

Pengaruh Variasi Tekanan dan Waktu Tahan Pada Proses Injeksi Plastik Terhadap Berat Serta Penyusutan Produk
(The Influence Of Various Holding Pressure and Holding Time On Injection Molding Process To The Weight And Shrinkage Values of Product)

Cahyo Budiyanoro^{1, a *}

¹Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan Tamantirto Kasihan Bantul Yogyakarta 55183, Indonesia

Telp. 0274-387656

^acahyo_budi@umy.ac.id

Abstrak

Injection molding merupakan proses pembuatan produk plastik dengan pencetakan secara siklus. Dibandingkan dengan jenis proses produksi plastik lainnya, *injection molding* memiliki kemampuan untuk menghasilkan produk dengan geometri yang kompleks. Siklus proses meliputi penutupan *molding*, injeksi plastik ke dalam *molding*, menahan cairan dengan tekanan dalam waktu tertentu (fase *holding*), pendinginan produk dalam *molding*, dan pengeluaran produk, siklus ini akan berulang terus menerus. Setiap tahapan dalam siklus proses akan memberikan pengaruh pada hasil akhir produk. Pada fase injeksi bekerja tekanan dan kecepatan yang tinggi untuk memastikan cairan plastik masuk ke dalam *molding* secepat mungkin, kemudian tekanan berganti menjadi tekanan tahan. Fase *holding* semestinya dilakukan dengan memberikan pasokan cairan plastik tambahan ke dalam *molding* yang akan bekerja menahan dan menekan cairan yang telah memenuhi rongga cetak dalam waktu tertentu hingga *gate* mengalami pembekuan. Karena waktu proses yang singkat, fase ini seringkali tidak terlalu diperhatikan dalam aplikasi praktis di Industri bahkan pada beberapa kasus dilewatkan. Fokus penelitian ini adalah untuk mendapatkan data pengaruh variasi tekanan dan waktu tahan terhadap kualitas produk. Besarnya tekanan dan lamanya waktu tahan dalam fase ini selalu diupayakan sekecil mungkin untuk menghindari ketegangan pada produk dan untuk mencapai waktu siklus proses yang sesingkat – singkatnya, namun tetap menargetkan kualitas yang optimal. Dua parameter yang dapat digunakan untuk menilai kualitas adalah tingkat penyusutan (*shrinkage*) dan berat produk. Nilai penyusutan yang rendah dan berat produk yang stabil menunjukkan kualitas yang baik. Penelitian dilakukan dengan menggunakan mesin Injeksi berkapasitas pengecaman sebesar 70 ton dan *molding* spesimen dua *cavity*. Sedangkan bahan plastik yang digunakan adalah *Polypropylene* homopolimer.

Kata kunci : *Injection Molding*; *holding pressure*; *holding time*; *shrinkage*; berat produk

Pendahuluan

Injection Molding adalah proses yang populer digunakan dalam pembuatan produk plastik karena kemampuannya menghasilkan geometri produk yang kompleks dalam satu siklus yang cepat dan memiliki tingkat reproduksi yang tinggi

(Gert Burkhardt, 2002). Siklus proses terbagi atas beberapa tahapan yaitu:

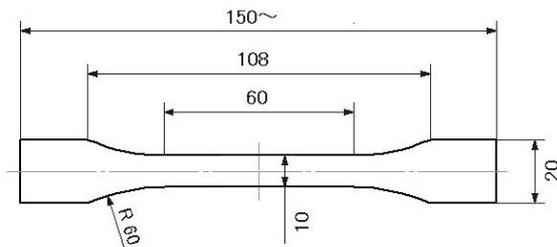
- Penutupan *mold*
- Injeksi plastik ke dalam *mold*
- Tahapan *Holding*
- Pendinginan produk
- Plastisasi plastik dalam barel
- Pembukaan dan pengeluaran produk

Siklus berulang dan setiap tahapan memberikan kontribusi pada pencapaian kualitas produk.

