in}^2$$

$$I = 110 \text{ in}^4$$

$$A_w = 2.28 \text{ in}^2$$

Gambar 19. Tampilan layar verifikasi



Gambar 20. Tampilan layar verifikasi (lanjutan)

4.3. Evaluasi Penggunaan Program

Untuk menilai efektifitas program ta29.petra.ac.id dalam membantu mahasiswa dalam mempelajari metode kekakuan langsung dan secara umum metode elemen hingga, program ini telah diperkenalkan dalam kelas MK Metode Elemen Hingga (MK MEH) pada Semester Genap 203/2014 dan diujicobakan dalam ujian tengah semester mata kuliah tersebut (UTS MEH) pada April 2014 (lihat Lampiran). Saat kelas pertama setelah UTS MEH, mahasiswa diminta untuk mengisi angket (lihat Lampiran) untuk mengumpulkan informasi persepsi mereka mengenai efektifitas dari program ta29.petra.ac.id, fitur-fitur program, serta ketertarikan mereka akan program itu. Pertanyaan-pertanyaan dalam angket mencakup:

1. Secara keseluruhan, ta29.petra.ac.id berguna untuk pembelajaran saya tentang metode kekakuan langsung.
2. Website ta29.petra.ac.id adalah suplemen yang berguna untuk bahan dan sumber daya MK MEH.
3. Langkah-langkah perhitungan di ta29.petra.ac.id yang jelas dan akurat.
4. Informasi tentang bagaimana menggunakan ta29.petra.ac.id sangat membantu untuk belajar menggunakan [ta29](http://ta29.petra.ac.id) sendiri.
5. Saya mendapati bahwa menggunakan ta29.petra.ac.id mudah.

6. Saya mendapati bahwa ta29.petra.ac.id membuat MK MEH lebih menarik.
7. Saya ingin melihat alat seperti ta29.petra.ac.id dalam kuliah lain.
8. Website ta29.petra.ac.id dirancang dengan baik

Pilihan respons adalah skala Likert dari “Sangat tidak setuju” sampai dengan “Sangat setuju”. Responden survei berjumlah 15 orang, yakni seluruh peserta MK MEH Semester Genap 2013/2014.

Hasil survei disajikan dalam Tabel 1-8. Dari tabel-tabel ini didapati bahwa seluruh responden setuju ta29 berguna bagi pembelajaran metode kekakuan langsung (Tabel 1) dan hampir seluruhnya setuju bahwa itu adalah suplemen sumber belajar MEH yang berguna (Tabel 2). Hampir seluruh responden mendapati bahwa langkah-langkah perhitungan yang disajikan dalam ta29 jelas dan akurat (Tabel 3). Banyak responden menyatakan bahwa informasi yang disediakan dalam ta29 menolong pengguna untuk belajar sendiri menggunakan ta29, namun beberapa menyatakan netral atau tidak demikian (Tabel 4). Ini berarti informasi yang ada pada ta29 harus dikemas lebih baik. Hampir seluruhnya menyatakan bahwa ta29 mudah digunakan, namun ada yang menyatakan sebaliknya (Tabel 5). Ini berarti kemudahan penggunaan ta29 masih perlu ditingkatkan. Sebagian besar mendapati bahwa ta29 membuat MK FEM lebih menarik (Tabel 6) dan 2/3 responden menyatakan keinginan adanya program serupa pada mata kuliah lain (Tabel 7). Sebagian besar responden menilai ta29 telah dirancang dengan baik (Tabel 8).

Tabel 1. Respon terhadap pertanyaan pertama

Overall, ta29.petra.ac.id was useful to my learning for the direct stiffness method.

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	8	53%
Agree	7	47%
Neutral	0	0%
Disagree	0	0%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

Tabel 2. Respon terhadap pertanyaan kedua

The website ta29.petra.ac.id was a useful supplement to the other materials and resources for the FEM Course.

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	4	27%
Agree	9	60%
Neutral	2	13%
Disagree	0	0%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

Tabel 3. Respon terhadap pertanyaan ketiga

The computational steps in ta29.petra.ac.id were clear and accurate.

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	8	53%
Agree	6	40%
Neutral	1	7%
Disagree	0	0%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

Tabel 4. Respon terhadap pertanyaan keempat

The information about how to use ta29.petra.ac.id was helpful to learn using ta29 by myself.

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	2	13%
Agree	8	53%
Neutral	4	27%
Disagree	1	7%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

Tabel 5. Respon terhadap pertanyaan kelima

I found using ta29.petra.ac.id easy.

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	8	53%
Agree	5	33%
Neutral	1	7%
Disagree	1	7%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

Tabel 6. Respon terhadap pertanyaan keenam

I found ta29.petra.ac.id made the FEM Course more interesting.

