

PENGARUH TEMPERATUR DAN TEKANAN TERHADAP HASIL CETAKAN POLYPROPYLENE MENGGUNAKAN MESIN INJECTION MOLDING VERTIKAL

*The Influence of Temperature and Pressure on the Results of Polypropylene Molding
Using a Vertical Injection Molding Machine*

Didik Sugiyanto^{1*}, Yefri Chan¹, Angga Taoupik¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Darma Persada, Indonesia.

* Email Korespondensi : didik_sugiyanto@unsada.ac.id

Artikel Info - : Diterima : 14-05-2023; Direvisi : 22-06-2023; Disetujui : 23-06-2023

ABSTRAK

Pada saat ini penggunaan produk plastik semakin meningkat di berbagai bidang, dikarenakan tingkat fleksibilitasnya dan biaya produksi yang rendah. Proses *injection molding* merupakan teknik yang sering digunakan dalam pembentukan produk yang berbahan plastik. Fokus masalah dari penelitian ini adalah pengaruh suhu pemanasan dan tekanan hidraulik terhadap hasil cetakan bentuk kotak dan *gear* menggunakan proses *injection molding*. Metode pengujian yang digunakan yaitu menggunakan variasi suhu dan tekanan hidraulik untuk menghasilkan bentuk cetakan yang maksimal pada bentuk kotak dan *gear*. Dari hasil pengujian *injection molding* untuk produk *gear* hasil maksimal dengan *melt temperature* 368°C, *mold temperature* 40°C, *pressure injection* 490 Psi, terdapat kegagalan pada hasil pengujian tersebut akibat keluarnya cairan yang tidak secara langsung keluar untuk memenuhi cetakan (*mold*), karena tekanan dari *hydraulic jack* harus bertahap.

Kata Kunci: Temperatur, Polypropylene, Injection Molding Vertikal

ABSTRACT

Currently, the use of plastic products is increasing in various fields, due to their flexibility and low production costs. The *injection molding* process is a technique that is often used in the formation of plastic products. The focus of the problem of this study is the effect of heating temperature and hydraulic pressure on the results of box and gear molds using the *injection molding* process. The test method uses variations in temperature and hydraulic pressure to produce the maximum mold shape in the box and gear. From the results of the *injection molding* test for full yield gear products with a *melt temperature* of 368°C, a *mold temperature* of 40°C, and an *injection pressure* of 490 Psi, there was a failure in the test results due to the release of liquid which did not come out directly to fill the mold, because the pressure from the *hydraulic jack* must gradually.

Keywords: Temperature, Polypropylene, Vertical Injection Molding

1. Pendahuluan

Cetakan injeksi banyak digunakan untuk produksi massal komponen termoplastik dengan geometri kompleks dan toleransi dimensi yang ketat [1]. Adanya cacat sebuah produk dengan bahan baku plastik sering dijumpai dalam produk yang beredar di pasaran saat ini, berbagai faktor penyebab cacat produk bahan dasar plastik dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya kualitas dari bahan baku dan proses pembentukan produk tersebut. Berkaitan dengan proses pembentukan produk menggunakan proses *injection molding* beberapa hal penyebab cacat produk didasarkan pada parameter temperatur dan tekanan pada barrel, oleh sebab itu proses *injection molding* perlu adanya *setting* parameter *molding* yang tepat [2].

Kualitas bahan sangat penting dalam proses *injection molding* untuk memaksimalkan hasil cetakan dan meminimalkan biaya produksi, dan masalah ini lebih berkaitan dengan bahan baku plastik yang digunakan [3]. Perubahan dimensi karena penyusutan adalah satu masalah yang paling penting dalam produksi bagian plastik menggunakan proses *injection molding* [4]. Tekanan barel adalah salah satu indikator utama dari kondisi *injection molding* sehingga bisa digunakan untuk prediksi kualitas dalam proses *injection molding* [5].

