

Optimalisasi Parameter Proses Cetak Injeksi Plastik dengan Metode Simulasi untuk Menurunkan Cacat Defleksi

Agung Kaswadi^{1,a*}, Gita Suryani Lubis^{2,b} dan Sigit Yoewono^{3,c}

¹ Politeknik Manufaktur Astra

Jl. Gaya Motor Raya No 8, Jakarta, Indonesia 14330

^{2,3} Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara-ITB,

Jl. Ganesha 10, Bandung, Indonesia 40132

^aagung.kaswadi@polman.astra.ac.id, ^bgitaalubis@yahoo.com, ^csigit@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Siklus fabrikasi produk plastik dengan proses cetak injeksi terdiri dari tiga fase utama. Fase pertama diperlukan untuk mengisi rongga cetakan dengan polimer cair (*injection step*), menambahkan bahan polimer cair sampai berat yang diinginkan (*packing step*), menurunkan suhu polimer pada temperatur ejeksi (*cooling phase*). Semua langkah-langkah tersebut sangat berkaitan sekali dan juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti karakteristik material, kondisi mesin cetak injeksi, desain cetakan, parameter proses, pengaruh kualitas akhir produk dalam hal penampilan produk dan kekuatan. Pada makalah ini akan dibahas tentang optimalisasi parameter proses cetak injeksi plastik menggunakan metode simulasi. Metode simulasi digunakan untuk meminimalisasi terjadinya cacat produk hasil cetakan, sebelum dilakukan proses cetak injeksi plastik langsung di mesin.

Studi kasus dilakukan pada produk *bracket number* yang terbuat dari material polimer PP AP03B produksi ExxonMobil. Produk ini merupakan komponen otomotif yang umumnya terbuat dari material baja. Parameter proses cetak injeksi seperti *melt temperature*, *injection pressure*, *packing pressure* dan *packing time* dioptimalisasi menggunakan metode DOE dari Taguchi dan ANOVA untuk mendapatkan cacat defleksi (*warpage*) produk yang kecil. Simulasi proses cetak injeksi plastik menggunakan perangkat lunak Autodesk Moldflow. Hasil penelitian dengan simulasi ini menunjukkan bahwa *injection pressure* sebesar 20 MPa dan *melt temperature* sebesar 220°C memberikan hasil defleksi yang kecil sebesar 1.34 mm. Selain itu *injection pressure* juga merupakan faktor yang paling berpengaruh pada besarnya defleksi (*warpage*) dibanding parameter-parameter yang lain.

Kata kunci: *injection plastic, optimization, process parameters, warpage, Moldflow, Taguchi method*

Pendahuluan

Kecenderungan produk plastik sekarang ini adalah ringan, kuat dan berharga murah, oleh karena itu untuk mencapai produk plastik yang murah salah satu faktor terpenting pada saat proses cetak injeksi adalah waktu siklus proses [1]. Dengan mempercepat waktu siklus proses maka dapat mengurangi biaya produksi yang cukup besar, namun mempersingkat waktu proses juga berisiko menghasilkan produk gagal, hal ini dikarenakan produk sudah dikeluarkan dari cetakan (*mold*) sedangkan suhu produk masih panas. Dengan demikian mengoptimalkan parameter-

parameter proses cetak injeksi untuk menghasilkan produk berkualitas dan waktu yang cepat merupakan tantangan tersendiri. Permasalahan ini dikarenakan banyak faktor atau parameter yang dapat mempengaruhi fase-fase dalam proses cetak injeksi itu sendiri, selain dari faktor desain dan faktor bahan baku plastik.

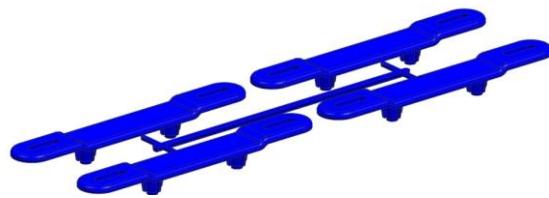
Kegiatan optimalisasi parameter proses cetak injeksi plastik secara rutin telah dilakukan dalam industri manufaktur, terutama dalam pengaturan parameter-parameter proses yang optimal dan juga hasil produk yang optimal [2]. Beberapa penelitian yang berkaitan dengan optimalisasi parameter

proses injeksi dan produk hasil cetak injeksi seperti defleksi/melenting (*warpage*) dan penyusutan (*shrinkage*) sudah dilakukan dengan metode numerik maupun eksperimental. Penelitian-penelitian tersebut didasarkan pada berbagai pendekatan, antara lain Metode Taguchi, Jaringan Syaraf Tiruan (*Artificial Neural Network-ANN*), *Fuzzy logic*, Penalaran Berbasis Kasus (*Case Based Reasoning-CBR*), Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm-GA*), *Finite Element Method* (FEM), *Non Linear Modeling*, Metodologi Respon Permukaan (*Respon Surface Methodology-RSM*), *Linear Regression Analysis* dan beberapa metode statistik maupun stokastik lainnya.

