

Optimalisasi Perancangan *Runner* dan *Gate* Cetakan Injeksi Plastik dengan Metode Simulasi

Agung Kaswadi^{1,*} dan Muhammad Insan Tauhid¹

¹Departemen Pembuatan Peralatan Perkakas Produksi, Politeknik Manufaktur Astra - Jakarta Utara

*Korespondensi: agung.kaswadi@polman.astra.ac.id

Abstract. Seiring dengan banyaknya penggunaan produk berbahan baku plastik, proses cetak injeksi plastik telah menjadi proses yang menantang bagi banyak produsen dan peneliti. Proses cetak injeksi plastik menggunakan *multi-cavity* sering terjadi ketidakseragaman atau cacat pada produk, terutama pada produk yang cukup besar. Oleh karena itu pada tahap desain cetakan, perancangan *feeding system* yang meliputi *sprue*, *runner* dan *gate* sangat penting. Pada makalah ini akan dibahas penentuan ukuran yang optimal dari *runner* dan *gate* pada produk yang dicetak dengan 2 *cavity*, dimana *cavity* 2 mempunyai posisi kebalikan 180° dari *cavity* 1. Studi kasus dilakukan pada produk penutup komponen otomotif yang terbuat dari material termoplastik PP AZ564. Analisa awal menggunakan perangkat lunak Autodesk Moldflow Insight 2016, dimana ukuran *runner* dan *gate* yang sama, menunjukkan hasil produk yang tidak sama. Hal ini terlihat dari perbedaan waktu pengisian produk hasil *cavity* 1 dan *cavity* 2 yang dapat menyebabkan cacat dan berat produk yang berbeda. Optimasi dilakukan dengan metode Taguchi untuk ukuran *runner*, lebar *gate* dan tebal *gate*, dimana DOE dirancang untuk 3 faktor dengan 3 level. Hasil penelitian dengan simulasi untuk semua kombinasi parameter menunjukkan bahwa ukuran lebar dan tebal *gate* sangat berpengaruh pada waktu pengisian, sedangkan diameter *runner* tidak terlalu berpengaruh. Ukuran yang dipakai pada *cavity* 1 yaitu diameter *runner* tetap 8 mm, lebar *gate* menjadi 10 mm dan tebal *gate* menjadi 0,8 mm. Dari hasil penelitian juga menunjukkan bahwa meskipun bentuk *cavity* sama ukuran *feeding system* dapat berbeda antar *cavity* untuk menghasilkan aliran yang seimbang.

Kata kunci: *multi-cavity*, *feeding system*, *runner*, *gate*, metode Taguchi

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Proses cetak injeksi plastik (*plastic injection molding*) adalah salah satu proses yang penting dalam pembuatan plastik. Kemampuannya memproduksi produk secara massal, dengan bentuk yang kompleks dan cepat membuat proses ini semakin populer di dunia industri [1]. Kualitas cetakan injeksi bergantung pada karakteristik material, bentuk produk, desain cetakan dan kondisi proses atau parameter proses [2]. Pada cetakan dengan 2 rongga cetakan (*cavity*) atau lebih, yang sering disebut dengan *multi-cavity*, sering terjadi cacat produk akibat ketidakseimbangan proses pengisian di kedua *cavity* tersebut. Oleh karena itu, perancangan *feeding system* yang meliputi *sprue*, *runner* dan *gate* sangat penting [3].

Fungsi utama sistem *runner* dan *gate* adalah untuk mengantarkan plastik cair dimasukkan ke dalam cetakan melalui semua bagian *cavity*. Desain *gate* yang kurang tepat dapat menyebabkan cacat produk seperti porositas, *sink mark*, *weld line*, *warpage*, *short shot* dan kualitas permukaan yang buruk. Dengan desain sistem *runner* dan *gate* yang tepat, proses pengisian cetakan (*filling*) dapat dikendalikan, sehingga tahap berikutnya yang berupa

pemadatan (*packing*) akan lebih baik dan produktivitasnya naik [4].

