

OPTIMASI WAKTU SIKLUS PEMBUATAN KURSI DENGAN PROSES *INJECTION MOLDING*

Soejono Tjitro Gan Shu San, Henry Marwanto
Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra
stjitro@petra.ac.id

Abstrak

PT XYZ is a manufacturing company that produces plastics furniture, such as chairs. Up to now, the time needed by PT XYZ to perform the setting of injection molding machines' process-parameters is quite long, in order to reach chairs' weight of $0,875 \pm 0.015$ kg. PT XYZ is still considering the cycle time for producing chairs is not optimal. The objective of this paper is to determine the optimal setting to get shorter cycle time.

The first steps taken were exploration and observation in the production floor to find the process parameters that influence the cycle time. The results of these exploration and observation were holding time, injection time and cooling time. The next step was designing the experimental scheme for the optimization that has used factorial design of 3 levels with 3 replications.

The results of this research showed that holding time, injection time and cooling time are factors that significantly influence cycle time. The optimal cycle time is 54.177 seconds with setting value for holding time as 3 seconds, injection time 17 seconds and cooling time 37 seconds.

Keywords: *optimization, injection molding, factorial design.*

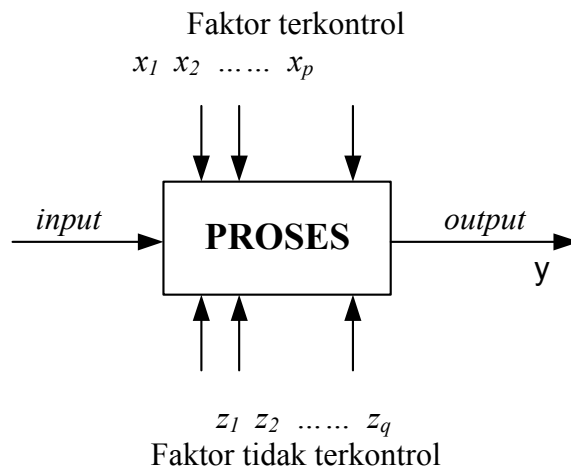
PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi mesin *injection molding* yang semakin pesat berimbas terhadap pemakaian material plastik untuk produk-produk manufaktur semakin luas. PT. XYZ adalah perusahaan manufaktur yang bergerak didalam pembuatan produk furnitur berbahan baku plastik. Hasil produk PT. XYZ antara lain adalah kursi plastik. Selama ini, PT. XYZ beranggapan bahwa waktu siklus untuk pembuatan kursi plastik masih belum optimal dan porsi waktu yang dibutuhkan untuk melakukan setup parameter proses mesin *injection molding* cukup banyak Untuk itu, perlu dilakukan studi untuk menentukan parameter proses mesin injection yang mana saja berpengaruh terhadap waktu siklus namun kualitas produk kursi tetap. Makalah ini akan membahas untuk menentukan parameter proses yang berpengaruh terhadap waktu siklus serta mendapatkan waktu siklus yang optimal.

TINJAUAN PUSTAKA

Desain Eksperimen

Pada umumnya eksperimen digunakan untuk mempelajari kinerja dari proses atau sistem yang biasanya divisualisasikan seperti kombinasi mesin, metode, orang dan bahan baku yang mempengaruhi proses perubahan input menjadi output, seperti yang ditunjukkan gambar 1. Desain eksperimen statistik adalah proses perancangan eksperimen untuk mengumpulkan data yang tepat sehingga dapat dianalisa dengan menggunakan metode statistik, sehingga kesimpulan yang diperoleh bersifat obyektif dan valid.



Gambar 1 Model Umum Suatu Proses atau Sistem (Montgomery, 1997)

Desain Faktorial Tiga Level (3^k)

Desain faktorial tiga level adalah suatu rancangan faktorial yang terdiri dari k faktor, dimana setiap faktor dibatasi oleh tiga level, yaitu: level rendah, level menengah dan level tinggi. Desain faktorial ini juga disebut desain faktorial 3^k dengan jumlah percobaan sebanyak 3^k . Penggunaan rancangan desain faktorial 3^k ini biasanya untuk menyelesaikan masalah optimasi (Montgomery, 1997). Notasi-notasi yang digunakan dalam desain faktorial ini adalah:

- Level rendah dinotasikan dengan -1 atau $(-)$ atau 0 .
- Level menengah dinotasikan dengan 0 atau 1 .
- Level tinggi dinotasikan dengan $+1$ atau $(+)$ atau 2 .