Fase *holding* adalah tahapan yang terjadi setelah plastik cair diinjeksikan memenuhi rongga cetak. Fase ini diperlukan untuk memberikan *supply* tekanan tambahan pada plastik dalam rongga cetak dan ditahan dalam waktu tertentu hingga plastik mengalami solidifikasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh dari aplikasi variasi nilai tekanan dan waktu *holding* terhadap kualitas produk hasil injeksi yang dilihat dari stabilitas berat dan penyusutan (*shrinkage*) yang terjadi.

Deskripsi Alat dan Bahan

Mesin injeksi yang digunakan adalah Meiki dengan kapasitas pengekaman 70 ton. Sebuah molding dengan 2 rongga cetak (*2 cavities mold*) dipasang pada mesin injeksi. *Mold* ini menghasilkan produk berupa dumbell spesimen sesuai DIN ISO 527 – 1A yang akan diamati perubahan kualitasnya saat diaplikasikan variasi *holding*.



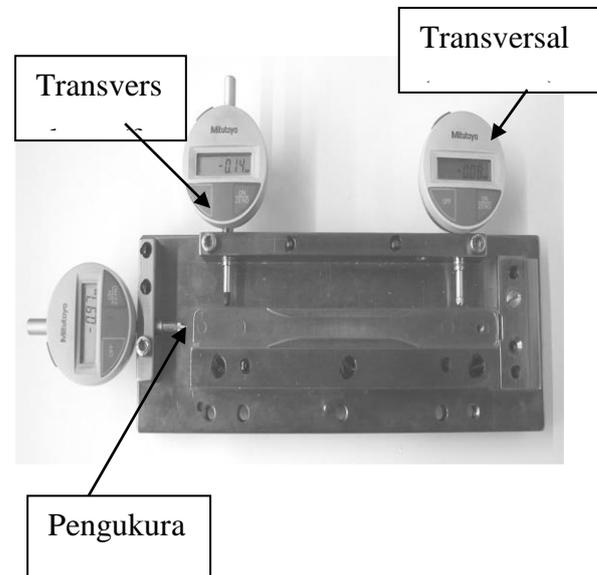
Gambar 74. Spesimen Cetak

Bahan plastik yang diinjeksikan ke dalam *mold* adalah *Polypropylene* (PP) homopolimer dengan data terkait proses sebagai berikut:

- Titik lebur: 173 °C
- *Melting index*: 20 g/10 min pada suhu 230 °C.
- Massa jenis pada suhu ruang : 0.905 g/cm³
- Rekomendasi suhu pencairan: 220 - 260 °C
- Suhu *mold*: 30 – 60 °C

(sumber: *Borealis A/S*)

Besarnya penyusutan (*shrinkage*) diukur dengan dial indikator yang disusun seperti gambar di bawah ini:



Gambar 75. Pengukur *shrinkage*

Sedangkan peralatan lain yang diperlukan adalah: pengukur waktu, *pyrometer* dan timbangan digital.

Prosedur Penelitian

1. Penyetelan suhu barrel.

Suhu *heating band*/zona terakhir diujung barrel disetel sesuai suhu pencairan yang direkomendasikan yaitu 230 °C. Suhu pada tiga zona sebelumnya secara berurutan dikurangi 20 °C. Untuk bahan PP, suhu di bagian *hopper* disetel 35 – 45°C. Suhu ini diperlukan untuk pre kondisi bahan agar dapat dengan mudah dipindahkan ke bagian depan barrel.

2. Penyetelan suhu mold

Suhu molding menentukan kecepatan pendinginan produk. Dalam kasus ini suhu *mold* disetel 40 °C.