Beberapa penelitian tentang penentuan desain *runner* dan *gate* dewasa ini cukup banyak. Di masa lalu, sistem *runner* dan *gate* cetakan injeksi dengan *multi-cavity* biasanya dirancang dengan *trial and error* sampai semua rongga terisi dengan benar tanpa cacat *short shot* atau cacat lainnya. Optimalisasi pola pengisian cetakan melalui perbaikan perancangan sistem *runner* dan *gate*, dengan perangkat lunak secara otomatis telah dikembangkan, misalnya menggunakan Moldflow [5]. Simulasi numerik digunakan untuk mengubah posisi *gate* untuk menentukan lokasi *gate* yang paling tepat, sehingga dapat meminimalkan waktu pengisian. Metode yang diusulkan dapat digunakan untuk *gate cavity* tunggal atau beberapa lubang *gate* yang diposisikan secara simetris [6]. Selain itu, penelitian lainnya adalah dengan mengubah bentuk dari penampang *runner* yang dapat menyeimbangkan pengisian rongga *multi-cavity* [7].

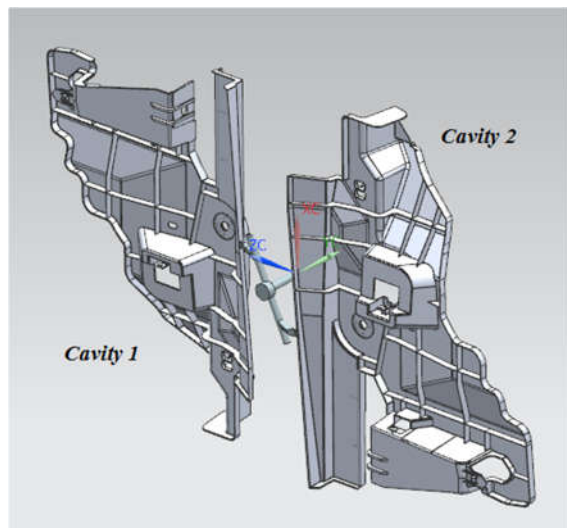
Pada penelitian ini, terjadinya cacat *short shot* pada *cavity* 1 karena perbedaan waktu pengisian dengan *cavity* 2, diatasi dengan mengubah ukuran diameter *runner* dan ukuran penampang *gate*. Hasil yang diharapkan adalah waktu pengisian minimum

yang sama diantara kedua *cavity* sehingga cacat *short shot* tidak ada dan berat produk bisa seragam. Metode Taguchi *orthogonal array* dan Anova adalah dua pendekatan utama DOE yang diterapkan dalam analisis perancangan *feeding system* ini [8].

Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini akan digunakan pendekatan simulasi dalam penentuan ukuran diameter *runner*, lebar dan tebal *gate* untuk mendapatkan waktu pengisian minimum yang seragam di kedua *cavity* serta tidak terdapat cacat *short shot*. Studi kasus pada penelitian ini diterapkan pada produk komponen otomotif yang terbuat dari material polimer jenis PP AZ564 produksi Sumitomo Chemical, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. 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 antara 190°C-230°C. Data-data material plastik ditunjukkan pada Tabel 1.

Produk komponen otomotif ini dicetak dengan 2 *cavity*, dimana posisi *cavity* 2 mempunyai posisi kebalikan 180° dari *cavity* 1. Pemodelan 3D produk dan perancangan cetakan menggunakan perangkat lunak Siemens NX 8. Cetakan dirancang berdasarkan gambar model produk 3D dan



Gambar 1. Model 3D produk dan posisi *cavity*

Tabel 1. Data produk dan material polimer

Specifications	Value
Code	AZ564
Manufacturer	Sumitomo Chemical
Material Structure	Crystalline
Melt flow rate	30 g/10 min
Melt Temperature	190-230 °C
Max. Shear Stress	0,30 MPa
Melt Density	0,90 g/cm ³
Shrinkage Factor	1,5%
Part Dimension	460 x 322 mm