Pengujian statistik untuk menganalisa desain faktorial 3^k ini dilakukan dengan menggunakan *anova* dan analisa berikut:

- a. Analisa residual desain faktorial 3^k .
- b. Pembentukan model dasar desain faktorial 3^k .
- c. Pengujian statistik desain faktorial 3^k .
- d. Perbaikan model dasar desain faktorial 3^k .
- e. Penentuan kondisi optimum eksperimen.

Analisa Variansi (Anova) Desain Faktorial 3^k

Pada desain faktorial 3^k terdapat tiga faktor yaitu faktor A, B dan C. Faktor A mempunyai jumlah level a , faktor B mempunyai jumlah level b , faktor C mempunyai jumlah level c dan jumlah replikasi yang harus dilakukan sebanyak n kali. Jadi jumlah observasi yang harus dilakukan sebanyak: $N = a \cdot b \cdot c \cdot n$

Response Surface Methodology (RSM)

Response Surface Methodology (RSM) merupakan suatu metode gabungan antara teknik matematika dan teknik statistik yang digunakan untuk membuat model dan menganalisa suatu respon y yang dipengaruhi oleh beberapa variabel bebas atau faktor x untuk mengoptimalkan respon tersebut. Hubungan antara respon y dan variabel bebas x adalah sebagai berikut:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \quad (1) \quad (\text{Montgomery, 1997})$$

dimana y = variabel respon, x_i = variabel bebas / faktor ($i = 1, 2, \dots, k$), ϵ = error

Langkah pertama dari RSM adalah menemukan hubungan antar respon y dan faktor x melalui persamaan polinomial orde pertama dan digunakan model regresi linier atau yang lebih dikenal dengan *first orde model* (model orde I).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j=2}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2) \quad (\text{Montgomery, 1997})$$

dimana β = koefisien regresi

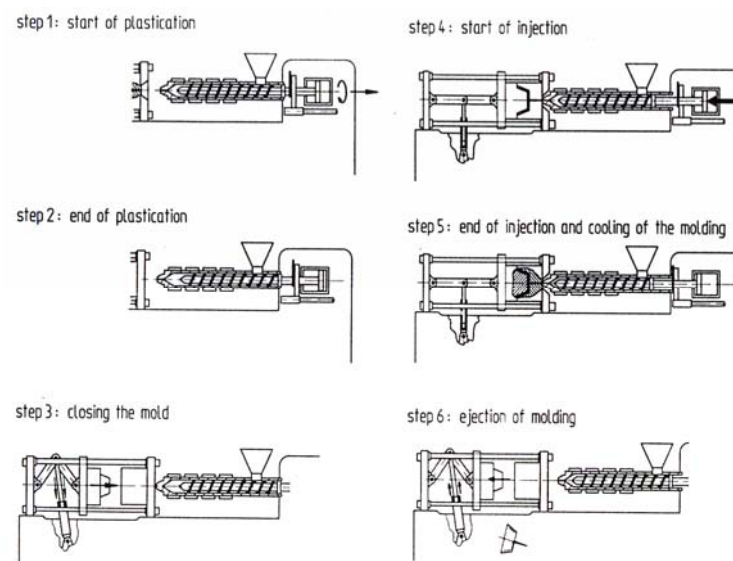
Rancangan eksperimen orde I dilanjutkan dengan tahap penyaringan faktor dari pengujian *anova* dapat diketahui faktor-faktor yang signifikan. Sedangkan untuk model orde II digunakan model polinomial orde kedua yang fungsinya kuadratik.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3) \quad (\text{Montgomery, 1997})$$

Rancangan eksperimen orde II yang digunakan adalah rancangan desain faktorial 3^k yang sesuai untuk menyelesaikan masalah optimasi.