Metode Taguchi *Orthogonal Array* dan *Response Surface* adalah dua pendekatan utama DOE yang diterapkan dalam analisis cetak injeksi plastik [3][4]. Metode Taguchi digunakan untuk mengoptimalkan parameter desain dengan meminimalkan variasi sebelum proses pengoptimalan desain, untuk mencapai target nilai rata-rata dari parameter hasil. Metode ini secara ekstensif digunakan untuk mengidentifikasi faktor utama yang mempengaruhi *warpage* dan *shrinkage* pada pelat datar [5][6], kotak dengan bentuk tertentu dan komponen-komponen riil [7]. Salah satu hasil utama yang dilaporkan dari studi tersebut adalah identifikasi *packing pressure* sebagai faktor paling penting yang mempengaruhi bagian kualitas. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penyusutan kristal polimer terutama tergantung oleh *packing pressure*, sedangkan *melting temperature* dan temperatur cetakan menjadi lebih penting dalam penyusutan polimer amorfous [8].

Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini akan digunakan pendekatan simulasi dalam penentuan parameter-parameter proses cetak injeksi plastik untuk mendapatkan kualitas yang baik dari segi defleksi yang minimum.



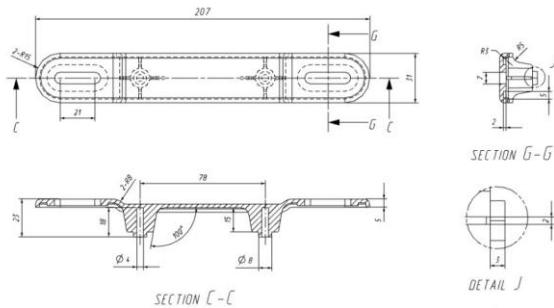
Gambar 1. Model 3D produk dengan 4 cavity

Tabel 1. Data produk dan material

<i>Code</i>	AP03B
<i>Manufacturer</i>	<i>ExxonMobil</i>
<i>Material Structure</i>	<i>Crystalline</i>
<i>Melt Temperature</i>	200-220 °C
<i>Max. Shear Stress</i>	0.25 MPa
<i>Melt Density</i>	0.9 g/cm³
<i>Shrinkage Factor</i>	0.5%
<i>Total Part Weight</i>	76.13 g

Studi kasus pada penelitian ini diterapkan pada produk *bracket number* yang terbuat dari material polimer jenis PP AP03B produksi ExxonMobil. Material termoplastik PP jenis ini mempunyai laju alir pada saat cair yang baik sebesar 30 g/10 min, sehingga mampu dicetak pada temperatur leleh yang rendah. Data-data material plastik ditunjukkan pada Tabel 1. Produk *bracket number* merupakan komponen sepeda motor yang berfungsi sebagai tempat dudukan pelat nomor polisi yang sebelumnya terbuat dari material pelat baja. Penggunaan plastik akan menekan harga, akan tetapi kualitas dan kekuatan harus memenuhi persyaratan.

Pemodelan 3D produk menggunakan NX 8, dimana produk ini dibuat dengan menggunakan empat rongga cetak (*cavity*) dalam satu cetakan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dimensi dan ukuran produk terlihat pada Gambar 2, dan dari gambar tersebut bisa dilihat bentuk yang tipis dan panjang mempunyai potensi terjadinya defleksi (*warpage*) produk cukup besar. Pada penelitian ini, sistem pendingin sengaja tidak digunakan, karena hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu menentukan sistem saluran pendingin yang akan diterapkan.