Standard Thickness	1,5 mm
Projection Area	829.28 cm ²
Resin pressure	300 kg/cm ³

diperbesar sebesar 1,5% sesuai dengan besarnya *shrinkage factor* material polimer PP AZ564. Konstruksi cetakan berukuran tinggi 600 mm, lebar 950mm dan panjang 1030 mm dengan tipe 1 bukaan atau *two plate*. Penampang *runner* berbentuk bulat dengan *gate* yang dipakai tipe *side gate*. Adapun ukuran awal untuk *runner* dan *gate* yang ditetapkan adalah sebagai berikut:

- diameter *runner* (d) : 8 mm
- lebar *gate* (l) : 8 mm
- tebal *gate* (t) : 1 mm

Material *cavity* terbuat dari baja AISI P20 yang mana nilai *specific heat* sebesar 460 J/kg°K dan nilai *thermal conductivity* sebesar 41 W/m°K, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data material *cavity*

Specifications	Value
Mold Density	7,8 g/cm ³
Mold Spesific Heat	460 J/kg°K
Mold Thermal Conductivity	41 W/m°K
Elastis Modulus (E)	205.000 MPa
Poissons ratio (v)	29 %

Tabel 3. Data parameter awal untuk simulasi

Parameters	Value	Unit
Melt Temperature	220	°C
Ejection Temperature	120	°C
Mold Temperature, Tw	50	°C
Injection Pressure	60	MPa
Packing Pressure	84	MPa
Packing Time	10	s
Flowrate	145	cm ³ /s

Parameter proses cetak injeksi yang digunakan dalam penelitian ini sudah ditetapkan dan disesuaikan dengan kondisi aktual saat proses produksi. Parameter tersebut diperlukan juga untuk dapat melihat fase *filling* menggunakan software Moldflow Insight 2016. Ada 6 parameter yang ditentukan sebagai parameter tetap pada penelitian ini. Parameter tersebut yaitu *melt temperature*, *mold temperature*, *flow rate*, *injection pressure*, *packing pressure*, dan *packing time*, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Setelah data material polimer, data material cetakan dan data parameter proses ditetapkan, selanjutnya gambar model 3D produk diekspor ke format gambar STL (*Stereo Lithography*) agar bisa diproses dengan perangkat lunak Moldflow Insight 2016. Dari hasil proses *meshing*, rata-rata nilai *aspect ratio* yang dihasilkan sebesar 2,54:1, hal ini

sudah memenuhi syarat di bawah 6:1. Sedangkan besarnya persentase match mesh mencapai 90,3%, hal ini cukup untuk menganalisis proses *filling*. Data-data hasil meshing produk sebagai berikut:

- *Mesh type* : Dual domain
- *Number of nodes* : 39.047
- *Total number of part elements*: 78.170
- *Total number of runner elements*: 18

Pengaturan parameter proses injeksi yang lain dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak Moldflow Insight 2016.

Tabel 4. Kode level dan nilai variable

Kode	Faktor	Level		
		1	2	3
A	Diameter runner (mm)	8	10	12
B	Lebar gate (mm)	8	10	12
C	Tebal gate (mm)	0,6	0,8	1,0

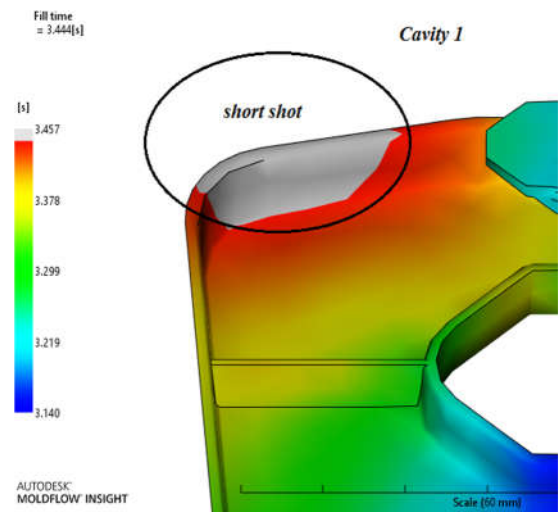
Tabel 5. Kombinasi parameter menurut L9 *orthogonal array*