Mekanisme Mesin *Injection Moulding*

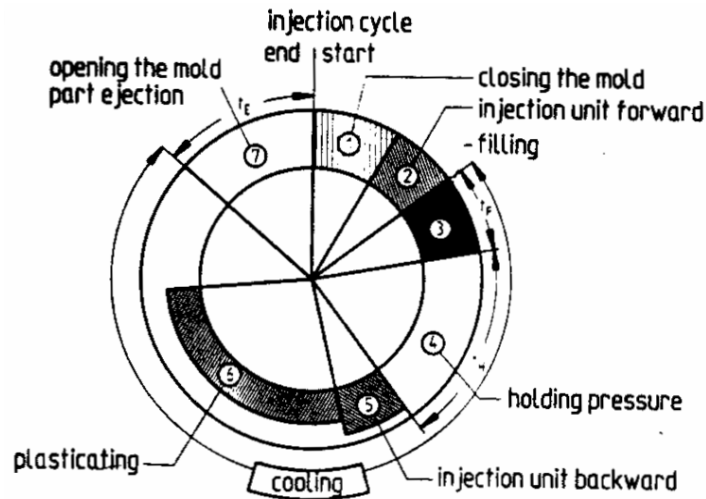
Mekanisme proses *injection molding* diawali dengan bahan baku yang ada di *hopper* turun untuk memasuki rongga ulir pada *screw*. *Screw* akan bergerak untuk membawa butiran plastik menuju *barrel* untuk melelehkan butiran plastik. Langkah berikutnya, cetakan ditutup dan *screw* didorong maju oleh piston untuk mendorong lelehan plastik dari *screw chamber* melalui *nozzle* masuk ke dalam cetakan. Lelehan plastik yang telah diinjeksi mengalami pengerasan karena energi panasnya diserap oleh dinding cetakan yang berpendingin air. Setelah proses pendinginan dan kekakuan produk cukup maka *screw* bergerak mundur untuk melakukan pengisian *barrel*. Pada saat itu, clamping unit akan bergerak untuk membuka cetakan. Produk dikeluarkan dengan *ejector*. Setelah itu, cetakan siap untuk diinjeksi kembali. Gambar 2 memperlihatkan mekanisme *injection molding*.



Gambar 2 Mesin *Injection Molding* (Pötsch, 1995)

Waktu Siklus

Waktu siklus adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu mesin untuk membuat suatu produk. Satu waktu siklus *injection molding*, diawali dengan *closing the mold*, kemudian diikuti dengan phasa *injection process*, *cooling time*, *holding pressure time*, *screw forward*, *opening the mold*, *ejection* dan diakhiri dengan phasa *closing the mold*, seperti yang diperlihatkan gambar 3. Waktu siklus dalam penelitian ini dihitung mulai dari penutupan *mold* sampai dengan pembukaan *mold*.



Gambar 3 Waktu Siklus pada Mesin Injection *Molding* (Pötsch, 1995)

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan Baku dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah poly propylene H110HO dengan komposisi 75% bijih plastik murni, 15% pellet plastik avalan dan 10% caltex. Komposisi bahan ini dipilih dengan pertimbangan bahwa komposisi ini yang sering digunakan oleh PT. XYZ.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini: mesin *injection molding* tipe Kawaguchi KM 550C dan *stop watch*. Neraca analitis digunakan untuk menimbang produk kursi plastik.

Prosedur Percobaan

Pada awalnya dilakukan survey di lapangan untuk mendapatkan parameter-parameter proses *injection molding* (Hidajat, 2005). *Parameter-parameter* kemudian diplotkan ke dalam diagram tulang ikan. Diagram tulang ikan akan menunjukkan semua faktor terkontrol yang dicurigai memberikan efek yang signifikan terhadap proses produksi dan juga menunjukkan faktor-faktor yang tidak terkontrol. Faktor yang berpengaruh terhadap waktu siklus pembuatan kursi plastik seperti yang ditunjukkan gambar 4 adalah *holding time*, *injection time* dan *cooling time* (Hidajat, 2005).

