

# Simulation of Injection Process Parameters to Optimize PET Preform Quality Using Design of Experiment Method

Cahyo Budiyanoro

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah - Yogyakarta

Korespondensi: cahyo\_budi@umy.ac.id

**Abstract.** Injection molding is very popular process in plastic product manufacturing because its ability to produce complex and precision products. The cycle of process consist of plastization, injection, compression, cooling and product ejecting. The cycle requires combination of setting parameters to minimize product failure and to produce optimum end quality. PET preform is an initial form of bottle packaging made by Injection Molding machine before blowing in stretch blow molding process. Many indicators are used in determining the final quality of a Preform product such as: shrinkage, sink mark, product weight and cycle time. This study was targeted to obtain processing parameters data that used to produce optimum quality of PET preforms. Optimization was done on 8 cavity mold design by using Moldflow simulation software and approached by Design of Experiment method. The combination of process parameters that influencing the targeted qualities consist of three factors: melt temperature, mold temperature and holding time and there were three levels was used in each factor. The smallest shrinkage variation (<0.0010%) was obtained by combination of 257.5°C melt temperature, 75°C mold temperature and 8 to 11.6 holding time. A minimal sink mark index was generated at 257.5 °C melt temperature of, 75 °C mold temperature and 11.6 seconds holding time of. Shortest cycle time was obtained from melt temperature 257.5 °C, mold temperature 75°C and holding time 8 seconds. The combination of process parameters resulting in shrinkage, sink mark index, cycle time and optimum weight will be used as process recommendations.

**Abstrak.** *Injection molding* adalah proses yang sangat populer dalam pembuatan produk plastik karena mampu untuk menghasilkan produk yang kompleks dan presisi. Siklus prosesnya terdiri dari plastisasi, injeksi, kompresi, pendinginan dan pengeluaran produk. Siklus ini membutuhkan kombinasi pengaturan parameter untuk meminimalkan kegagalan produk dan menghasilkan kualitas akhir yang optimal. PET *preform* adalah bentuk awal kemasan botol yang dibuat oleh mesin *Injection Moulding* sebelum meniup dalam proses blow molding stretch. Banyak indikator yang digunakan dalam menentukan kualitas akhir dari produk Preform seperti: penyusutan, *sink mark*, berat produk dan waktu siklus. Penelitian ini ditargetkan untuk mendapatkan data parameter pengolahan yang digunakan untuk menghasilkan kualitas *preform* PET yang optimal. Optimasi dilakukan pada 8 rongga cetakan desain dengan menggunakan perangkat lunak simulasi Moldflow dan didekati oleh metode *Design of Experiment*. Kombinasi parameter proses yang mempengaruhi kualitas yang ditargetkan terdiri dari tiga faktor: suhu leleh, suhu cetakan dan waktu penahanan dan ada tiga tingkat yang digunakan dalam setiap faktor. Variasi penyusutan terkecil (<0,0010%) diperoleh dengan kombinasi 257,5 °C suhu leleh, suhu cetakan 75 °C dan 8 hingga 11,6 waktu penahanan. Indeks *sink mark* minimal dihasilkan pada 257,5 °C suhu leleh, 75 °C suhu cetakan dan 11,6 detik waktu penahanan. Waktu siklus terpendek diperoleh dari temperatur leleh 257,5 °C, temperatur cetakan 75 °C dan waktu tahan 8 detik. Kombinasi parameter proses yang mengakibatkan penyusutan, indeks *sink mark*, waktu siklus dan berat optimal akan digunakan sebagai rekomendasi proses.

**Kata kunci:** Taguchi, moldflow, shrinkage, optimasi, preform, injection molding

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Bahan PET banyak digunakan dalam produk komersial terutama sebagai kemasan yang dapat berbentuk botol maupun lembaran plastik. Kemasan botol dari bahan ini tidak hanya dipakai untuk minuman ringan, namun juga untuk botol bir, saus, dan produk kecantikan. Sifat – sifat yang dimiliki oleh PET mendukung fungsinya sebagai kemasan

seperti keuletan, penghalang yang baik terhadap gas dan transmisi uap air. Karena keunggulan yang dimilikinya, permintaan terhadap botol PET secara global meningkat secara signifikan. Data tahun 2013 menunjukkan bahwa produksi PET untuk botol adalah 17.25 juta ton, sedangkan pada tahun 2015 meningkat menjadi 19.69 juta ton (*Plastic Europe*, 2015).