Order	Faktor		
	A	B	C
1	8	8	0,6
2	8	10	0,8
3	8	12	1
4	10	8	0,8
5	10	10	1
6	10	12	0,6
7	12	8	1
8	12	10	0,6
9	12	12	0,8

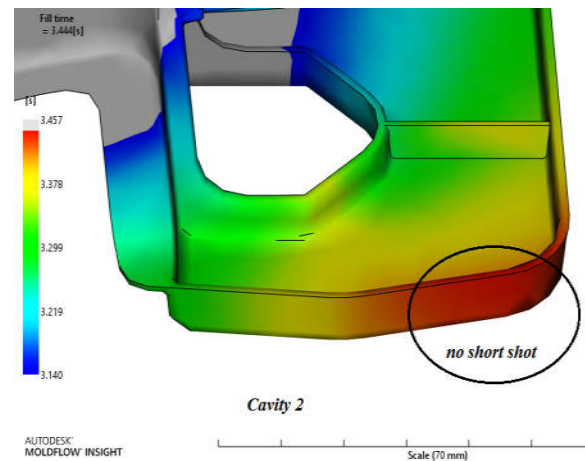
Metode Taguchi digunakan untuk pengolahan data variasi ukuran *feeding system* yaitu diameter runner, lebar gate, dan tebal gate, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4. Respon waktu pengisian dihasilkan dengan melakukan simulasi ulang variasi kombinasi ukuran-ukuran tersebut. Penyusunan DOE pada variasi ukuran dengan menggunakan *design factorial*, yaitu 3 faktor dengan tiga level yang dikombinasikan sesuai dengan matriks L9 *Orthogonal Array*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.

Respon pada penelitian ini merupakan waktu injeksi/pengisian rongga yang paling minimum dan seimbang antara *cavity 1* dan *cavity 2*. Pada tahap awal didapatkan respon waktu injeksi minimum sebesar 3,444 s yang terjadi pada *cavity 2*. Sehingga dari setiap percobaan akan dibandingkan waktu injeksi *cavity 1* (f1) dengan *cavity 2* (f2). Waktu injeksi yang optimal adalah selisih waktu injeksi f1 dan f2 yang mendekati nominal 3,444 s atau dengan

kata lain perbedaannya antara f1 dan f2 mendekati minimum atau sama dengan 0 s.



(a)



(b)

Gambar 2. (a) *Cavity 1* mengalami cacat *short shot* pada waktu pengisian 3,444 s, (b) *cavity 2* tidak mengalami cacat pada waktu pengisian 3,444 s.

Pada kondisi awal (gambar 2), produk pada *cavity 1* (a) membutuhkan waktu injeksi 3,457 s untuk mengisi penuh *cavity*. Sementara itu produk pada *cavity 2* (b) membutuhkan waktu injeksi 3,444 s. Pada kondisi aktual produk pada *cavity 1* mengalami cacat *short shot* saat *cavity 2* sudah terisi penuh.

Hasil dan Analisis

Simulasi dengan perangkat lunak Moldflow dilakukan dengan 9 percobaan untuk kombinasi ukuran pada tabel 6. Hasil yang berupa respon waktu injeksi untuk *cavity 1* dan *cavity 2* ditunjukkan pada tabel 7. Selanjutnya dihitung S/N (*Signal-to-Noise*) ratio dengan persamaan 1 dengan kriteria *Nominal is Better* dimana nilai yang terbesar adalah