Kemudian ketiga faktor di atas ditentukan level-level-nya. Nilai level tengah atau nilai awal adalah nilai setting parameter proses yang sering dipakai oleh PT. XYZ. Peneliti mencoba mengubah-ubah nilai *setting* ketiga faktor di atas sampai sejauh mana kursi yang diproduksi dianggap tidak memenuhi kriteria yang ditentukan PT. XYZ. Sehingga nilai level atas dan nilai level bawah yang ditentukan dalam penelitian ini masih berada dalam

range pembuatan kursi yang beratnya sekitar $0,875 \pm 0.015$ kg. Tabel 1 menunjukkan pengkodean faktor parameter proses dan level dari masing-masing faktor.



Gambar 4 Tipe Kursi Plastik yang Dikaji

Tabel 1. Pengkodean dan Level Faktor parameter proses (satuan: detik)

Faktor	Level		
	0	1	2
Holding Time (A)	3	3.5	4
Injection Time (B)	15	17	19
Cooling Time (C)	37	39	41

Rancangan desain faktorial 3 level dengan 3 faktor dilakukan 3 replikasi, sehingga kombinasi yang dilakukan atas level dan faktor sebanyak 27 kombinasi. Total keseluruhan percobaan adalah $27 \times 3 = 81$ percobaan. Pengurutan pengambilan data secara randomisasi dengan program Minitab *Standard Order* dan *Run Order*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 memperlihatkan bahwa *holding time*, *inject time* dan *cooling time* berpengaruh signifikan terhadap waktu siklus. Hal ini dibuktikan pada uji anova pada tabel 3, dimana nilai F_o dari masing-masing faktor (A,B, dan C) lebih besar dibanding F_{tabel} . Hasil analisa variansi (anova penelitian ini kurang sesuai dengan hasil anova penelitian Santoso (2004), dimana faktor yang berpengaruh terhadap waktu siklus pembuatan ember adalah *screw speed*, *cooling time* dan *inject pressure*. Karena *screening* parameter proses yang diduga berpengaruh terhadap waktu siklus pembuatan ember terbatas. Faktor *holding time* tidak dipilih karena pemilik pabrik tidak mengizinkan untuk melakukan modifikasi *setting* faktor tersebut (Santoso, 2004). Sedangkan *inject time* tidak dipilih karena kontrol panel *inject time* tidak ada pada mesin yang digunakan dalam penelitian tersebut dan sudah terwakili dengan kontrol panel *inject pressure*.

Namun, hasil penelitian Santoso (2004) menunjukkan bahwa faktor *screw speed* memberikan efek yang sangat kecil dibandingkan *cooling time* dan *inject pressure* berdasarkan analisa *main effect plot*. Hal ini berarti level-level *screw speed* tidak mempengaruhi waktu siklus. Meskipun *screw speed* berhubungan dengan *inject pressure* yang berfungsi mempercepat pergerakan *screw* untuk injeksi, namun peningkatan kecepatan *screw* tidak memberikan dampak terhadap waktu siklus.

Tabel 2 Waktu Siklus Pembuatan Kursi Plastik

Holding Time (detik)	Inject Time (detik)								
	15			17			19		
	Cooling Time (detik)			Cooling Time (detik)			Cooling Time (detik)		
	37	39	41	37	39	41	37	39	41
3	54.33	56.50	58.64	54.42	56.61	58.42	54.42	56.37	58.84
	54.37	56.68	58.37	54.32	56.34	58.53	54.47	56.57	58.59
	54.30	56.76	58.55	54.50	56.29	58.63	54.68	56.45	58.43
3.5	55.25	56.90	58.93	55.17	57.22	58.81	55.16	56.90	59.02
	54.90	56.93	58.91	54.90	57.04	58.94	54.91	57.11	58.95
	55.09	57.11	58.92	55.06	56.93	58.81	55.09	56.96	58.98
4	55.61	57.46	59.83	55.57	57.36	59.45	55.50	57.28	59.62
	55.24	57.70	59.70	55.28	57.56	59.47	55.53	57.59	59.65
	55.32	57.52	59.87	55.20	56.20	59.54	55.51	57.44	59.59