Proses *injection molding* merupakan teknik yang sering digunakan dalam pembentukan produk yang berbahan plastik, karena dengan menggunakan metode tersebut bisa membuat bentuk fitur yang sulit untuk dibentuk dibandingkan dengan metode yang lain [6]. Ada beberapa metode yang lazim digunakan untuk memproduksi komponen menggunakan bahan plastik, yaitu *blow molding*, *extrusion molding*, *transfer molding*, dan *injection molding* [7].

Injection molding adalah proses dimana bahan termoplastik dipanaskan dan meleleh di silinder dan kemudian diinjeksikan ke dalam dan mengeras kembali di dalam *mold* [8], walaupun metode ini juga bisa digunakan untuk termoset [9]. Pengaruh parameter proses injeksi seperti suhu leleh, batas tekanan, waktu tahan, waktu penekanan, suhu cetakan, kecepatan injeksi, dan ketebalan dinding cetakan dapat mempengaruhi timbulnya beberapa jenis cacat.

Proses cetakan injeksi adalah proses pembuatan benda kerja dari gabungan bahan berupa butiran yang ditempatkan ke dalam suatu penampung (*hopper*) kemudian dimasukkan ke silinder injeksi lalu dialirkan melalui *nozzle* dan *sprue bushing* ke dalam rongga cetakan (*cavity*) dari cetakan tertutup. Kemudian didinginkan beberapa saat, cetakan (*mold*) dibuka dan produk akan dilepaskan dari cetakan ditolak dengan bantuan *ejector* [10].

Plastik telah mengambil peran sebagai teknologi yang sangat penting, hal ini disebabkan oleh sifat-sifatnya yang ringan, tahan terhadap kelembaban dan korosi, mudah di bentuk serta mudah diproses [11]. Sedangkan timbulnya cacat produk mengakibatkan biaya produksi yang tinggi serta tingkat operasional yang kurang efisien karena banyak produk perlu didaur ulang serta jumlah produk akhir yang dihasilkan menurun [12]. Cacat produk yang umum terjadi pada metode *injection molding* adalah *voids*, *surface blemish*, *short-shot*, *flashing*, *jetting*, *flow marks*, *weld lines*, terbakar dan *warping* [13].

Mold adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan produk, yang salah satunya adalah pembentukan produk dari bahan plastik dan dilakukan pada jenis mesin injeksi. Untuk menghasilkan sebuah *mold* secara tepat, tentunya banyak faktor yang harus dipertimbangkan sehingga produk yang dihasilkan dapat memenuhi standar kualitas yang diinginkan secara optimal baik itu dari kepresisian dimensi, kompleksitas geometri, maupun efisiensi proses [14][15].

Perlunya adanya sebuah penelitian yang berkaitan dengan pengaruh temperatur dan tekanan terhadap hasil cetakan menggunakan bahan *polypropylene* menggunakan sebuah mesin *injection molding* dengan model vertikal bisa menjadikan referensi bagi industri manufaktur sebagai pertimbangan dalam pembuatan sebuah produk.

2. Metodologi Penelitian

2.1. Bahan dan Alat Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian mesin *injection molding* vertikal ini dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2 sebagai berikut.

Tabel 1. Alat Yang Digunakan Dalam Rancang Bangun Mesin *Injection Molding* Vertikal

Name	Quantity
Mesin gerinda	1
Mesin bor	1
Mata Bor 10mm	1
Set kunci L	1
Per/pegas	3
Heater	1
Temperature control	1
Tabung pemanas	1
Pressure gauge	1
Hydraulic jack	1
Nepel	3
Ragum toggle clamp	2
Besi pegangan per	2

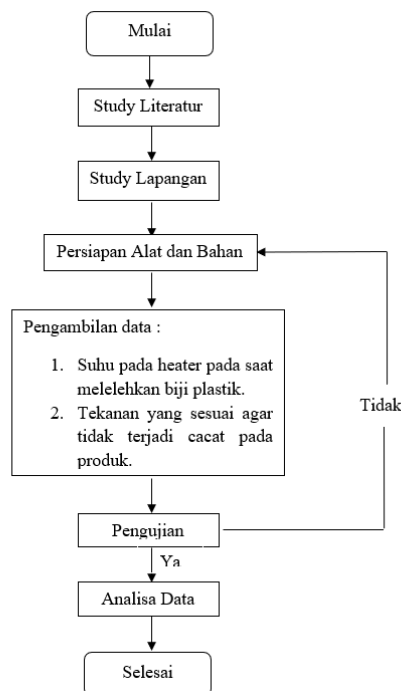
Tabel 2. Bahan Yang Digunakan Dalam Rancang Bangun Mesin *Injection Molding* Vertikal.