3. Mengatur kecepatan *screw*

Sesuai standard, kecepatan ulir berkisar dari 0,05 – 0,2 m/s

4. Mengatur putaran *screw*

Untuk menghitung putaran *screw* berdasarkan kecepatan menggunakan rumusan:

$$v = \pi \times d \times n \text{ sehingga } n = \frac{v}{\pi \times d} \quad (1)$$

Maka untuk $v = 0.1 \text{ m/s}$,
 $N = 47 \text{ rpm}$.

Di mana n adalah putaran *screw* maksimal.

5. Tekanan balik/*back pressure* diatur sebesar 100 bar

6. *Dosing volume/stroke*

Sesuai rumus perhitungan dari *ATI-Basell*, massa jenis plastik cair adalah sekitar 85% dari massa jenis bahan pada suhu ruang. Maka

$$\rho_{melt} = 0,85 \times 0,905 \text{ (g/cm}^3\text{)} \\ = 0,769 \text{ g/cm}^3$$

Berat produk secara teoritis, termasuk *runner system* adalah $m = 29,37 \text{ g}$, sehingga volume cairan

$$V = 29,37 \text{ (g)} / 0,79 \text{ (g/cm}^3\text{)} = 37,2 \text{ cm}^3$$

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 \times h \quad (2)$$

Maka langkah (*stroke*) dari *screw* menjadi

$$h = \frac{37,2 \times 4}{\pi \times (4)^2} = 3 \text{ cm}$$

Langkah total adalah $h + \textit{cushion}$
 $= 30 + 3 = 33 \text{ mm}$

7. Asumsi awal tekanan *holding*

Sebelum mencapai nilai tekanan *holding* yang ideal, pada awal trial tekanan *holding* diasumsikan 40% hingga 50% dari tekanan injeksi. Tekanan injeksi diambil sebesar 1000 bar, maka tekanan *holding* disetel sebesar 500 bar. Namun untuk memastikan bahwa *switch over point* bekerja secara benar, pada awalnya tekanan *holding* disetel 0.

8. Waktu pendinginan

Rumusan berikut ini adalah perhitungan untuk penentuan waktu pendinginan dari bahan PP yang diambil dari *ATI-Basell*

$$t_c = 3,67 \times s^2 \quad (3)$$

di mana:

- t_c = waktu pendinginan (detik)
- s = tebal produk (mm)

untuk tebal produk = 2,86 mm, maka

$$t_c = 3,67 \times (2,86)^2 = 30 \text{ s}$$

jika waktu *holding* diambil 2 detik maka

$$t_c = 30 - 2 = 28 \text{ detik}$$

9. Gaya penekaman

Gaya penekaman adalah gaya yang menahan *mold* terhadap tekanan *cavity* dari arah *nozzle* sehingga *molding* dapat tertutup rapat selama proses injeksi dan tidak ada cairan plastik yang meluber keluar. Gaya penekaman dihitung dengan rumus:

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

Di mana:

- F = gaya cekam (N)
- P = tekanan *cavity* (Mpa)
- A = area proyeksi produk dan *runner* (mm²)

$$P = 615 \text{ bar} = 61,5 \text{ MPa}$$

$$A = 2 \times 215 \times 20 = 8600 \text{ mm}^2$$

Sehingga gaya penekaman

$$F = 61,5 \text{ (N)} \times 8600 \text{ (mm}^2\text{)} = 528900 \text{ N}$$

Atau $F = 52,89 \text{ ton}$.

Jadi mesin injeksi Meiki dengan kapasitas penekaman 70 ton memenuhi.

10. *Purging*

Setelah semua parameter proses dimasukkan ke dalam panel mesin, perlu dilakukan prosedur *purging* yaitu pengosongan sisa bahan yang ada di barel sisa dari proses sebelumnya dan mengisinya dengan bahan yang digunakan dalam pengujian yaitu PP.