Botol PET diproduksi dalam dua langkah. Langkah pertama adalah pembuatan preform yang diproduksi dengan proses Injection Molding. Pada tahap ini bahan baku berupa biji plastik PET dikeringkan hingga batas kandungan kelembaban yang diijinkan sebelum masuk ke proses *injection molding*, karena PET termasuk bahan yang *hygroscopic* (mudah menyerap kelembaban sekitar). PET di dalam barrel dicairkan dengan suhu sekitar 250 - 275 °C kemudian diinjeksikan ke suatu cetakan tertutup dengan tekanan dan kecepatan tinggi. Di dalam cetakan, plastik cair yang telah memenuhi rongga cetak didinginkan dengan *water chiller* hingga membentuk preform padat, dan kemudian produk dikeluarkan dari cetakan. Langkah yang kedua adalah peniupan (*blowing*) biasanya menggunakan sistem *stretch blow molding* (K. Giridhar Reddy, et. al, 2013).

Untuk kepentingan produksi massal, pembuatan preform umumnya dilakukan dengan cetakan yang mampu menghasilkan banyak produk dalam sekali siklus. *Preform* hasil proses injeksi sangat menentukan kualitas dari botol yang dibuat pada proses *stretch blow molding*. Indikator kualitas preform dapat dilihat dari nilai *Sink Mark*, berat produk dan *cycle time*. Kualitas preform dipengaruhi oleh setting parameter proses antara lain: suhu cairan, suhu cetakan dan waktu tahan (M. Vishnuvarthanan, et.al, 2013).

Tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh kombinasi parameter proses injeksi yang dapat menghasilkan kualitas produk yang optimal menggunakan *Design of Experiment* dengan metoda Taguchi dan simulasi proses injeksi. Kedua cara tersebut merupakan metode yang efisien, cepat dan tidak memerlukan banyak sumber daya namun mampu memberikan hasil yang dapat menjadi basis *real process* (M. Jan, et. al, 2016). Desain *orthogonal arrays* dalam Metode Taguchi digunakan untuk evaluasi pengaruh parameter proses injeksi melalui sejumlah percobaan (Hussin, R., et.al 2013) (Sharma P, et.al, 2005). Dari semua kombinasi parameter akan diperoleh nilai setting yang menghasilkan kualitas terbaik yang diharapkan (D. Mathivanan., 2010).

### Deskripsi Alat dan Bahan

Pada penelitian ini alat yang akan digunakan terdiri atas *hardware* dan *software*, yang berupa:

1. *Software Autodesk MoldFlow Plastic insight Software* ini adalah alat bantu simulasi untuk desain cetakan injeksi, desain bagian plastik dan proses injeksi molding yang membantu menghindari potensi cacat manufaktur lebih cepat
2. PC dengan *Processor*

Spesifikasi minimal setara dengan Intel Core i5, RAM 6 GB DDR3, VGA 2, *Harddisk* 1 TB SATA, OS minimal Windows 7.

3. *Software Minitab 14*  
Minitab adalah program aplikasi statistika yang populer dalam pengolahan data statistika teknik. Minitab membuat desain eksperimen seperti factorial dan taguchi.

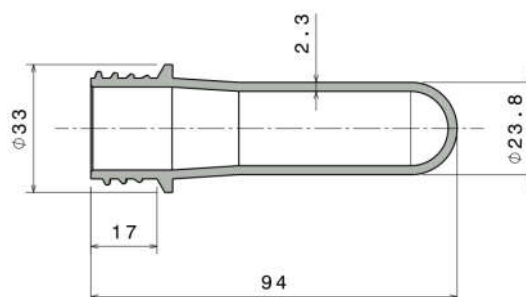
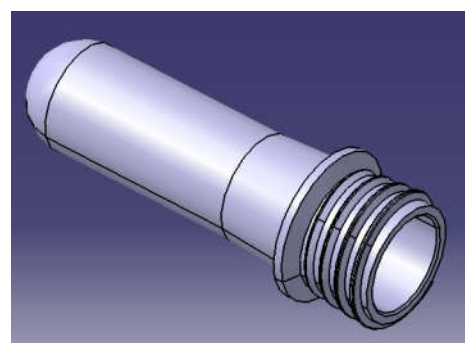
Obyek yang diteliti adalah preform untuk botol ukuran 1.5l dari bahan PET (*Polyethylene Terephthalate*) J125 buatan *Mitsui Chemicals Co Ltd*. Data sifat material terkait proses sebagai berikut:

- Titik lebur: 173 °C
  - *Melting index*: 20 g/10 min pada suhu 230 °C.
  - Massa jenis pada suhu ruang : 0.905 g/cm<sup>3</sup>
  - Rekomendasi suhu pencairan: 265 - 280 °C
  - Suhu cetakan: 90 – 120 °C
  - *Modulus Elastisitas (E)*: 3450 Mpa
  - *Specific heat*: 1738.0000 J/kg-C
  - *Thermal conductivity* : 0.2190 W/m-C
- (sumber: *Mitsui Chemicals Co Ltd*)

Simulasi proses injeksi secara virtual menggunakan mesin injeksi yang ada di data base *Autodesk Moldflow Plastic Insight* yaitu Arburg Allrounder 270 S 28 tons (22mm) dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Tekanan hydraulic maksimum: 23.4 Mpa
- Gaya cekam maksimum: 28 ton
- *Maximum injection stroke*: 68 mm
- *Diameter screw*: 22 mm

Preform (lihat gambar 1) diproses dalam cetakan 8 *cavity* yang akan menghasilkan 8 produk setiap siklus prosesnya.

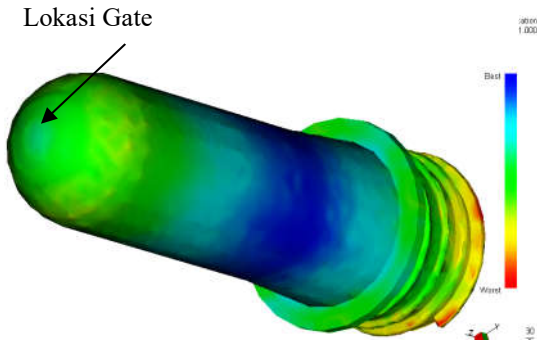


Gambar 1. Preform

**Prosedur Penelitian**

1. Penentuan Lokasi Gate

Kualitas produk injeksi sangat dipengaruhi oleh penentuan lokasi *gate*. Lokasi *gate* terbaik memberikan kemudahan dan kesetimbangan aliran plastik ke dalam cetakan.

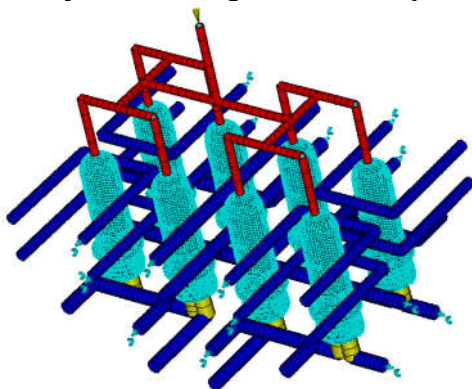


**Gambar 2.** Lokasi *gate*

Lokasi *gate* terbaik berdasarkan analisa *Mold-flow* ditunjukkan dengan warna biru, namun bentuk produk di atas memerlukan desain cetakan 3 *mold plates* dengan *central gate* sehingga tingkat kesilindrisan yang optimal dapat dicapai. Letak *gate* yang memungkinkan untuk kepentingan tersebut adalah pada ujung spherical produk (lihat gambar 2).

2. Desain *Layout Cavity* dan *Runner System*

Layout cetakan dengan 8 *cavities* diatur dua baris, masing-masing baris terdiri atas 4 *cavities* (lihat gambar 3). Sistem runner yang digunakan adalah *Hot Runner System*, dalam sistem ini runner sebagai saluran pembagi aliran dipanaskan agar plastik yang masuk melaluinya dapat dipertahankan dalam kondisi cair. Pada setiap akhir siklus proses, cetakan hanya akan mengeluarkan produk preform saja. Layout runner yang seimbang diperlukan untuk menjamin keseragaman kualitas produk.



**Gambar 3.** Desain *Layout 8 Cavities*

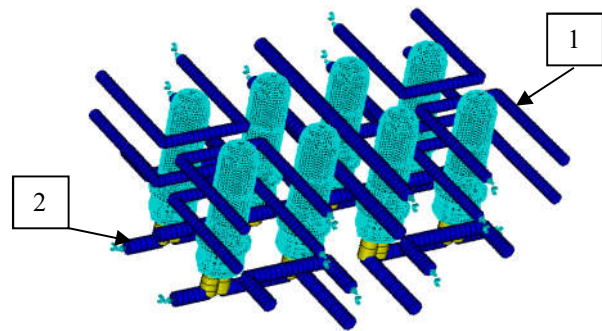
Dimensi layout sebagai berikut:

- Jarak antar *cavity*: 60 mm
- Diameter *sprue*: 6 mm
- Tinggi *sprue*: 60 mm
- Diameter *runner*: 6 mm