Name	Model-Size	Quantity
<i>Poly Propylene (PP)</i>	Biji Plastik	10 kg
<i>Aluminium profile</i>	35 × 35 × 1,8 mm	1
	45 × 45 × 1,8 mm	1
<i>Carbon steel</i>	S50C	5
<i>Bolt</i>	M5 × 10	8
	M5 × 8	4

2.2. Langkah Penelitian

2.2.1 Diagram Alir Penelitian

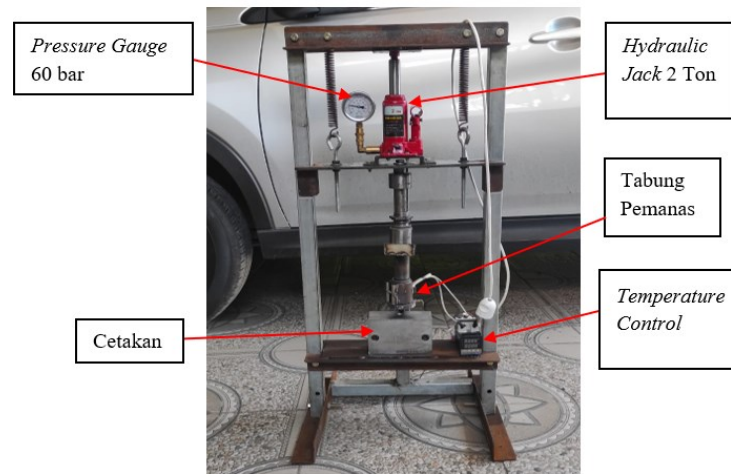
Alur penelitian secara lengkap disajikan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2.2 Desain Mesin Injeksi *Molding* Vertikal

Desain alat injeksi *molding* yang telah di kerjakan sampai alat tersebut bisa di gunakan sebagai bahan penelitian, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Desain Pembuatan Mesin Injeksi *Molding* Vertikal

Berikut adalah proses cara kerja mesin injeksi *molding*:

- 1) Proses pengoperasiannya alat mesin injeksi *molding* ini yaitu dengan menghubungkannya dengan sumber arus energi listrik.
- 2) *Heater*: Proses *heater* mesin injeksi plastik ini menggunakan daya elektrik, yaitu dengan *band heater* bertegangan 200 watt dengan diameter 42mm dan panjang 55mm, untuk bisa menghasilkan panas yang maksimal memanaskan biji plastik. Dan menggunakan *nozzle* dengan diameter 3mm sebagai lubang Pengeluaran Cairan plastik.
- 3) *Temperature control*: Umumnya di fungsikan sebagai regulator temperatur suatu proses, baik proses pemanasan maupun pendinginan. *Setting temperature* mencapai suhu yang di tentukan.
- 4) Tabung pemanas: Fungsi dari tabung pemanas adalah tempat untuk melelehkan biji plastik yang telah di masukan melalui *hopper* sampai kapasitas di dalam pipanya penuh.
- 5) *Pressure gauge*: Salah satu *part* atau perkakas yang mempunyai fungsi sebagai indikator dari ukuran suatu tekanan (air, *steam*, *oil*, angin, bahan bakar, bahan cair kimia, dll.)
- 6) *Hydraulic jack*: Merupakan alat bantu angkat untuk benda yang berat. *Hydraulic jack* tidak hanya memiliki fungsi sebagai alat pengangkat untuk kendaraan, tetapi bisa difungsikan sebagai alat bantu angkat dan tekan untuk mesin pres.
- 7) *Cetakan/mold*: Tempat masuknya cairan biji plastik yang sudah mencair ke cetakan agar di cetak kembali sesuai dengan bentuk produk yang di inginkan.