Tabel 3. Analisa Variansi (Anova) dari Data Eksperimen

Faktor	Degree of Freedom (DOF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F _o	F _{tabel}
A	2	13.7110	6.8555	424.02	3.17
B	2	0.1069	0.0535	3.31	3.17
C	2	223.6279	111.8139	6915.80	3.17
AB	4	0.0790	0.0197	1.22	2.55
AC	4	0.3468	0.0867	5.36	2.55
BC	4	0.1038	0.0260	1.61	2.55
ABC	8	0.1600	0.0200	1.24	2.12
Error	54	0.8731	0.0162		
Total	80	239.0085			

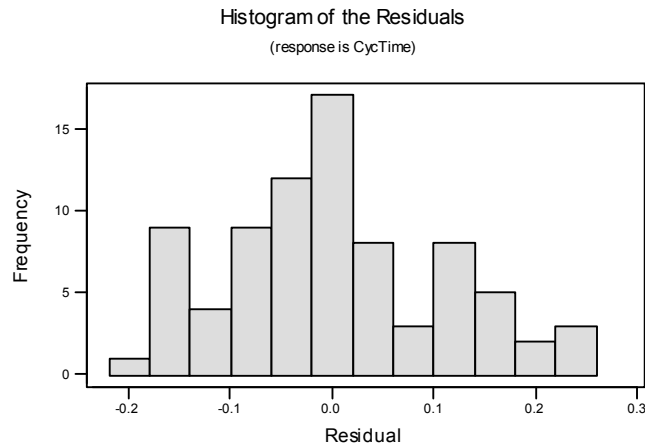
Berdasarkan tabel diatas, dapat dihitung koefisien determinasi (R^2) sebagai berikut:

$$R^2 = \frac{\sum SS_A + SS_B = \dots + SS_{ABC}}{\sum SS} \quad (\text{Montgomery, 1997})$$

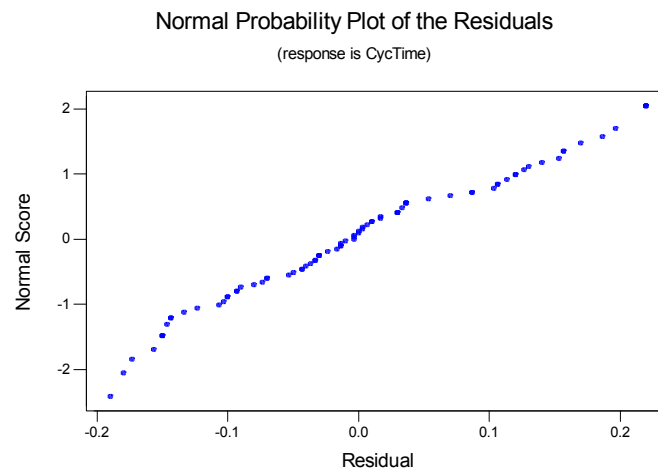
$$R^2 = \frac{238.1354}{239.0085}$$

$$R^2 = 0.996$$

Sehingga koefisien determinasi (R^2) didapatkan sebesar 0,996, hal ini menunjukkan bahwa 99,6 % dari variabilitas waktu untuk pembuatan kursi disebabkan oleh faktor-faktor yang dipilih yaitu *holding time*, *injecion time*, dan *cooling time*. Dari peninjauan hasil plot histogram residual yang ditunjukkan oleh gambar 5 menunjukkan bahwa data-data tersebut sudah terdistribusi normal. Selain itu, grafik *normal probability plot of residuals* pada gambar 6 mendekati regresi linier ke arah kanan atas. Nilai residual memiliki nilai yang merata dari yang terkecil hingga yang terbesar bersamaan dengan makin besarnya nilai residual. Hal ini berarti *model* sudah terdistribusi normal.