Tabel 6. Respon waktu injeksi dan S/N ratio

Exp. No	Cavity 1		Cavity 2	
	Exp. Result f1 (s)	S/N ratio	Exp. Result f2 (s)	S/N ratio
1	3,446	53,979	3,475	30,173
2	3,446	53,979	3,445	60,000
3	3,460	35,918	3,438	44,437
4	3,481	28,636	3,505	24,293
5	3,496	25,680	3,488	27,131
6	3,471	31,373	3,519	22,499
7	3,529	21,412	3,539	20,446
8	3,524	21,938	3,551	19,412
9	3,532	21,110	3,539	20,446

Tabel 7. Selisih f1-f2 dan S/N ratio

Exp. No	Exp. Result f1-f2 (s)	S/N ratio
1	-0,029	30,752
2	0,001	60,000
3	0,022	33,152
4	-0,024	32,396
5	0,008	41,938
6	-0,048	26,375
7	-0,010	40,000
8	-0,027	31,373
9	-0,007	43,098

nilai yang optimal untuk waktu injeksi minimum.

$$S / N = 10 \log \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \tag{1}$$

dimana:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \tag{2}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \tag{3}$$

Tabel 7 menunjukkan hasil selisih waktu injeksi antara cavity 1 dan cavity 2. Dari hasil percobaan 2 menghasilkan selisih waktu yang paling kecil sebesar 0,001 s sehingga bisa dikatakan paling optimal.

Tabel 8. Efek S/N ratio Cavity 1

Level	A	B	C
1	47,959	34,676	35,763
2	28,563	33,866	34,575
3	21,487	29,467	27,670
Efek	26,472	5,209	8,093
Rank	1	3	2
Optimum	A1	B1	C1

Tabel 9. Efek S/N ratio Cavity 2

Level	A	B	C
-------	---	---	---

1	44,870	24,971	24,028
2	24,641	35,514	34,913
3	20,101	29,127	30,671
Efek	24,769	10,543	10,885
Rank	1	3	2
Optimum	A1	B2	C2

Tabel 10. Efek S/N ratio selisih f1-f2

Level	A	B	C
1	41,301	34,383	29,500
2	33,570	44,437	45,165
3	38,157	34,208	38,363
Efek	7,731	10,229	15,665
Rank	3	2	1
Optimum	A1	B2	C2

Tabel 8 memberikan informasi mengenai kondisi paling optimum dan paling tidak optimum pada setiap faktor dan level terhadap waktu injeksi di cavity 1 berdasarkan efek S/N ratio. Runner dengan diameter 8 mm, lebar gate 10 mm dan tebal gate 0,8 menunjukkan kondisi yang paling optimum, sementara itu pengaruh yang paling besar adalah dari faktor diameter runner. Demikian pula pada cavity 2, mempunyai kondisi optimum seperti pada cavity 1 (Tabel 9).

Sedangkan Tabel 10 memberikan informasi mengenai kondisi terbaik pada setiap faktor dan level terhadap perbedaan waktu injeksi antara cavity 1 dengan cavity 2, dimana yang memberikan selisih minimumlah yang diharapkan. Dari data tersebut, diameter runner 8 mm, lebar gate 10 mm dan tebal gate 0,8 menunjukkan kondisi yang paling optimum, namun pengaruh terbesar karena tebal gate..

Tabel 11. Efek mean Cavity 1

Level	A	B	C
1	0,004	0,018	0,016
2	0,037	0,020	0,019
3	0,084	0,034	0,041
Efek	0,080	0,016	0,025
Rank	1	3	2
Optimum	A1	B1	C1

Tabel 12. Efek mean Cavity 2

Level	A	B	C
1	0,006	0,056	0,063
2	0,059	0,017	0,018
3	0,099	0,035	0,029
Efek	24,769	10,543	10,885
Rank	1	3	2
Optimum	A1	B2	C2

Tabel 13. Efek *mean* selisih f1-f2

Level	A	B	C
1	0,009	0,019	0,033
2	0,021	0,006	0,006
3	0,012	0,019	0,012
Efek	7,731	10,229	15,665
Rank	3	2	1
Optimum	A1	B2	C2