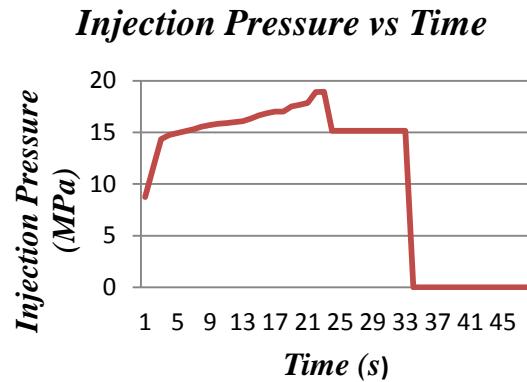


Gambar 2. Dimensi produk *bracket number*

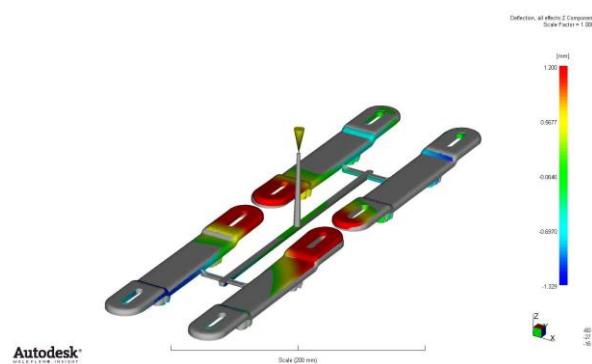
Proses penentuan parameter-parameter awal proses cetak injeksi plastik menggunakan simulasi dengan perangkat lunak Autodesk Moldflow Insight. Metode elemen hingga menggunakan *dual domain* menghasilkan *mesh* terdiri dari sekitar 55.673 elemen segitiga dan 27.854 nodal. Rata-rata nilai *aspect ratio* yang dihasilkan dari proses *meshing* adalah sebesar 3.03 : 1, hal ini sudah memenuhi syarat dibawah 6 : 1. Sedangkan besarnya persentase *match mesh* mencapai 86%, hal ini cukup untuk menganalisis proses injeksi tanpa menggunakan pendingin.

Parameter lain yang juga diperlukan untuk pengaturan simulasi awal terkait dengan material *cavity* cetakan P20, yaitu *specific heat* dan *thermal conductivity*, dimana nilai *specific heat* sebesar $460 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ dan nilai *thermal conductivity* sebesar $41 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Besarnya kecepatan aliran air pendingin sebesar 1 m/s dengan temperatur air 25°C dan bilangan Reynold 2500. Pengaturan bukaan cetakan ditentukan 5 s , temperatur ejeksi 110°C dan temperatur cetakan sebesar 50°C . Sedangkan *injection rate* mesin cetak injeksi ditentukan sebesar $180 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Simulasi awal menggunakan *melt temperature* 210°C dengan pilihan parameter lain otomatis untuk mendapatkan data-data *injection pressure*, *packing pressure* dan *packing time*. Grafik *injection pressure* terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 3. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa besarnya *injection pressure* minimum sebesar 19 MPa dan *packing pressure* 15 MPa dengan waktu ± 10 s.



Gambar 3. Grafik *injection pressure* terhadap waktu injeksi



Gambar 4. Profil respon defleksi

Tabel 2. Kode level dan nilai variabel

Code	Factor	Level		
		1	2	3
A	<i>Melt temperature (°C)</i>	200	210	220
B	<i>Injection pressure (MPa)</i>	20	24	28
C	<i>Packing pressure (MPa)</i>	16	18	20
D	<i>Packing time (s)</i>	10	12	14

Gambar 4 menunjukkan respon defleksi pada simulasi proses cetak injeksi.

Tabel 3. Kombinasi parameter menurut L9
Orthogonal Array

Order	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Metode Taguchi digunakan untuk pengolahan data variasi parameter proses cetak injeksi plastik yang mana parameter-parameter tersebut adalah *melt temperature*, *injection pressure*, *packing pressure* dan *packing time* (Tabel 2). Respon defleksi dihasilkan dengan melakukan simulasi ulang variasi kombinasi parameter. Penyusunan DOE pada variasi parameter-parameter proses dengan menggunakan *design factorial*, yaitu empat parameter/faktor dengan tiga level yang dikombinasikan sesuai dengan matriks L9 *Orthogonal Array*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Hasil dan Analisis

Simulasi dilakukan dengan 9 percobaan dan hasilnya berupa respon defleksi sumbu Z. Selanjutnya dihitung S/N (*Signal-to-Noise*) ratio menggunakan Pers. 1 dengan kriteria *Smaller is Better* untuk melihat kombinasi parameter untuk respon cacat defleksi minimum, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right) \quad (1)$$

Hasil perhitungan efek untuk S/N ratio dapat dilihat pada Tabel 5. Adapun contoh perhitungannya adalah sebagai berikut:

– Rata-rata respon untuk A1:

$$\begin{aligned} A1 \text{ bar} &= (-2.810) + (-4.983) + (-3.209) / 3 \\ &= -3.667 \end{aligned}$$

Tabel 4. Data defleksi dan S/N ratio

Order	Factor				Deflection Z-axis (mm)	S/N ratio
	A	B	C	D		
1	200	20	16	10	1.382	-2.810
2	200	24	18	12	1.775	-4.983
3	200	28	20	14	1.447	-3.209
4	210	20	18	14	1.355	-2.638
5	210	24	20	10	1.456	-3.263
6	210	28	16	12	1.378	-2.784
7	220	20	20	12	1.344	-2.567
8	220	24	16	14	1.422	-3.057
9	220	28	18	10	1.367	-2.715
Average S/N						-3.114