Variasi tekanan injeksi juga mempengaruhi pada pengisian produk. Pada pengujian pengaruh tekanan terhadap *fill time* dan cacat, *melt temperature*, dan *mold temperature*. Berdasarkan hasil pengujian sebelumnya [16], serta eksperimen data variasi data tekanan dapat terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh Variasi Tekanan

<i>Melt temperature</i>	300-365 °C
<i>Mold temperature</i>	40 °C
<i>Pressure injection</i>	200,210,220,230,390 dan 490 Psi
<i>Diameter runner</i>	3 mm
<i>Jenis gate</i>	<i>Edge</i>

Selanjutnya untuk data eksperimen pengaruh variasi *temperature* dapat terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengaruh Variasi Tekanan




<i>Melt temperature</i>	200, 250, 300, 350, 352, 354, 355, 358, 359, dan 363 °C
<i>Mold temperature</i>	40 °C
<i>Pressure injection</i>	200-230 Psi
<i>Diameter runner</i>	3 mm
<i>Jenis gate</i>	<i>Edge</i>

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengujian menggunakan Alat Injeksi *Molding*

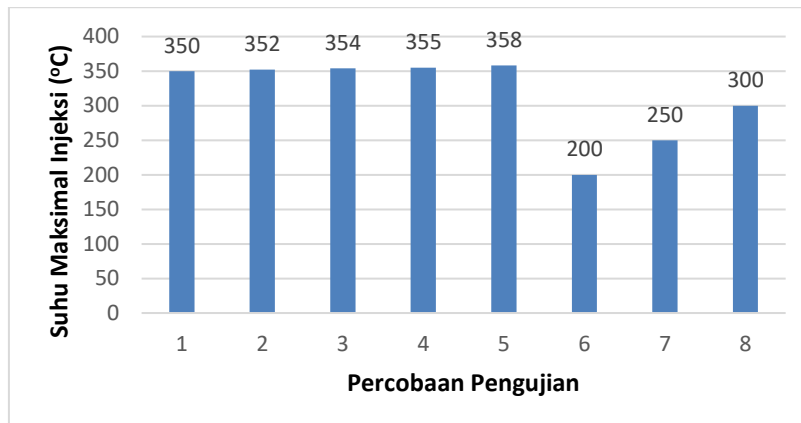
Dalam Pengujian ini akan mengambil data dari hasil produk cetakan *gear* dengan suhu, tekanan, dan massa. Pada pengujian ke 2 suhu yang digunakan berselisih 50 dan hasil yang di dapatkan lebih baik dari pengujian.

Tabel 5. Hasil Pengujian

No	Waktu (menit)	Suhu (°C)	Tekanan (Psi)	Massa (g)	Hasil produk
1	10	200	200	30	
2	10	250	390	15	
3	10	300	490	15	

Pada penelitian di atas di dapatkan hasil cetakan yang hampir memenuhi *mold*, namun sebelum memenuhi *mold* biji plastik yang sudah masuk ke *mold* sudah mengering terlebih dahulu, sehingga hanya bisa mendapatkan hasil seperti di gambar nomor 1 pada Tabel 5.

Gambar 3 sebagai berikut adalah grafik hasil dari data yang didapat dari variasi suhu dalam 8 kali pengujian.



Gambar 3. Grafik Hasil Data Percobaan Terhadap Suhu Maksimal Plastik Sebelum Mengering

Pada penelitian dari 8 kali percobaan, variasi suhu yang digunakan seperti pada grafik. Pada percobaan 1 sampai dengan 5 perbedaan suhu tidak jauh berbeda karena pada saat memasukkan biji plastik hanya membutuhkan waktu 4 - 7 menit untuk mencair kembali. Karena suhu yang di dapatkan sudah tinggi. Namun untuk percobaan yang ke 6 sampai 8 suhu diatur dengan perbedaan 50 °C.