3. Desain *Cooling System*

Dalam siklus proses, waktu pendinginan mengambil porsi yang paling besar. Desain sistem pendinginan memberikan pengaruh yang besar terhadap *cycle time* dan kualitas akhir produk. Seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini, untuk pendinginan bagian permukaan luar produk, digunakan cooling seri (1), sedangkan sisi dalam preform didinginkan dengan sistem *Baffle* (2). Data *cooling system* adalah sebagai berikut (gambar 4):

- Diameter channel: 8 mm
- Channel roughness: 0.05 mm
- Media pendingin: air
- Suhu air masuk: 25 °C
- Reynold number: 10000



**Gambar 4.** *Layout Cooling*

4. Pengujian Simulasi DOE

*Design of Experiment* menggunakan metode *Taguchi* dan Faktorial (*Taguchi then faktorial*). Metode *Taguchi* menggunakan seperangkat matrik khusus yang disebut dengan matrik orthogonal, untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter (Soejanto, 2009). Dalam penelitian ini digunakan 3 faktor *setting parameter* yang divariasikan yaitu: suhu cairan (*melt temperature*), suhu cetakan (*mold temperature*) dan waktu tahan cairan (*holding time*). Masing – masing faktor memiliki 7 level, dengan variasi sebagai berikut:

- Peningkatan melt temperature = 7.50 °C
- Peningkatan mold temperature = 15.00 °C
- Peningkatan packing time = 2 detik

**Tabel 1.** Faktor dan level parameter

Parameter	L1	L2	L3
Melt temp (° C)	257.5	265	272.5
Mold temp (° C)	75	90	105
Injection time (det)	0.85	0.9	0.95
Holding time (det)	8	10	12
Holding profile multiplier	0.9	1	1.1

Jumlah percobaan yang dilakukan adalah 22 kali.

**Hasil dan Pembahasan**

1. Hasil ranking kriteria Taguchi

Dari simulasi *Molflow* dihasilkan pemeringkatan faktor dan nilai bobotnya untuk beberapa parameter seperti pada tabel 2 – 5.

**Tabel 2.** Pembobotan pada *Volumetric Shrinkage*

Faktor	Peringkat	Bobot (%)
<i>Holding profile</i>	1	47.3
<i>Melt temperature</i>	2	17.2
<i>Mold temperature</i>	3	7.8
<i>Holding time</i>	4	5
<i>Injection time</i>	5	2.5

**Tabel 3.** Pembobotan pada *Sink Index*

Faktor	Peringkat	Bobot (%)
<i>Holding time</i>	1	59.9
<i>Holding profile</i>	2	7.7
<i>Melt temperature</i>	3	7.7
<i>Mold temperature</i>	4	6.7
<i>Injection time</i>	5	5.6

**Tabel 4.** Pembobotan pada berat produk

Faktor	Peringkat	Bobot (%)
<i>Mold temperature</i>	1	63.9
<i>Holding profile</i>	2	24.8
<i>Melt temperature</i>	3	10.5
<i>Injection time</i>	4	0.5
<i>Holding time</i>	5	0.25

**Tabel 5.** Pembobotan pada *cycle time*

Faktor	Peringkat	Bobot (%)
<i>Holding time</i>	1	99.9
<i>Injection time</i>	2	0.05
<i>Mold temperature</i>	3	0
<i>Holding profile</i>	4	0
<i>Melt temperature</i>	5	0

Dari hasil di atas diketahui bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap *volumetric shrinkage* adalah perubahan *holding profile*. Sedangkan *sink mark* serta *cycle time* sangat dipengaruhi oleh parameter *holding time*. *Mold temperature* mengambil porsi bobot tertinggi jika dilihat dari unsur berat produk.

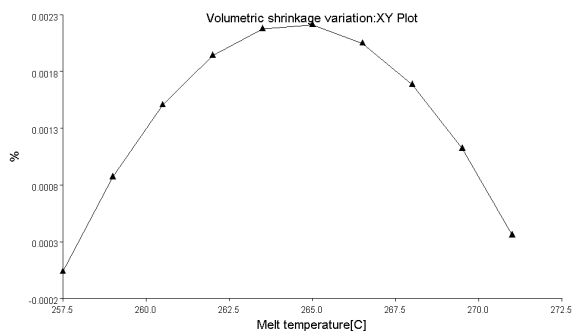
## 2. *Volumetric shrinkage*

*Volumetric shrinkage* adalah kontraksi plastik akibat perubahan suhu dari cair menjadi padat. Nilai *volumetric shrinkage* yang tinggi dapat menyebabkan *warpage*, *sink marks*, dan *internal void*. Variasi *shrinkage* dapat terjadi karena perbedaan ketebalan atau pendinginan yang tidak merata. Pada gambar di bawah ini terlihat bahwa nilai *shrinkage* tertinggi terjadi di bagian ulir yang memiliki ketebalan lebih dibanding dinding produk yang lain.