Selanjutnya efek terhadap *mean* atau rata-rata dihitung untuk menentukan kondisi optimum pada setiap faktor dan level, seperti pada efek *S/N ratio*. Tabel 11 dan Tabel 12 memberikan informasi mengenai efek rata-rata terhadap kondisi paling optimum waktu injeksi di *cavity 1* dan *cavity 2*. Berdasarkan perhitungan ini, diameter *runner* 8 mm, lebar *gate* 10 mm dan tebal *gate* 0,8 menunjukkan kondisi yang paling optimum untuk *cavity 1* dan *cavity 2*. Efek *mean* juga menunjukkan pengaruh paling besar adalah dari faktor diameter *runner*. Sedangkan informasi mengenai kondisi terbaik pada setiap faktor dan level terhadap perbedaan waktu injeksi antara *cavity 1* dengan *cavity 2* ditunjukkan pada Tabel 13. Diameter *runner* 8 mm, lebar *gate* 10 mm dan tebal *gate* 0,8 masih menunjukkan kondisi yang paling optimum, dan pengaruh terbesar karena tebal *gate*.

Tabel 14. Analisis of varians (ANOVA)

Faktor kontrol	DOF	SoS	V	P (%)
<i>Cavity 1</i>				
A	2	376	188	87
B	2	16	8	4
C	2	38	19	9
<i>Cavity 2</i>				
A	2	348	174	75
B	2	56	28	12
C	2	60	30	13
<i>Perbedaan Cavity 1 dan 2 (f1-f2)</i>				
A	2	30	15	14
B	2	68	34	31
C	2	124	62	55

Metode *Anova* juga digunakan untuk menguji apakah variasi yang ada dapat diterima atau tidak. Diasumsikan bahwa dalam analisa data hasil pengujian ini dipilih tingkat kepentingan = 98%, $\alpha = 0,02$. Artinya jika nilai P suatu faktor kurang dari 2%, maka dapat diasumsikan bahwa adanya variasi karena perubahan pada faktor tersebut dapat diabaikan. Dalam uji *anova* mengabaikan suatu *control factor* biasa disebut menerima H_0 dan menolak H_1 , begitu juga sebaliknya jika menerima suatu *control factor* biasa disebut menerima H_1 dan

menolak H_0 . *Factor effect* (P) didapatkan dengan menghitung *degree of freedom* (DoF), *sum of square* (SoS), dan *mean square* (V). *Factor effect* untuk waktu injeksi di *cavity 1*, *cavity 2* dan selisih waktu f1-f2 disajikan pada Tabel 14.

Perhitungan *Anova* menunjukkan bahwa pengaruh terbesar untuk waktu injeksi di *cavity 1* dan *cavity 2* adalah diameter *runner*, tingkat kepercayaan sebesar 87% dan 75%. Sedangkan pengaruh terbesar selisih waktu injeksi untuk kedua *cavity* tersebut adalah tebal *gate*, dengan tingkat kepercayaan sebesar 55%. Data *Anova* ini menegaskan kembali analisa hasil perhitungan efek *S/N ratio* dan efek *mean* yang sudah dijelaskan sebelumnya.

Selanjutnya dari analisa efek *S/N ratio*, efek *mean*, dan *Anova*, dibuat kesimpulan untuk menentukan desain diameter *runner*, lebar *gate* dan tebal *gate* yang optimum.

Tabel 15. Rangkings pengaruh *cavity 1*

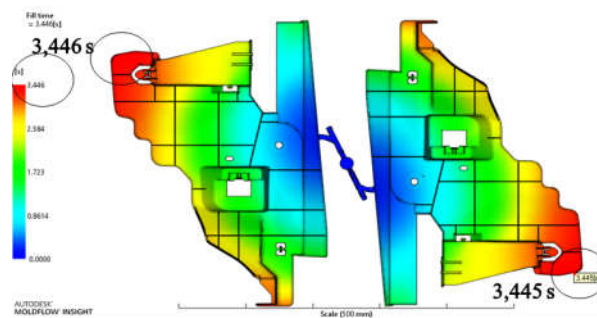
Rank	S/N ratio	Mean	ANOVA
1	A	A	A
2	C	C	C
3	B	B	B