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	3	20%
Agree	9	60%
Neutral	3	20%
Disagree	0	0%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

Tabel 7. Respon terhadap pertanyaan ketujuh

I would like to see tools like ta29.petra.ac.id in other course

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	7	47%
Agree	3	20%
Neutral	5	33%
Disagree	0	0%
Strongly disagree	0	0%

Tabel 8. Respon terhadap pertanyaan kedelapan

The website ta29.petra.ac.id was well designed

Answer options	Response	Response (%)
Strongly agree	3	20%
Agree	10	67%
Neutral	2	13%
Disagree	0	0%
Strongly disagree	0	0%
Total	15	100%

4.4. Pengembangan Program untuk Analisis Tegangan/Regangan Bidang

Saat ini program ta29 sedang dikembangkan lebih lanjut untuk pembelajaran analisis tegangan/regangan bidang dengan elemen-elemen CST dan Q4. Program perhitungan inti sudah selesai dikerjakan dan saat ini pengerjaan difokuskan pada perbaikan *interface* input, tampilan-tampilan grafis hasil perhitungan, dan personalisasi pengguna program. Hasil pekerjaan sementara ini dapat diakses di situs ta36.petra.ac.id.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dalam rangka menciptakan alat bantu pembelajaran metode elemen hingga (MEH), khususnya di kelas yang penulis bina, program perhitungan berbasis internet sedang dikembangkan. Program ini memiliki kemampuan untuk memperagakan langkah-langkah perhitungan metode elemen hingga untuk analisis statik linier struktur rangka dua dimensi dan benda tegangan/regangan bidang. Elemen yang digunakan dalam struktur rangka adalah elemen rangka dua dimensi yang memperhitungkan deformasi lentur, geser, dan aksial. Sedangkan untuk benda tegangan/regangan bidang, digunakan elemen CST dan Q4.

Pengembangan program dibagi menjadi dua tahap, yakni program untuk struktur rangka dan program untuk benda tegangan/regangan bidang. Saat ini pengerjaan program tahap pertama sudah selesai dan dapat diakses di situs ta29.petra.ac.id. Program ini telah diujicobakan dalam ujian tengah semester MK MEH Semester Genap 2013/2014 dan telah mendapatkan umpan balik dari mahasiswa peserta kuliah. Dari hasil umpan balik ini didapati bahwa secara keseluruhan program ini membantu dalam mempelajari MEH khususnya untuk memahami langkah-langkah perhitungan metode kekakuan langsung. Namun informasi yang ada pada situs ta29 perlu disajikan lebih baik dan cara penggunaannya perlu dibuat lebih mudah.

Pembuatan program untuk analisis benda tegangan/regangan bidang sudah mencakup perhitungan inti MEH. Saat ini sedang dikembangkan *input-output interface* yang lebih mudah digunakan. Dalam pengembangan ini umpan balik yang telah didapatkan dari pengguna program tahap pertama perlu diperhatikan, terutama informasi-informasi mengenai penggunaan program sehingga pengguna dapat belajar mandiri penggunaan program.

5.2. Saran

1. Program yang telah dikembangkan diintegrasikan dalam silabus pengajaran MK MEH sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal oleh peserta kuliah MEH.
2. Untuk program struktur rangka perlu dikembangkan lagi untuk mengakomodasi masalah tumpuan miring, tumpuan pegas, distribusi beban linier, serta fasilitas untuk *moment*, *shear*, *axial force release* dan *constraint*.
3. Program juga dapat dikembangkan lebih lanjut untuk mencakup analisis dinamik dan stabilitas struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus Overview - Dassault Systèmes. (n.d.). Retrieved October 01, 2013, from <http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/overview/>
- ADINA - Finite Element Analysis Software. (n.d.). Retrieved from <http://www.adina.com/index.shtml>
- ANSYS - Simulation Driven Product Development. (n.d.). Retrieved October 01, 2013, from <http://www.ansys.com/>
- Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice-Hall. Retrieved from <http://www.amazon.com/Finite-Element-Procedures-K-J-Bathe/dp/097900490X>
- Computers & Structures. (2007). SAP2000 Verification Manual. Berkeley: Computers and Structures, Inc.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th ed., pp. 534–535). John Wiley & Sons, Ltd.
- Felippa, C. A. (2013). Introduction To Finite Element Methods (ASEN 5007) Course Material. Retrieved October 01, 2013, from <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/>
- Hughes, T. J. R. (1987). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis* (p. 494). McGraw-Hill Higher Education. Retrieved from http://books.google.com/books/about/Fundamentals_of_Finite_Element_Analysis.html?id=QEDDjwEACAAJ&pgis=1
- Littlejohn, A., & Pegler, C. (2007). *Preparing for Blended e-Learning*. Oxon and New York: Routledge.
- Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method* (4th ed.). Toronto: Nelson.
- Open System for Earthquake Engineering Simulation - Home Page. (n.d.). Retrieved October 01, 2013, from <http://opensees.berkeley.edu/index.php>
- SeismoSoft - SeismoStruct. (n.d.). Retrieved October 01, 2013, from <http://www.seissoft.com/en/SeismoStruct.aspx>
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Topp, L. J. (1956). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*,