11. Pengujian

Tabel 18. Parameter Proses

Suhu [°C]	
<i>Hopper</i>	40
Zona 1	190
Zona 2	210
Zona 2	230
Nozzle	230
<i>Mold (Movable part)</i>	40
<i>Mold (Fixed part)</i>	40
Tekanan [Bar]	
Tekanan Injeksi (limit)	1000

Tekanan Injeksi (aktual)	800
Tekanan <i>holding</i> (awal)	500
<i>Back Pressure</i>	100
<i>Stroke & switch over point</i> [mm]	
<i>Dosing stroke</i> (perhitungan)	33
<i>Dosing stroke</i> (aktual)	37
<i>Switch over point</i>	4,5
Waktu [s]	
Waktu <i>holding</i>	2
Waktu pendinginan	28
Kecepatan [m/s]	
Kecepatan ulir	0,2
Putaran [rpm]	
Putaran <i>Screw</i>	85

<i>Switch over point</i>	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
<i>Screw back stop</i>	37,8	37,8	37,9	37,9	37,9
Waktu [detik]					
Waktu Holding	3	10	15	15	15
Waktu pendinginan	16	9	4	4	4
Waktu Injeksi	1,12	1,1	1,1	1,1	1,1
Waktu Plastisasi	12,0	12,7	12,8	12,7	12,8
<i>Cycle time</i>	20,6	28,2	33,2	33,2	33,2

Hasil dan Pembahasan

1. Parameter Percobaan

Jumlah percobaan yang dilakukan adalah 10 kali untuk setiap *parameter setting*. Kesetimbangan suhu harus ditetapkan sebelum mengambil data hasil percobaan, sehingga jumlah *shot minimum* untuk tiap percobaan adalah 15 kali. Sampel uji ditandai dengan nomor *trial* sebelum dipotong dari runner dan ditimbang beratnya.

Pengukuran *processing shrinkage* dilakukan 24 jam setelah sampel keluar dari molding. Sedangkan perubahan parameter yang dilakukan saat percobaan dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 19. Data Parameter Percobaan

Parameter	Tria 11	Tria 12	Tria 13	Tria 14	Tria 15
Tekanan [Bar]					
Tekanan Injeksi	100	100	100	100	100
Tekanan Holding	700	700	700	350	900
Langkah dan Posisi [mm]					
<i>Melt cushion</i>	3,5	2,5	2,2	4,6	1,0
			4	7	2

2. Processing Shrinkage

Processing shrinkage dihitung dengan mengambil rata-rata nilai penyusutan arah *longitudinal* dan *transversal*. Perhitungan dilakukan secara otomatis dengan program komputer dengan rumusan sebagai berikut: Rata – rata *shrinkage* arah *longitudinal*:

$$S_{long} = \frac{l_{cavity} - l_{part}}{l_{cavity}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Rata – rata *shrinkage* arah *transversal*:

$$S_{trans-ng} = \frac{W_{cavity-ng} - W_{part-ng}}{W_{cavity-ng}} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$S_{trans-fg} = \frac{W_{cavity-fg} - W_{part-fg}}{W_{cavity-fg}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Total Processing Shrinkage menjadi:

$$S_{total} = \frac{1}{4} \cdot (2 \cdot S_{long} + S_{trans-ng} + S_{trans-fg})$$

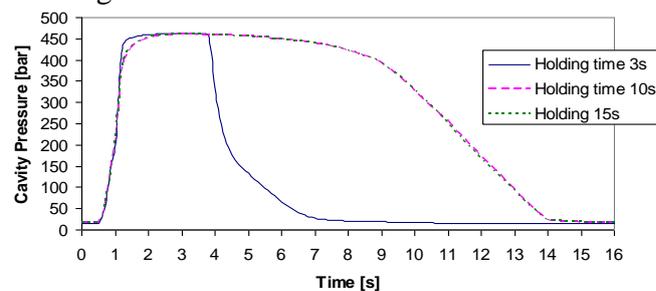
(8)

Di mana:

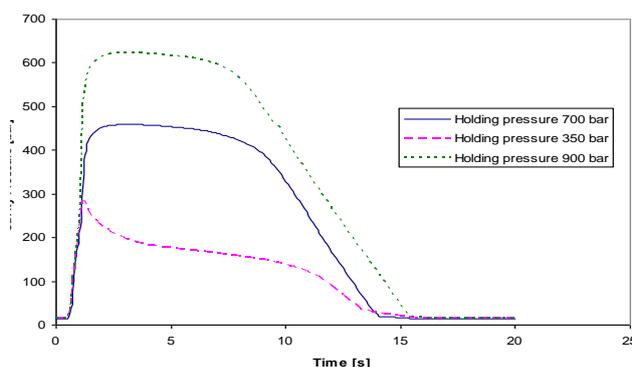
- *long* = longitudinal
- *trans* = transversal
- *ng* = dekat *gate*
- *fg* = jauh dari *gate*
- *w* = lebar

3. Pengaruh *holding pressure* dan *holding time* terhadap tekanan *cavity*

Pengaruh dari perubahan *holding time* dan *holding pressure* terhadap *cavity pressure* diselidiki dengan melakukan 5 percobaan dengan parameter yang berbeda seperti terlihat pada tabel 2. Nilai tekanan *cavity*, waktu injeksi dan tekanan injeksi serta berat sampel dicatat dan digambarkan dalam grafik berikut ini.



Gambar 76. Pengaruh waktu holding terhadap tekanan cavity



Gambar 77. Pengaruh tekanan holding pressure terhadap tekanan cavity.

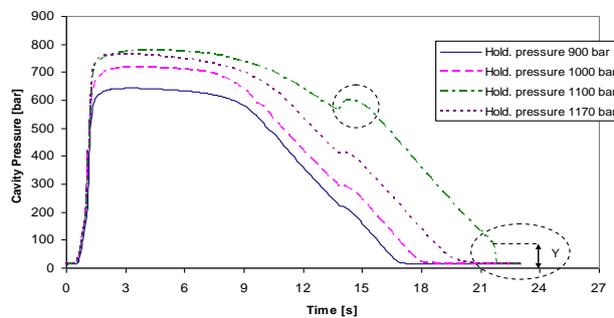
Pada percobaan ke 1 digunakan waktu *holding* 3 detik dan tekanan *holding* 700 bar, tekanan *cavity* maksimum adalah 455 bar, dan tekanan injeksi maksimum sebesar 854 bar. Terjadi penurunan tekanan secara tiba-tiba (kurva menurun lebih awal daripada percobaan 2 dan 3). Hal ini terjadi

karena waktu *holding* lebih rendah daripada titik *sealing* dari *gate molding*, tekanan dalam rongga cetak akan tertarik kembali ke arah sistem injeksi dan cairan mengalir balik ke arah barrel. Kondisi ini disebut dengan *back flow*. *Back flow* harus dihindari karena akan berpengaruh pada kualitas produk dari segi geometrinya. Akan terjadi cekungan / *sink mark* di daerah dekat *gate*. Peningkatan waktu tahan menjadi 10 detik dan 15 detik memberikan efek perubahan pada kurva di mana terlihat hilangnya *back flow*. Sementara itu tekanan *cavity*, tekanan injeksi, berat spesimen dan penyusutan (*shrinkage*) tidak secara signifikan mengalami perubahan saat waktu *holding* diganti dari 10 detik ke 15 detik.

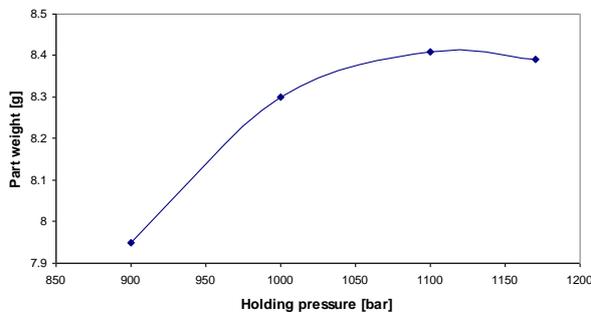
4. *Over loading*: Pengaruh pada berat sampel.