3.1.1. Perhitungan Jarak *Plasticizing* pada Proses Pembuatan Hasil Cetakan Gear

Jari-jari screw (r) = 12,7 mm

Berat produk termasuk *runner* (W) = 11,25 gr

Berat jenis material PP (w) = 0,75 gr/cm³) = 0,00075 gr/mm³

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

$$A = 3,14 \times 12,7^2 \\ = 506,45 \text{ mm}^2$$

$$L = W : (w \times A) \\ = 11,25 \text{ gr} : (0,00075 \text{ gr/mm}^3 \times 506,45 \text{ mm}^2) \\ = \frac{11,25 \text{ gr}}{3,798 \text{ gr/mm}^3} \\ = 2,962 \text{ mm}^3$$

Hasil perhitungan jarak *plasticizing* adalah 2,962 mm³.

3.1.2. Perhitungan Penyusutan (*Shrinkage*) pada Proses Pembuatan Hasil Cetakan Gear

S = Nilai (*shrinkage*) penyusutan

L_m = Ukuran panjang *mold*

L_p = Ukuran panjang produk

Nilai *shrinkage* (S) dapat dihitung sebagai berikut.

$$S = \frac{L_m - L_p}{L_m} \times 100\% \quad (2)$$

$$= \frac{14 - 6,5}{14} \times 100\%$$

$$S = 52,857\%$$

Hasil perhitungan penyusutan (*shrinkage*) adalah 52,857%.

3.1.3. Perhitungan Kecepatan Aliran Kalor pada Proses Pembuatan Hasil Cetakan Gear

K = 0,15 (W/m°C)

l = 0,02 (m)

A = 0,007 (m²)

Δt = (350-27)

$$Q = K \times A \times \frac{\Delta t}{l} \quad (3)$$

$$= 0,15 \times 0,007 \times \frac{323}{0,02}$$

$$= 16,957 \text{ Watt}$$

Hasil perhitungan kecepatan aliran kalor adalah 16,957 Watt.

Tabel 6 sebagai berikut adalah hasil perhitungan nilai rata-rata dari pengujian dengan variasi temperatur.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Rata-Rata Data Pengujian

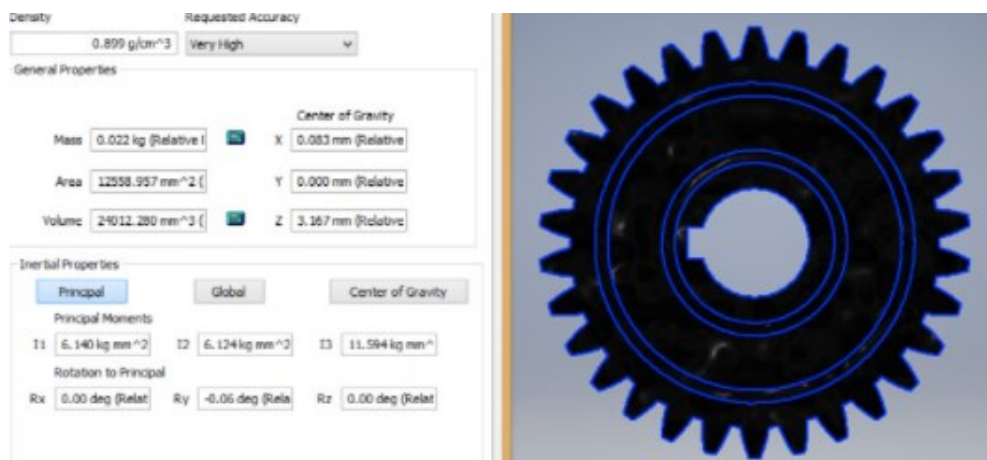
Temperatur dinding* (°C)	Temperatur aliran bebas** (°C)	Kalor (Joule)
352	27	17,062
354	27	17,167
355	27	17,22
358	27	17,377
200	34	8,71
250	34	11,34
300	34	13,965
Rata – Rata		14,975