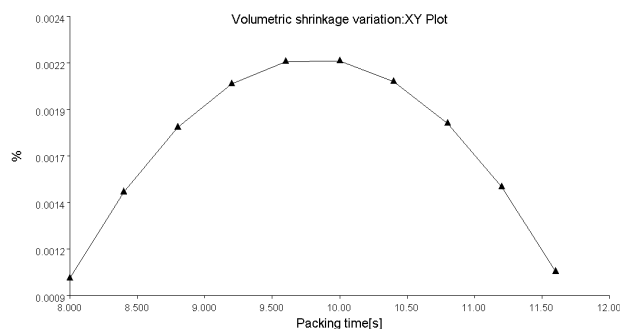
Gambar 5 menunjukkan pengaruh *melt temperature*, terhadap variasi penyusutan produk. Pada suhu 265 °C (level 2) terjadi variasi penyusutan produk yang tertinggi, sedangkan pada level 1 maupun level 3 terjadi variasi penyusutan produk yang rendah. Jadi diperlukan upaya trial atau simu-

lasi untuk mendapatkan nilai suhu pencairan yang ideal.

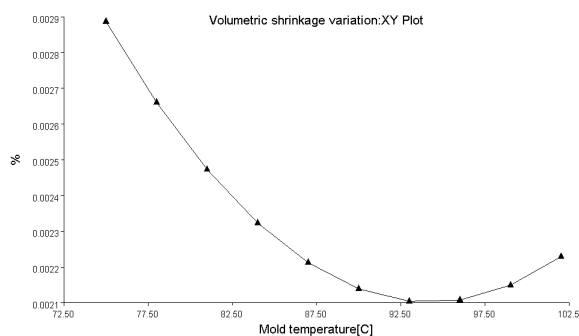
Hal serupa terlihat pada *parameter holding time*, puncak variasi *shrinkage* terlihat pada *holding time* 10 detik dengan variasi 0.0022%, sedangkan pada level 1 maupun 3 terjadi penurunan variasi (lihat gambar 6 dan 7).



**Gambar 5.** *Volumetric shrinkage vs melt temperature*



**Gambar 6.** Pengaruh *holding time vs variasi shrinkage*



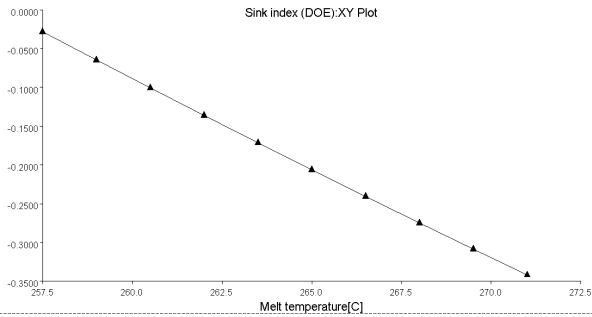
**Gambar 7.** Pengaruh *mold temperature vs variasi shrinkage*

Jika ditinjau dari parameter *mold temperature*, variasi *shrinkage* terendah dihasilkan oleh suhu cetakan 93 °C dengan variasi sebesar 0.0021%, semakin rendah suhu cetakan variasi ini menjadi semakin meningkat. Beda suhu cairan dengan suhu cetakan yang besar akan menyebabkan variasi penyusutan yang besar pula.

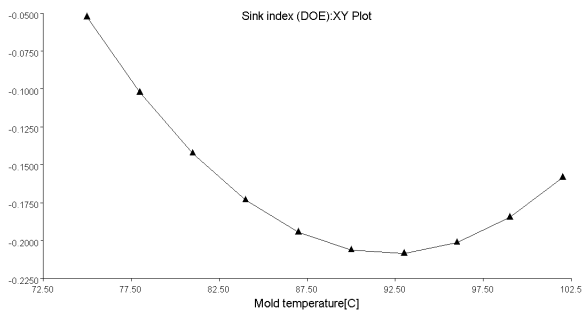
## 3. *Sink Index*

*Sink index* memberikan indikasi keberadaan dan letak *sink marks* (dan *voids*), termasuk potensi *shrinkage* yang terjadi pada lokasi dengan suhu