Overloading menunjukkan adanya penggunaan tekanan berlebihan dan adanya sisa tekanan pada saat pengeluaran produk (*demolding*) dilakukan (terlihat pada gambar 5 di mana Y merupakan sisa tekanan saat molding dibuka). Hal ini akan mengarahkan pada terjadinya orientasi berlebihan dan distorsi pada sampel, atau juga dapat terjadi luberan cairan / *flash*. Dari percobaan ke 1 hingga ke 3 dengan variasi tekanan *holding* dari 900 bar hingga 1100 bar, tidak terlihat perubahan tekanan berlebihan pada kurva saat *demolding*. Hal ini berarti pada nilai tekanan tersebut meskipun cukup tinggi namun belum menyisakan tekanan sisa (internal) dalam spesimen. Tetapi saat tekanan dinaikkan menjadi 1170 bar, efek *over loading* terjadi, yang membawa pengaruh pada beberapa faktor yaitu berat spesimen, cycle time, dan biaya. Berat spesimen akan meningkat akibat tekanan *holding/packing* yang tinggi pada cairan plastik di dalam *mold*. Peningkatan tekanan *cavity* ditunjukkan pada kurva gambar 5 (diberi lingkaran titik), efek ini terjadi karena terbukanya molding dalam waktu sangat singkat akibat tekanan *holding* yang tinggi. Pembukaan

cavity ini membuat *supply* cairan yang seharusnya masuk dan memampatkan molding mengalir balik karena gate sudah membeku dan molding kembali menutup, volume cairan tambahan mengalami kompresi. Sebagai akibatnya tekanan *cavity* meningkat, kondisi ini juga disebut dengan *injection compression*. Gambar 6 menunjukkan hubungan antara tekanan *holding* dengan berat spesimen. Pada nilai tekanan *holding* tertentu, berat spesimen mencapai kondisi konstan, sehingga dapat dinyatakan bahwa tekanan *holding* yang sesuai adalah 1100 bar.



Gambar 78. Demolding spesimen saat tekanan *overload*

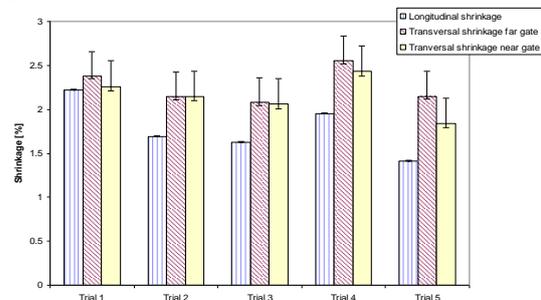


Gambar 79. Tekanan *holding* vs berat spesimen

5. Pengaruh Waktu *Holding* dan Tekanan *Holding* terhadap *Shrinkage* dan Berat Spesimen.

Dimensi spesimen lebih kecil dari ukuran *molding* akibat terjadinya penyusutan (*shrinkage*), perbedaan ukuran ini dinyatakan dalam persen. *Shrinkage* diukur 24 jam setelah keluar dari *molding* agar spesimen agar tercapai kesetimbangan *thermal* dengan suhu sekitarnya dan *post shrinkage* sudah tidak terjadi. Pengukuran

dilakukan dengan alat ukur linear seperti pada gambar 2 yang mengukur *shrinkage* dalam arah *longitudinal* dan *transversal* baik pada posisi *near gate* maupun *far gate*. Sebagian besar hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai *shrinkage* pada arah *transversal* lebih tinggi dibandingkan arah *longitudinal*. Hal ini disebabkan karena lebih banyak orientasi molekular terjadi pada arah *longitudinal*. Penyusutan *transversal* di daerah *far gate* juga lebih tinggi daripada daerah *near gate*, hal ini diakibatkan oleh perbedaan tekanan di kedua daerah tersebut. Tekanan yang masuk ke *molding* akan mengalami penurunan jika jaraknya semakin jauh dari *gate*.