*T₂

**T₁

3.1.4. Volume Produk

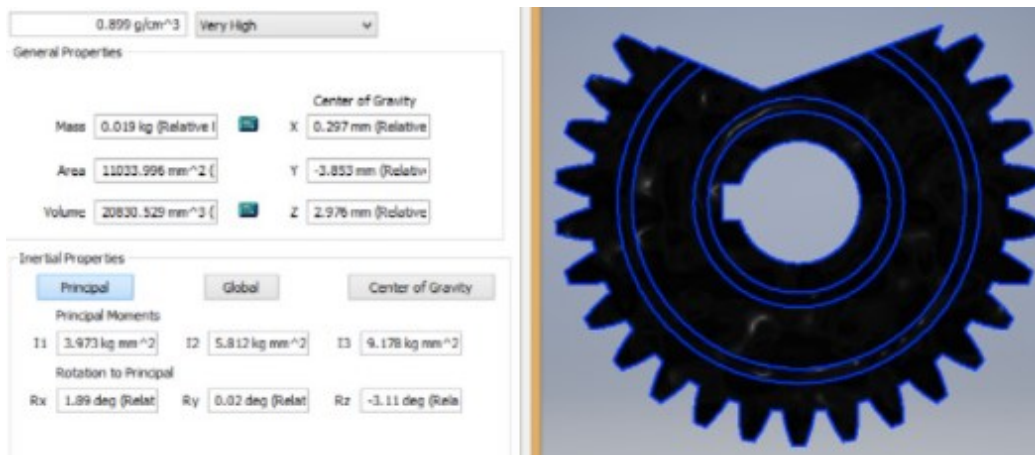
Volume produk cetakan *gear* apabila cairan biji plastik memenuhi *mold* sebesar 24012,280 mm³ dengan menggunakan Autodesk Inventor dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Gambar Volume Produk

3.1.5. Volume Produk yang Hampir Memenuhi *Mold*

Volume produk hasil cetakan yang belum memenuhi *mold* sebesar 20.830,529 mm³ dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Gambar Volume Cacat Produk

3.1.6. Cacat (*Defect*) yang Terjadi

Berikut adalah cacat yang terjadi pada hasil cetakan setelah di uji coba.

1. *Short shot*

Short shot adalah kondisi dimana kapasitas plastik tidak mampu memenuhi kapasitas cetakan atau lelehan plastik pada saat diinjeksikan mengeras sebelum memenuhi cetakan. Cacat *short shot* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Cacat *Short Shot*

2. *Air trap*

Air trap adalah gelembung udara yang terperangkap dalam produk. Biasanya terjadi pada saat proses injeksi plastik ke dalam *mold*. *Air trap* dapat terjadi karena gas tercampur dengan bahan cair dalam silinder/barel. *Air trap* terjadi karena penempatan *gate* yang kurang tepat sehingga mengakibatkan adanya uap yang terjebak ditunjukkan pada Gambar 7.

**Gambar 7.** Cacat Air Trap

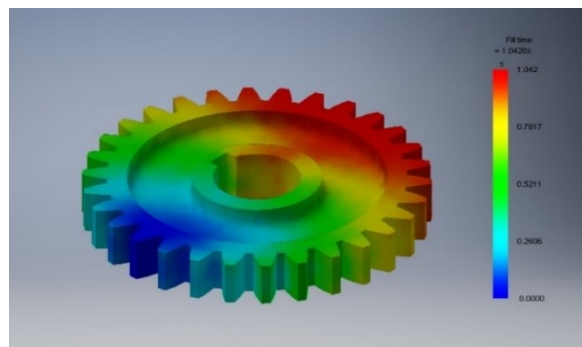
Penyebab dari cacat *short shot* yang terjadi disebabkan karena pengaruh suhu pemanasan yang kurang, tekanan proses injeksi yang terlalu lambat dan proses pendinginan material yang terlalu lambat. Sedangkan untuk air trap disebabkan tekanan proses injeksi yang terlalu lambat dan proses pendinginan material yang terlalu lambat.

3.2 Part Fill Analysis pada Autodesk Inventor

Dengan *software* Autodesk Inventor dapat diketahui hasil analisa dan simulasi penuhnya cetakan plastik dengan diasumsikan Titik leleh material biji *plastic polypropylene* dengan suhu 361°C yang masuk pada cetakan plastik tersebut. Setelah dimasukkan data Titik leleh biji plastik, maka dapat diketahui berapa waktu yang diperlukan untuk penuhnya cetakan tersebut dan tekanan berapa agar bisa masuknya cairan plastik. Dalam analisis ini *part* modeling plastik dapat dilihat pada gambar-gambar di bawah untuk mengetahui secara keseluruhan waktu penuhnya cetakan, tekanan Injeksi, dan *clampforce area*.