23(9), 805–823. Retrieved from
<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/8.3664?journalCode=jans>

Virgin, S., & Soekresno, F. (2013). *Pengembangan Website untuk Pembelajaran Analisis Struktur Rangka Dengan Metode Kekakuan Langsung*. Petra Christian University.

Weaver, W., & Johnston, P. R. (1984). *Finite Elements for Structural Analysis*. Prentice Hall PTR. Retrieved from <http://books.google.co.id/books?id=5BRiQgAACAAJ>

Welch, R. W., & Ressler, S. J. (2002). Opening the Black Box : The Direct Stiffness Method Uncovered. In *The 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*. Retrieved from <http://search.asee.org>

Welling, L., & Thomson, L. (2001). *PHP and MySQL Web Development*. Indianapolis: Sam Publishing. Retrieved from <http://www.amazon.com/PHP-MySQL-Development-Luke-Welling/dp/0672317842>

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method, Volume 1: The Basis* (Fifth Edit.). Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

Mid-sem Exam of the Finite Element Method**Department of Civil Engineering, UK Petra****Instructor : Wong Foek Tjong, Ph.D.****Day/Date : Friday, 11 April 2014****Time : 13.30-16.00 (150 minutes)****Exam type : Open Book****Part I (70)**

Consider a truncated-conical bar of the length L , with the diameter of the left end of D and the diameter of the truncation plane of $0.2D$ (see Figure 1). The left support of the bar is fixed while the right support is flexible with the spring constant k_s . The bar is made from homogeneous material with the modulus of elasticity E and coefficient of thermal expansion α . The bar is subjected to a uniform temperature change of T (in consistent unit). For the analysis purpose, the x coordinate is established with the point of origin, O , located at the left end.

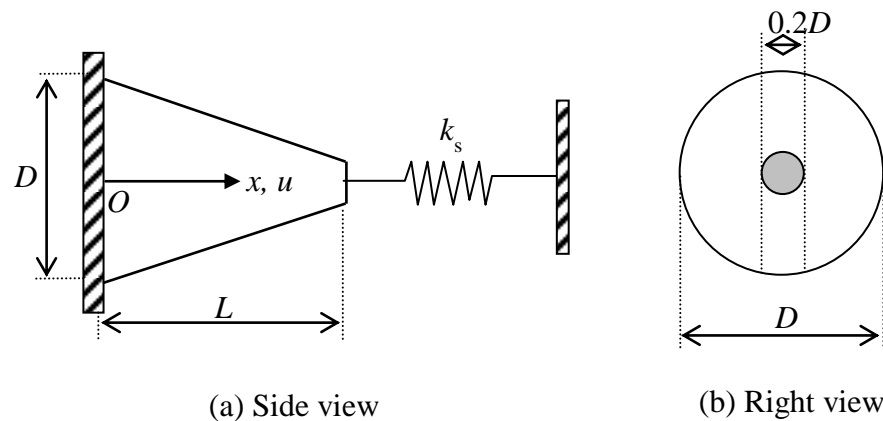


Figure 1. Fixed-flexible supported truncated-conical bar to temperature change T

1. Write the strong form governing equation and boundary conditions for the deformation of the bar (based on the linearized theory of elasticity). (5)
2. Write the formula for the diameter D as function of x , i.e. write the expressions for $D=f(x)$. Afterward, write the formula for the section area $A=A(x)$. (5) *Warning: $A(x)$ is not a linear function!*
3. Solve the governing equation to obtain the axial displacement field $u=u(x)$. (18)

Math note:

$$\int \frac{1}{(1-ax)^2} dx = \frac{1}{a} \frac{1}{1-ax} + C$$

4. Determine the strain and stress fields along the bar. (4)
5. Determine the support reactions. (4)

6. Compute the strain energy within the bar only (actually there is also strain energy in the spring but you do not have to consider it). **(10)**

For question numbers 7-9, let $L=100$ mm, $D=10$ mm, $E=200$ kN/mm², $\alpha=12\text{E-}6/^{\circ}\text{C}$, and $k_s=1$ kN/mm and $T=10^{\circ}\text{C}$.