Tabel 16. Rangkings pengaruh *cavity 2*

Rank	S/N ratio	Mean	ANOVA
1	A	A	A
2	C	C	C
3	B	B	B

Tabel 17. Rangkings pengaruh selisih f1-f2

Rank	S/N ratio	Mean	ANOVA
1	C	C	C
2	B	B	B
3	A	A	A



Gambar 3. Simulasi waktu injeksi dengan ukuran *feeding system* yang optimum

Rangkings pengaruh pada Tabel 15, 16 dan 17 menunjukkan bahwa untuk mendapatkan selisih waktu injeksi optimum antara kedua *cavity*, maka diameter *runner* 8 mm, lebar *gate* 10 mm dan tebal *gate* 0,8 mm. Selanjutnya ukuran-ukuran tersebut

disimulasikan kembali menggunakan Moldflow Insight 2016 untuk mendapatkan waktu injeksi dan melihat kemungkinan adanya cacat *short shot* atau tidak.

Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 3, dimana respon waktu injeksi dengan menggunakan ukuran *feeding system* yang baru pada *cavity* 1 sebesar 3,446 s dan *cavity* 2 sebesar 3,445 s (Tabel 18). Sehingga perbedaan waktu injeksi menjadi 0,001 s. Kondisi waktu injeksi yang seimbang tersebut menghilangkan kemungkinan terjadinya cacat *short shot*.

Tabel 18. Perbandingan waktu injeksi awal dan akhir

Kondisi	f1	f2	f1-f2
Awal	3,457 s	3,444 s	0,013 s
Akhir	3,446 s	3,445 s	0,001 s

Kesimpulan

Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa keseimbangan aliran pada saat proses pengisian pada cetak injeksi plastik dapat dilakukan dengan cara memodifikasi ukuran diameter *runner*, lebar *gate* dan tebal *gate*. Cetakan yang mempunyai 2 *cavity* dengan bentuk simetri dan mempunyai ukuran yang sama belum tentu menghasilkan produk yang sama tanpa cacat dan berat yang sama. Hasil modifikasi ukuran diameter *runner*, lebar *gate* dan tebal *gate* adalah sebagai berikut:

- Lebar *gate cavity* 1 dari 8 mm diperlebar menjadi 10 mm.
- Tebal *gate cavity* 1 dari 1 mm dipertipis menjadi 0,8 mm.
- Diameter *runner* tetap dengan ukuran 8 mm.

Referensi

- [1]. Rosato, D.V. and Rosato, M.G., 2000. Injection Molding Handbook, 3rd ed., Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- [2]. Pötsch, G. and Michaeli, W., 2008. Injection Molding an Introduction, Hanser Verlag.
- [3]. Takarada, R.K., 2006. An experimental investigation of runner based flow imbalances during injection molding processes in multicavity molds, Theses and Dissertations, Paper 928, <http://preserve.lehigh.edu/etd> (diakses pada 15-09-2017).
- [4]. Lee, K.S., and Lin, J.C., 2006. Design of the runner and gating system parameters for a multi-cavity injection mould using FEM and neural network, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 27, No. 11-12, 1089-1096.
- [5]. Lam, Y.C. and Seow, L.W., 2000. Cavity balance for plastic injection molding." Polymer Engineering & Science, Vol. 40 No. 6, 1273-1280.
- [6]. Baesso, R., Salvador, M. and Lucchetta, G., 2005. Filling Balance Optimization for Plastics Injection Molding, AMST'05 Advanced Manufacturing Systems and Technology. Springer, Vienna, 617-624.
- [7]. Huang, T.C. et al., 2008. Improving flow balance during filling a multi-cavity mold with modified runner systems, International Polymer Processing, Vol. 23, No. 4, 363-369.
- [8]. Montgomery, D.C., 2005. Design and Analysis of Experiments, 6th ed., Wiley, New York.