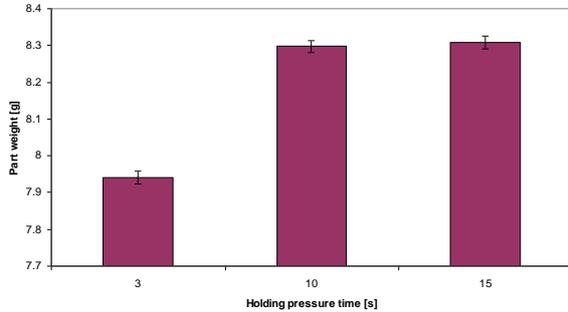
Gambar 80. Waktu *holding* vs berat

Percobaan 1 dengan waktu *holding* 3 detik dan tekanan 700 bar menghasilkan *shrinkage* yang mendekati seragam di semua arah, sementara percobaan 2 dengan waktu *holding* 10 detik dan tekanan 700 bar menghasilkan rata-rata *shrinkage* yang persis sama di daerah *far gate* dan *near gate* dalam arah *transversal*. Peningkatan waktu *holding* menjadi 15 detik dan tekanan *holding* menjadi 900 bar memberikan pengaruh pada penurunan *shrinkage*.

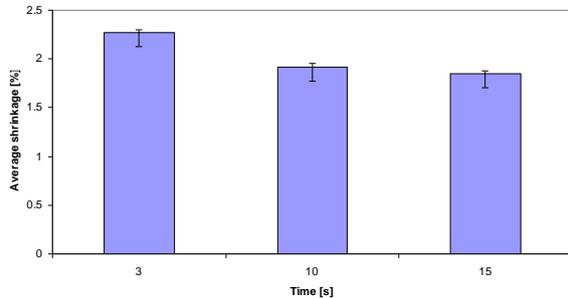
Target dari tekanan *holding* adalah untuk menekan cairan masuk ke *molding* dan memberikan *post supply* serta mencegah terjadinya *backflow*. Diperlukan waktu untuk menahan cairan di dalam *mold*. Dalam gambar 8 ditunjukkan bahwa berat konstan tercapai dalam waktu tahan 10 detik atau lebih.

Sedangkan pada gambar 9 ditunjukkan bahwa jika waktu *holding* meningkat, nilai

rata-rata penyusutan akan menurun. Hal ini terlihat jelas dari waktu 3 detik menjadi 10 detik. Namun pada waktu 10 dan 15 detik, perubahan penyusutan tidak signifikan.



Gambar 81. Waktu *holding* vs berat part



Gambar 82. Waktu *holding* vs rata-rata penyusutan

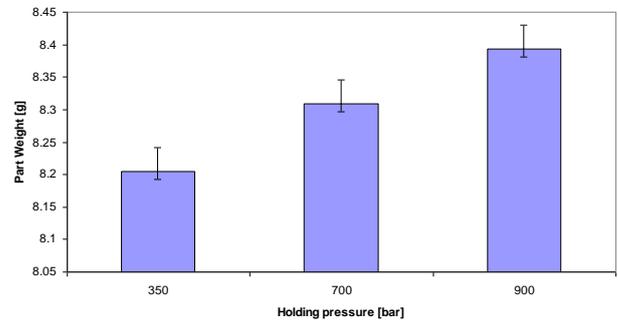
Tabel 3 dan gambar 10 menggambarkan bahwa peningkatan tekanan *holding* memberikan pengaruh terhadap berat sampel. Dengan peningkatan tekanan *holding* maka semakin *post supply* cairan masuk ke *molding*. Berat sampel akan melebihi berat normal dan dapat menghasilkan *flashing*, orientasi berlebihan dan distorsi.