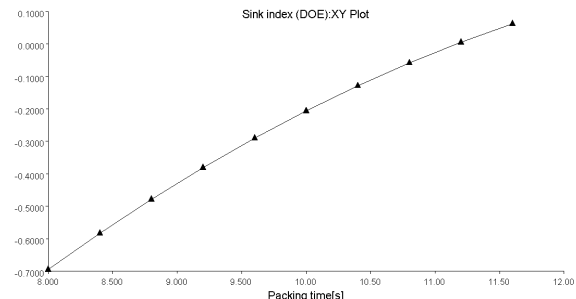
tinggi. Nilai *sink index* yang tinggi menunjukkan potensi shrinkage yang juga tinggi. Nilai minus pada hasil *sink index* menunjukkan adanya cekungan pada permukaan produk (dalam gambar di atas adalah bagian uliran *preform*).



Gambar 8. Pengaruh suhu cairan terhadap *sink index*



Gambar 9. Pengaruh suhu cetakan terhadap *sink index*



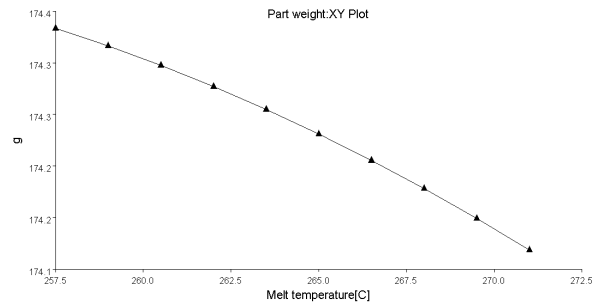
Gambar 5. Pengaruh holding time terhadap *sink index*

Seperti yang terlihat pada gambar 8, hasil *sink mark* terendah (-0.028) dihasilkan pada suhu 257.5 °C yang merupakan setelan suhu cairan terendah pada percobaan ini. Fenomena yang sama juga nampak pada suhu cetakan, hasil *sink index* terendah (-0.05) dihasilkan oleh suhu cetakan 74.9 °C (gambar 9). Ditunjukkan bahwa suhu cairan yang rendah memberikan hasil *sink index* yang rendah. Peningkatan suhu cairan akan memperpanjang waktu pendinginan sehingga *shrinkage* dan *sink marks* juga akan meningkat, sebaliknya dengan suhu cairan dan cetakan yang rendah kedalaman *sink mark* juga akan rendah (Lixia, et. al, 2008). Sebaliknya, *holding time* yang tinggi (11.6 detik) menghasilkan *sink index* terendah, yaitu pada angka 0.062 (gambar 10). Peningkatan *holding pressure* atau *holding time* dapat menurunkan kedalaman *sink mark*. Terbentuknya *sink marks* pada produk

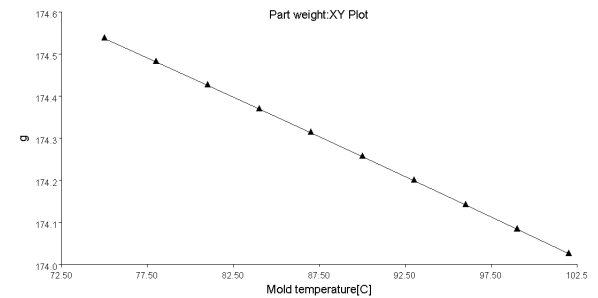
injeksi disebabkan terutama oleh penyusutan bahan plastik, *holding pressure* dan *holding time* memberikan kompensasi bahan yang lebih ke dalam rongga cetak dan mampu menurunkan sink mark (Lixia, et. al, 2008).

#### 4. Pengaruh pada berat *preform*.

Berat produk juga menjadi salah satu indikasi kualitas akhir dari suatu produk. Dalam pertimbangan ekonomis, peningkatan berat produk berarti peningkatan kebutuhan material dan tentunya berhubungan langsung dengan besarnya biaya pembelian bahan baku. Simulasi proses dilakukan untuk mendapatkan nilai setting parameter yang menghasilkan berat produk minimal.