Tabel 5. Efek S/N ratio

Level	A	B	C	D
1	-3.667	-2.672	-2.884	-2.929
2	-2.895	-3.768	-3.446	-3.445
3	-2.780	-2.903	-3.013	-2.968
Effect	-0.887	-1.096	-0.561	-0.516
Rank	2	1	3	4
Optimum	A1	B2	C2	D2

– Efek untuk faktor A:

$$\begin{aligned} \text{Efek faktor A} &= \text{rata-rata respon terbesar} - \text{rata-rata respon terkecil} \\ &= (-3.667) - (-2.780) = -0.887 \end{aligned}$$

Perhitungan lebih lanjut yaitu efek dari rata-rata atau *mean* dimana perhitungannya sama dengan perhitungan efek S/N ratio (Tabel 5).

Pada Tabel 6 ditunjukkan efek untuk nilai *mean* dan urutan dari pengaruh tiap-tiap faktor mulai dari yang berpengaruh kecil hingga yang mempunyai pengaruh paling besar. Karena pada penelitian ini jenis *ratio* untuk karakteristik mutu yang dipilih adalah *smaller is better*, maka berdasarkan tabel tersebut diambil nilai rata-rata efek yang paling kecil diantara tiap-tiap faktor yang ada. Faktor-faktor tersebut yaitu pada faktor A level 3, faktor B level 1, faktor C level 1, dan faktor D level 1.

Tabel 6. Efek rata-rata atau *mean*

<i>Level</i>	A	B	C	D
1	1.535	1.360	1.394	1.402
2	1.396	1.551	1.499	1.499
3	1.378	1.397	1.416	1.408
<i>Effect</i>	0.157	0.191	0.105	0.097
<i>Rank</i>	2	1	3	4
<i>Optimum</i>	A3	B1	C1	D1

Tabel 7. Analysis of variances (ANOVA)

<i>Source</i>	DOF	SS	V	%
A	2	1.396	0.698	31.643
B	2	2.003	1.001	45.376
C	2	0.519	0.259	11.760
D	2	0.495	0.247	11.219
<i>Error</i>	1			
<i>Total</i>	9	4.414		100
<i>Mean</i>		1.436		
<i>Average S/N</i>		-3.114		

Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan ANOVA untuk mendapatkan *sum of square* (SS) dan *variance* (V) berdasarkan *S/N ratio* dan juga harga rata-rata atau *mean*. Tabel 7 menunjukkan hasil perhitungan ANOVA dan dari tabel tersebut didapatkan bahwa semua faktor terpilih memiliki pengaruh terhadap cacat pada produk akhir *bracket number*. Akan tetapi faktor B (*injection pressure*) memberikan kontribusi paling besar terhadap karakteristik mutu produk *bracket number* sebesar 45.4% bila dibandingkan dengan faktor lain.

Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan *injection pressure* paling rendah sebesar 20 MPa, *melt temperature* maksimum 220°C, *packing pressure* 20 MPa dan *packing time* 18 s, menghasilkan respon defleksi minimum sebesar 1.34 mm. Dari hasil analisis efek *S/N ratio*, efek dari *mean* dan ANOVA diperoleh faktor yang sangat berpengaruh pada respon defleksi adalah *injection pressure*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8. Faktor berikutnya adalah *melt temperature*, sedangkan *packing pressure* dan *packing time* mempunyai pengaruh yang kecil.

Tabel 8. Rangking pengaruh

<i>Rank</i>	<i>S/N ratio</i>	<i>Mean</i>	<i>ANOVA</i>
1	B	B	B
2	A	A	A
3	C	C	C
4	D	D	D

Referensi

- [1] D.V. Rosato, M.G. Rosato, *Injection Molding Handbook*, 3rd ed., Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] S.L. Mok, C.K. Kwong, Application of artificial neural network and fuzzy logic in a case-based system for initial process parameter setting of injection molding, *Journal of Intelligent Manufacturing*, (2002), 13(3), 165–176.
- [3] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed., Wiley, New York, 2005.
- [4] R. Spina, Optimization of injection moulded parts by using ANN-PSO approach, *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, (2006), Vol.15, Issue 1-2, March-April.
- [5] B.H. Min, A study on quality monitoring of injection-molded parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 136 (2003), 1–6.
- [6] T. Erzurumlu, B.Ozcelik, Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method, *Materials & Design*, (2005).
- [7] M.-C.Huang, C.-C.Tai, The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature, *Journal of Materials Processing Technology*, 110 (2001), 1-9.
- [8] P. Postawa, J. Koszkul, Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163 (2005), 109-115.