Tabel 20. Hasil Percobaan 3 - 5

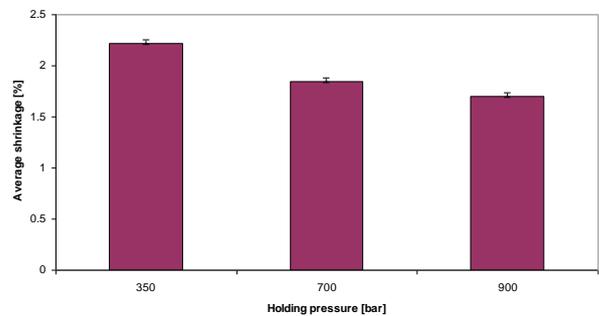
<i>Holding pressure</i> [bar]	<i>Average shrinkage</i> [%]	<i>Part weight</i> [gr]
350	2.221	8.205
700	1.849	8.309
900	1.702	8.394

Tekanan *holding* yang tinggi namun tidak menggerakkan *molding* akan memampatkan cairan dan menurunkan *shrinkage* pada sampel. Sehingga dapat dikatakan bahwa sampel memiliki stabilitas

dimensi yang lebih baik pada tekanan *holding* yang meningkat (lihat gambar 11).



Gambar 83. Tekanan *holding* vs berat sampel



Gambar 84. Tekanan *holding* vs Penyusutan rata-rata

Kesimpulan

1. Terdapat dua metoda untuk menentukan waktu *holding* yang sesuai terkait dengan titik *sealing gate*. Yang pertama dengan trial peningkatan holding time hingga menemukan waktu di mana berat mencapai nilai konstan. Metode kedua dilakukan melalui *trial* peningkatan waktu tahan dan dicapai tekanan *cavity* konstan meskipun waktu *holding* ditingkatkan. Aplikasi tekanan *holding* yang tinggi akan menghasilkan produk dengan berat yang lebih tinggi/stabil dan rata-rata penyusutan rendah. Berat sampel akan meningkat jika waktu *holding* disetel lebih lama. Lamanya waktu holding juga akan menurunkan rata-rata penyusutan

2. Jenis tekanan *holding* yang menghasilkan produk ideal: *Holding* dengan tekanan tinggi namun dalam waktu yang singkat, distribusi tekanan dan cairan dalam molding akan lebih baik dan menghasilkan produk dengan kualitas lebih tinggi, perbedaan penyusutan kecil, lengkungan (*warpage*) lebih kecil dan orientasi molekul juga lebih minimal terjadi.

- [6] Information on <http://www.lyondellbasell.com>
[7] Information on <https://www.iso.org>

Referensi

- [1] Nagahanumaiah, Effects of injection molding parameters on shrinkage and weight of plastic part, Rapid Prototyping Journal 15(3):179-186 · May 2009
- [2] Robert Zabo, The Influence of Process Conditions on the Local Shrinkage of the Injection Moulded Natural Fibre Composite with Polypropylene Matrix, International Conference of Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2015), Published by Atlantis Press
- [3] Shaofei Jiang, Wei Zheng, Jiabo Zhang, Experimental Study on The Influence of Parameters on The Plastic Parts Quality of External Gas-Assisted, Appl. Math. Inf. Sci. 6 , No. 3, 665-671 (2012) / www.naturalspublishing.com/Journals.as
- [2] Islam, Aminul, Effects of holding pressure and process temperatures on the mechanical properties of moulded metallic parts, ANTEC 2013 Conference Proceedings

Referensi buku:

- [3] G. W. Ehrenstein, Polymeric Materials, Hanser, New York, 2001
- [4] Gert Burkhardt, Ulrich Hüsgen, Plastics Processing, Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany, 2002
- [5] Fischer, Jerry M.; Handbook of molded part shrinkage and warpage – Plastic Design Library – ISBN 1-884207-72-3