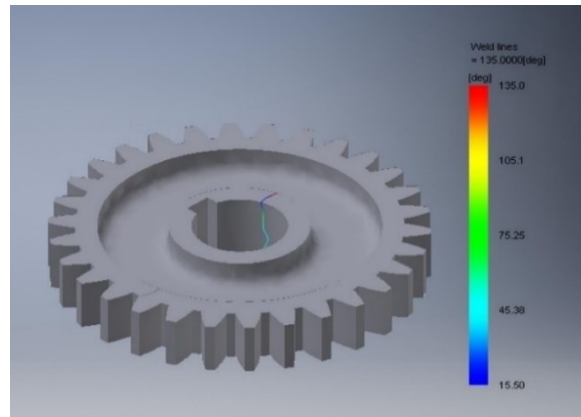
3.2.1. Fill Time

Berdasarkan pada hasil *part fill analysis*, dapat diketahui waktu pengisian (*fill time*) pada cetakan *gear* dan cetakan kotak dengan titik lebur biji plastik sebesar 361°C . Di bawah ini pada Gambar 8. dari hasil Analisa diketahui *fill time* untuk cetakan *gear* sebesar 1,04s.

**Gambar 8.** Fill Time Pada Produk Plastik Gear

3.2.2. Weld Line

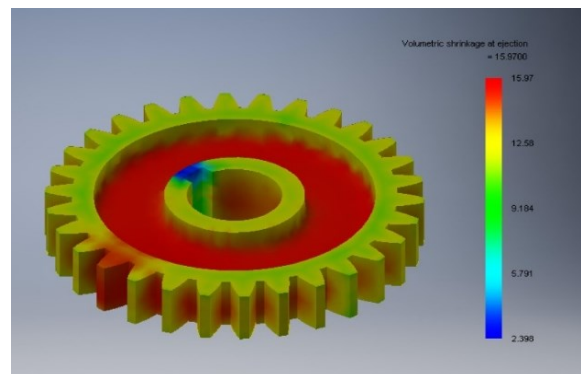
Analisa produk plastik pada cetakan dapat di analisa untuk cacat produk kategori *weld line* pada *part fill analysis*, *weldline* pada produk cetakan *gear* sebesar $135,0^{\circ}$ deg yang ditunjukkan pada Gambar 9 di bawah ini.



Gambar 9. *Weld lines* Produk Plastik Gear

3.2.3. Part Shrinkage Analysis

Dengan *Software* Autodesk Inventor dapat diketahui hasil analisa cacat coran penyusutan pada cetakan (*shrinkage*) pada produk cetakan plastik pada aplikasi *mold design* di Autodesk Inventor. Berikut dapat dilihat pada Gambar 10 *shrinkage* pada produk gear di bawah ini.



Gambar 10. *Shrinkage* Pada Produk Plastik Gear

Pada pengujian alat ini didapatkan hasil *injection molding* untuk produk gear dengan *melt temperature* 200-368°C, *mold temperature* 40°C, *pressure injection* 200-490 Psi. Terjadinya cacat produk berupa tidak terpenuhinya bentuk benda secara lengkap sesuai cetakan sebesar 100%. Cacat *short shot* yang terjadi ini menyebabkan keseluruhan produk akhir tidak dapat digunakan dan harus di daur ulang. Hal ini dikarenakan tekanan injeksi yang lemah dan/atau suhu injeksi yang terlalu rendah sehingga material plastik tidak dapat memenuhi cetakan.