7. Using analytical solutions obtained in question numbers 3, 4, and 6, determine the axial displacement of the bar at the right end, the stress within the bar at the left end, and the strain energy contained in the bar. **(4)**

8. Let the bar discretized using two bar elements of equal length with the area A for each element is represented by the average area along the element length, i.e.

$$A^1 = \frac{1}{0.5L} \int_0^{0.5L} A(x) dx \quad A^2 = \frac{1}{0.5L} \int_{0.5L}^L A(x) dx$$

where A^e is the area for element number e , $e=1, 2$, and $A(x)$ is the bar sectional area as obtained in question number 2. Determine the nodal displacements, the internal stress along the bar and the strain energy of the discretized bar. **(16)** (You do not have to follow the formal procedure of the direct stiffness method, in other words you may use ‘shortcut’ computation)

9. Compare the finite element results for the right end nodal displacement of the bar, the left end stress and the strain energy to the analytical solutions (question number 7). Give your comments regarding the finite element results. **(4)**

Take home test (due date 22 April 2014, upload through Edmodo)

Part II: Self-made problem (30)

Create (or select from a textbook, an exam problem, etc.) a plane frame structure with maximum degrees of freedom 15. Case 1: The frame is subjected to one or more concentrated force(s) or moment(s) and one or more distributed lateral forces. See “Verification” at ta29.petra.ac.id for examples. Case 2: The frame undergoes two nodal movements, that is a translation and a rotation. For each cases, find the nodal displacements and the internal forces:

1. Using any method that you learned in the structural analysis courses (e.g. the slope-deflection method, the cross method etc.) **(10)**
2. Using the direct stiffness method guided by ta29.petra.ac.id. Please write your name and the student ID number (NIM) in the project name and provide the project description as clear as possible. **(10)** *Ethical use of ta29.petra.ac.id:*
Since the site is accessible to anyone, you should not delete any existing project data.
3. Using SAP2000. **(5)**
4. Compare the results of questions numbers 1, 2, and 3 and give comments why are the results identical (or not identical) each other. **(5)**

“Finite element is fun. Indeed, it is more fun than fun”.

T. J.R. Hughes

LAMPIRAN 2:

Questionnaire about the Internet-based Computational Tool

<http://ta29.petra.ac.id>

Fill in with “√” on the appropriate column:

1= Strongly Disagree, 2= Disagree, 3= Neutral, 4=Agree, 5= Strongly Agree

No	Questions	1	2	3	4	5
1	Overall,ta29.petra.ac.id was useful to my learning for the direct stiffness method.					
2	The website ta29.petra.ac.id was a useful supplement to the other materials and resources for the FEM Course.					
3	The computational steps in ta29.petra.ac.id were clear and accurate.					
4	The information about how to use ta29.petra.ac.id was helpful to learn using ta29 by myself.					
5	I found using ta29.petra.ac.id easy.					
6	I found ta29.petra.ac.id made the FEM Course more interesting.					
7	I would like to see tools like ta29.petra.ac.id in other course					
8	The website ta29.petra.ac.id was well designed					

Comments regarding ta29.petra.ac.id:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

LAMPIRAN 3:

REKAPITULASI PENGGUNAAN DANA PENELITIAN

Judul : Pengembangan Program Perhitungan Berbasis Internet untuk Pembelajaran dan Penelitian Metode Elemen Hingga
 Nama Ketua : Wong Foek Tjong
 NIP : 00034
 Tahun Pelaksanaan: 2013/2014
 Dana : Rp 6.000.000,-

No	Akun	Keterangan	Jumlah
I	525111	Belanja honorarium	
		Sub jumlah I	Rp 0
II	525112	Belanja barang habis pakai	
		08-01-14 External harddisk seagate	Rp 992,162
		17-01-14 Cetak skripsi (yang merupakan bagian penelitian)	Rp 119,900
		30-05-14 Fotokopi dan jilid	Rp 4,600
		Sub jumlah II	Rp 1,116,662
III	525113	Belanja jasa	
		11-02-14 Honor pembuatan modul implementasi metode kekakuan langsung untuk struktur rangka 2D, modul web interface, dan modul penyelesaian persamaan linier simultan	Rp 2,100,000
		Sub jumlah III	Rp 2,100,000
IV	525114	Belanja perjalanan	
		Sub jumlah IV	Rp 0
		Jumlah	Rp 3,216,662

Mengetahui
 Ka. LPPM

Surabaya, 30 Mei 2014
 Ketua Peneliti

Dr. Juliana Anggono, S.T., M.Sc
 NIP: 94-016

Wong Foek Tjong
 NIP: 00-034