Gambar 11. Pengaruh suhu cairan terhadap berat *preform*



Gambar 6. Pengaruh suhu cetakan terhadap berat produk

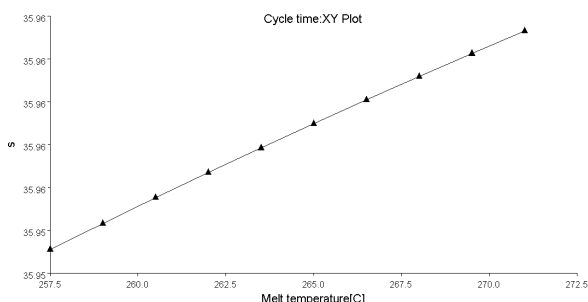
Gambar 11 dan 12 menunjukkan bahwa berat produk yang rendah dapat dicapai dengan penyetelan suhu cairan dan suhu cetakan yang tinggi, sedangkan pada holding time tidak terlihat pengaruhnya terhadap berat. Ini berarti bahwa ketiga level parameter *holding time* sudah melebihi *sealing point* dari produk *preform*.

#### 5. Waktu siklus proses

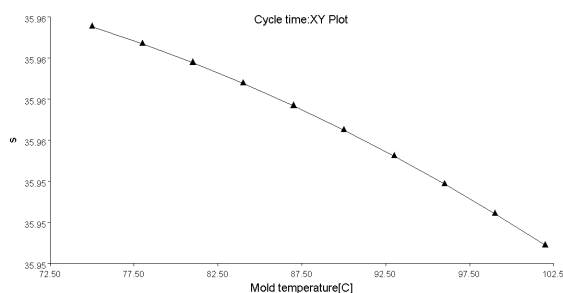
Proses injeksi plastik adalah proses yang bersiklus. Diawali dari plastisasi, kemudian cairan diinjeksikan ke dalam cetakan. Cairan didalam cetakan ditahan dengan tekanan *holding* dan secara simultan terjadi proses pendinginan, kemudian cetakan akan terbuka dan produk dikeluarkan, siklus ini akan berulang. Meskipun siklus proses berlangsung singkat namun karena pada umumnya produk yang dihasilkan dalam jumlah yang sangat banyak, maka upaya mempersingkat waktu siklus

akan sangat berpengaruh pada harga jual produk dan keuntungan yang diperoleh oleh industri.

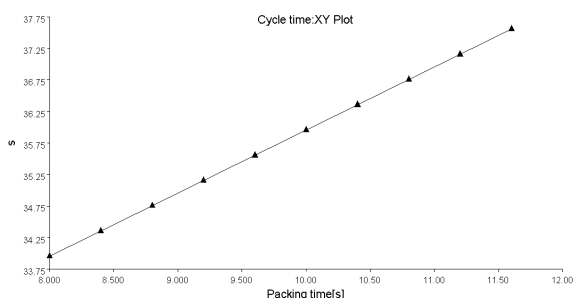
Seperti ditunjukkan pada gambar 13 – 15, suhu cairan yang tinggi serta suhu cetakan yang rendah akan mempersingkat waktu siklus. Sebagian besar porsi waktu siklus diambil oleh proses pen-dinginan (BASF, 2007), suhu cairan yang tinggi pada suhu pendinginan yang rendah akan menyebabkan waktu pendinginan menjadi lebih panjang. Tentu saja *holding time* yang singkat akan mempersingkat waktu siklus, seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 7. Pengaruh suhu cairan terhadap waktu siklus proses



Gambar 8. Pengaruh suhu cetakan terhadap waktu siklus proses

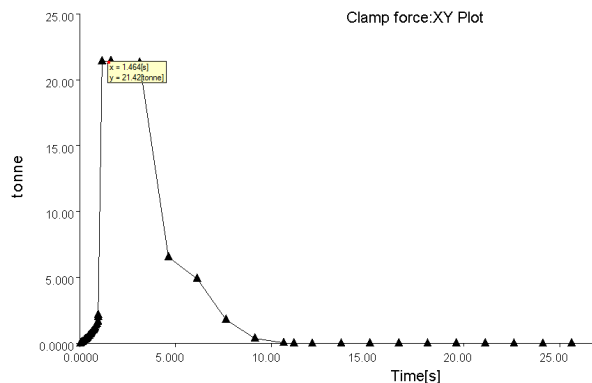


Gambar 9. Pengaruh *holding time* terhadap waktu siklus proses.