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian *injection molding* untuk produk gear dengan *melt temperature* 200-368°C, *mold temperature* 40°C, *pressure injection* 200-490 Psi. Terdapat kegagalan pada hasil pengujian tersebut akibat keluarnya cairan yang tidak secara langsung keluar untuk memenuhi *mold/cetakan*, karena tekanan dari *hydraulic jack* harus bertahap. Sedangkan hasil untuk produk kotak dengan *melt temperature* 200-300°C, *mold temperature* 40°C, *pressure injection* 150-280 Psi.

5. Daftar Pustaka

- [1] J. C. Chen, G. Guo, and W. N. Wang, 2020, "Artificial Neural Network-Based Online Defect Detection System with In-Mold Temperature and Pressure Sensors for High Precision Injection Molding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, pp. 2023–

- 2033, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06011-4.
- [2] H. Yanto, I. Saputra, and S. W. Satoto, "Analisa Pengaruh Temperatur dan Tekanan Injeksi Molding terhadap Cacat Produk," *Jurnal Integrasi*, vol. 10, no. 1, pp. 1-6, 2018, doi: 10.30871/ji.v10i1.641.
- [3] A. Akbarzadeh and M. Sadeghi, "Parameter Study in Plastic Injection Molding Proses using Statistical Methods and IWO Algoritim," *International Journal Modeling and Obtimization*, vol. 1, no. 2, pp. 141-145, 2011.
- [4] J. Y. Chen, J. X. Zhuang, and M. S. Huang, "Monitoring, Prediction and Control of Injection Molding Quality Based on Tie-Bar Elongation," *J. Manuf. Processes*, vol. 46, pp. 159-169, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.09.005.
- [5] M. S. Huang, K. C. Ke, and C. Y. Liu, "Cavity Pressure-Based Holding Pressure Adjustment for Enhancing the Consistency of Injection Molding Quality," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, no.18, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1002/app.50357.
- [6] J. A. Brydson, "Plastics Materials Seventh Edition." Butterworth Heinemann, Oxfords, 1999.
- [7] A. Permono, "Mengenal Polimer dan Polimerisasi," *Gadjah Mada University Press, Yogyakarta*, 2015.
- [8] J. H. Han and Y.C. Kim, "Study on Effect of Mold Temperature on the Injection Molded Article," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 62, no. 2, pp. 1271- 1274, 2017, doi: 10.1515/amm-2017-0191.
- [9] D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. V. Rosato, "Plastic Product Material and Process Selection Handbook," 2004, doi: 10.1016/b978-1-85617-431-2.x5000-2.
- [10] F. Fadhlurrohman, K. Umuran, A. Affandi, H. Nurdin, and A. Rudi, "Pengaruh Suhu Cetakan terhadap Produk Plastik Berbahan Polypropylen (PP) pada Injection Molding," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no.1, pp. 39-45, 2022.
- [11] I. Mujiarto, "Sifat dan Karakteristik Material Plastik dan Bahan Adiktif," *Jurnal Traksi*, vol. 3, no.2, 2005.
- [12] D. Zulianto, "Analisa Pengaruh Variasi Suhu Plastik terhadap Cacat Warpaga dari Produk Injection Molding Berbahan PolyProphylene (PP)," *Tugas Akhir Tesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 2015.
- [13] S. M. M. Yusoff, J. M. Rohani, W. H. W. Hamid, and E. Ramly, "A Plastic Injection Molding Process Characterisation using Experimental Design Technique: A Case Study," *Jurnal Teknologi*, vol. 41, no. A, pp. 1-16, 2004.
- [14] S. Saifuddin, R. Usman, and Z. Zuhaimi, "Pembuatan Gelas dengan Bahan Polypropylene dengan Menggunakan Cetakan Plastik," *Jurnal Polimesin*, vol. 16, no. 2, pp. 30-38, 2018.
- [15] H. S. Kim and S. H. Chang, "Simulation of the Compression Molding Process for Long-Fiber Reinforced Thermoset Composites Considering Fiber Bending," *Compos. Struct.*, vol. 230, pp. 111514, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111514.
- [16] B. Ozelcik, A. Ozbay, and E. Demirbas, "Influence of Injection Parameters and Mold Materials on Mechanical Properties of ABS in Plastic Injection Molding," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 9, pp. 1359-1365, 2010. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.001.