Gambar 5 Histogram dari Residual



Gambar 6 Normal Probability Plot of Residuals

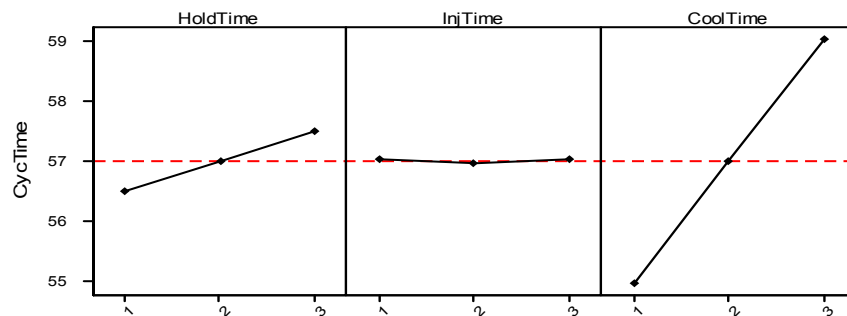
Faktor *cooling time* memberikan pengaruh yang paling besar terhadap waktu siklus. Hal ini ditunjukkan nilai slope (kemiringan) garis *cooling time* pada main effect plot (Gambar 7) paling besar dibandingkan *holding time* maupun *injection time*. Pada fase *cooling time*, lelehan plastik yang ada di cetakan akan mengalami perubahan fase dari viscous liquid menjadi fase rubbery (Brydson, 1975). Bersamaan dengan pendinginan cetakan (*cooling time*) maka fase *rubbery* secara bertahap akan membentuk inti-inti kristal yang akan bergerak serentak dengan penyebaran lelehan plastik di cetakan. Inti-inti kristal tersebar dalam bentuk *lamellar* sebagai molekul polimer kemudian tumbuh menjadi *spherulite*, yaitu pertumbuhan struktur kristal (Brydson, 1975). Dengan terjadi pertumbuhan kristal, maka plastik akan membentuk *flexible crystalline polymer* hingga mencapai fase *glass-like* yaitu dimana plastik sudah mencapai *freezing-point*.

Cooling time berpengaruh terhadap kecepatan pertumbuhan *crystalline*. Waktu pendinginan cepat akan membuat pertumbuhan struktur kristal menjadi lebih besar karena temperatur cetakan masih berada dalam range temperatur fase *glass transition*. Hal ini akan berpengaruh terhadap sifat elastisitas kursi.

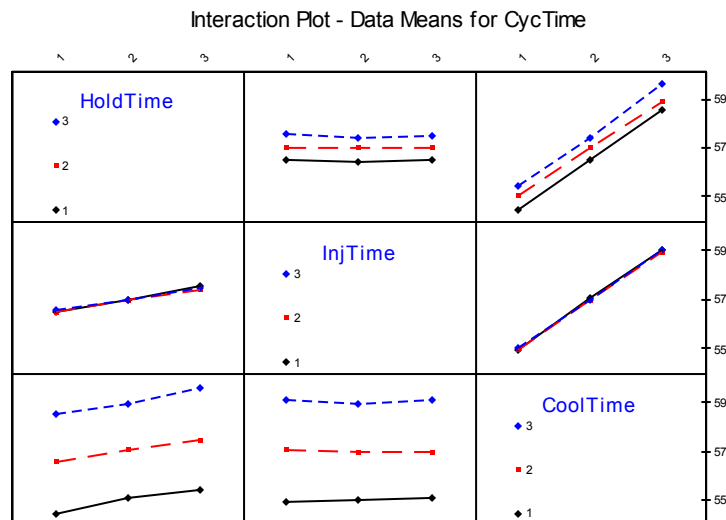
Temperatur cetakan yang terlalu dingin akan membuat struktur polimer akan saling mengikat hingga terjadi *frozen plastic*. Hal ini akan membuat kursi akan mengalami *deforming stresses* dan kursi akan bersifat getas. Untuk menghindari terjadinya *deforming stresses* maka temperatur cetakan diusahakan berada dalam range temperatur *glass transition* (Brydson, 1975).