### 6. Clamping force

*Clamping force* adalah gaya dari bagian unit pengecam yang digunakan untuk menahan cetakan agar tetap tertutup saat cairan plastik diinjeksikan ke dalamnya. Analisa gaya *clamping* dapat membantu bagian produksi dalam memilih jenis dan ukuran mesin. Berdasarkan analisa *moldflow* pada gambar 16, gaya *clamping* minimal yang diperlukan untuk proses 8 *cavity preform* adalah 21.3 ton, namun

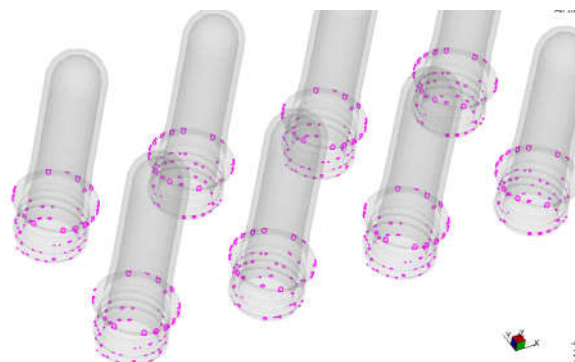
untuk kepentingan keamanan dipilih mesin dengan kapasitas pengecaman 28 ton.



Gambar 10. Kebutuhan gaya cekam mesin

### 7. Air trapped

Pada saat cairan plastik diinjeksikan ke dalam cetakan, udara di dalam rongga cetak harus mendapatkan akses keluar, jika tidak maka udara dapat terjebak di dalam produk dan menjadikan cacat pada produk tersebut. Gambar 17 menunjukkan prediksi lokasi udara yang terjebak di dalam produk. Untuk mengeliminasi air trap, perlu dirancang ventilasi udara pada daerah tersebut.



Gambar 11. Prediksi udara yang terjebak pada *preform*

### Kesimpulan

1. Faktor yang paling berpengaruh pada variasi *shrinkage* adalah *holding profile*, sedangkan *sink mark index* dan *cycle time* sangat dipengaruhi oleh *holding time*. Suhu cetakan yang tepat dapat meminimalkan berat *preform* yang dicetak.
2. Variasi penyusutan terbesar terjadi pada kondisi parameter proses:
  - Suhu cairan 265 °C dengan variasi 0.0022%
  - Suhu cetakan 75 °C dengan variasi 0.003%
  - *Holding time* 10 detik dengan variasi 0.0022%
3. *Sink index* yang rendah dihasilkan oleh suhu cairan yang rendah, suhu cetakan yang rendah dan *holding time* yang panjang.

4. Berat produk yang rendah dapat dicapai dengan penyetelan suhu cairan dan suhu cetakan yang tinggi.
5. Suhu cairan yang tinggi pada suhu pendinginan yang rendah akan menyebabkan waktu pendinginan menjadi lebih panjang.
6. Proses pembuatan preform 8 *cavity* memerlukan mesin dengan kapasitas *clamping* 28 ton.

#### Referensi

- [1] Plastic Europe, 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data.
- [2] GiridharReddy, K., Rajagopal, K., 2013. Blow mould tool design and manufacturing process for 1 litre pet bottle, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.
- [3] Vishnuvarthanan, M., Panda, R. and Ilangovan, S., 2013. Optimization of Injection Molding Cycle Time Using Moldflow Analysis, Middle-East Journal of Scientific Research 13 (7), 944-946.
- [4] Jan, M., Khalid, M.S., Awan, A.A., Nisar, S., 2016. Optimization of injection molding process for sink marks reduction by integrating response surface design methodology and taguchi approach, Journal of Quality and Technology Management, Volume XII, Issue I.
- [5] Hussin, R., Mohd Saad, R., Hussin, R., Hafiezal, M.R.M., Fairuz, M.A., Optimization of the plastic injection molding parameters for sport equipment by using design of experiment, International Review of Mechanical Engineering (IREME), 7 (3), 2013
- [6] D. Mathivanan, M.N.a.R.V., Minimization of sink mark defects in injection molding process – Taguchi approach. International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 2 ,No. 2: p. pp. 13-22, 2010.
- [7] Jiang, M. and Komanduri, R., 1997. Application of Taguchi method for optimization of finishing conditions in magnetic float polishing (MFP). Wear, Vol. 213, 59–71.
- [8] Lixia Wang, Qian Li, Changyu Shen, and Shufen Lu, Effects of Process Parameters and Two-Way Interactions on Sink Mark Depth of Injection Molded Parts by Using the Design of Experiment Method, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2008
- [9] Ehrenstein, G.W., 2001. Polymeric Materials, Hanser, New York.
- [10] Gert Burkhardt, Ulrich Hüsgen, 2002. Plastics Processing, Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany.
- [11] Fischer, J.M., Handbook of molded part shrinkage and warpage – Plastic Design Library – ISBN 1-884207-72-3.
- [12] BASF, 2007. Estimating cooling times in injection molding, BASF Corporation.
- [13] Informasi dari: *Autodesk Moldflow Plastic Insight*