Gambar 8 memperlihatkan plot interaksi antar faktor dan terlihat bahwa faktor-faktor yang dipilih memiliki interaksi satu dengan yang lainnya sehingga memungkinkan untuk menghasilkan waktu siklus yang lebih cepat, khususnya interaksi antara faktor *holding time* dan faktor *cooling time*. Dari gambar 8 dapat dilihat interaksi antar faktor, faktor *inject time* tidak begitu mempengaruhi waktu siklus, dimana terlihat saat perlakuan faktor *cooling time* dan *inject time* diberikan secara simultan ternyata grafik waktu siklus berimpitan. Demikian pula saat perlakuan faktor *holding time* dan *inject time* diberikan secara simultan. Sedangkan saat faktor *holding time* berinteraksi faktor *cooling time* atau sebaliknya terlihat bahwa ada perubahan pada waktu siklus dan grafik tidak berhimpitan satu sama lain. Sedangkan untuk beberapa interaksi, yaitu interaksi antara *holding time* (A) dengan *holding time* (A), *cooling time* (C) dengan *cooling time* (C), ditemukan bahwa interaksi yang terjadi tidak signifikan, terbukti dari kecilnya perubahan waktu siklus akibat pengaruh dua faktor secara simultan.

Main Effects Plot - Data Means for CycTime



Gambar 7 Main Effects Plot



Gambar 8 Interaksi Antar Faktor

Untuk mendapatkan model yang optimal maka model dikoreksi dengan mengeluarkan interaksi-interaksi yang tidak signifikan dan dilakukan pengolahan data kembali. Dari hasil regresi ulang ini terlihat bahwa respon menghasilkan model *curvature* sehingga *response surface* yang digunakan adalah model orde 2. Model optimasi yang didapatkan yaitu :

$$y = 52,1804 + 0,5039 A - 0,3096 B + 2,0350 C + 0,0770 A^2 + \varepsilon$$

dimana :

y : respon berupa waktu siklus dari pembuatan (detik)

A : faktor *holding time* dengan nilai level dari 1 (3 detik) sampai 3 (4 detik)

B : faktor *injection time* dengan nilai level dari 1 (15 detik) sampai 3 (19 detik)

C : faktor *cooling time* dengan nilai level dari 1 (37 detik) sampai 3 (41 detik)

Berdasarkan model optimasi diatas maka waktu siklus yang optimal adalah 54,177 detik dengan nilai setting *holding time* 3 detik, *injection time* 17 detik dan *cooling time* 37 detik.

KESIMPULAN

Parameter proses *injection molding* yang berpengaruh signifikan terhadap waktu siklus pembuatan kursi plastic adalah *holding time*, *injection time* dan *cooling time*. 99,6 % dari variansi waktu siklus dipengaruhi oleh ketiga faktor tersebut diatas Model optimasi waktu siklus yang dihasilkan adalah model *curvature*. Waktu siklus optimal adalah 54,177 detik dengan setting *holding time* 3 detik, *injection time* 17 detik dan *cooling time* 37 detik.

DAFTAR PUSTAKA

Brydson, J. A. , 1975, *Plastic Materials*, 3rd edition, Newnes – Butterworth, London.

Dominick, V. Rosato., Donald, V. Rosato., Marlene, G. Rosato, 2000, *Injection Molding Handbook*, 3rd edition, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.

Hidajat, Isaac, 2006, ***Tugas Akhir: Studi Penentuan Parameter Proses Injection Molding***, Universitas Kristen Petra, Surabaya

Montgomery, Douglas. C., 1997, ***Design and Analysis Experiment, 4th edition***, John Wiley And Sons, New York

Montgomery, Douglas. C., 1997,. ***Introduction to Statistical Quality Control , 3th edition***, John Wiley and Sons, New York

Pötsch, G., Michaeli, W., 1995, ***Injection Molding : An Introduction***, Hanser, Munich

Santoso, Daniel A.P., 2004, ***Tugas Akhir: Optimasi Waktu Siklus Pembuatan Ember 4 Galon dengan Mesin Injection Molding***, Universitas Kristen Petra, Surabaya.