

TUGAS AKHIR - TM184835

**OPTIMASI TEMPERATUR BARREL DAN
TEMPERATUR CETAKAN PADA PROSES INJECTION
MOLDING TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN
KEBULATAN PROYEKTIL KOMPOSIT Cu/PA6**

SATRIYO WIBISONO ASPAR

NRP. 02111840000111

Dosen Pembimbing

Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

NIP 197906202006042001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**OPTIMASI TEMPERATUR *BARREL* DAN TEMPERATUR
CETAKAN PADA PROSES *INJECTION MOLDING*
TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN
PROYEKTIL KOMPOSIT Cu/PA6**

SATRIYO WIBISONO ASPAR

NRP. 02111840000111

Dosen Pembimbing

Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

NIP 197906202006042001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TM184835

**OPTIMIZATION OF BARREL AND MOLD TEMPERATURE
ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL
CHANGE AND ROUNDNESS OF Cu/PA6 COMPOSITE
PROJECTILE**

SATRIYO WIBISONO ASPAR

NRP. 02111840000111

Advisor

Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

NIP 197906202006042001

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI TEMPERATUR *BARREL* DAN TEMPERATUR CETAKAN PADA PROSES *INJECTION MOLDING* TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL KOMPOSIT Cu/PA6

TUGAS AKHIR

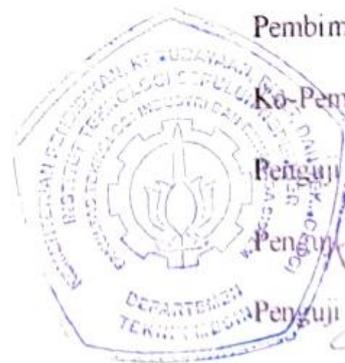
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar S.T. pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **SATRIYO WIBISONO ASPAR**

NRP. 02111840000111

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

1. Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
2. Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si
3. Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, ME
4. Ari Kurniawan, S.T., M.T.
5. Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.



SURABAYA

Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

OPTIMIZATION OF BARREL AND MOLD TEMPERATURE ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL CHANGE AND ROUNDNESS OF Cu/PA6 COMPOSITE PROJECTILE

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree S.T at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **SATRIYO WIBISONO ASPAR**

NRP. 0211184000111

Approved by Final Project Proposal Examiner Team:

1. Bambang Pramujati, S.T., M.Sc Eng., Ph.D.
2. Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si
3. Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, ME
4. Ari Kurniawan, S.T., M.T.
5. Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.



Advisor

Co-Advisor

Examiner

Examiner

Examiner

SURABAYA

July, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Satriyo Wibisono Aspar / 02111840000111
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D. /
196912031994031001
Dosen Ko-Pembimbing / NIP : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si /
197906202006042001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Optimasi Temperatur Barrel dan Temperatur Cetakan Pada Proses Injection Molding Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan Projektil Komposit Cu/Pa6” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 13 Juli 2022

Mahasiswa,

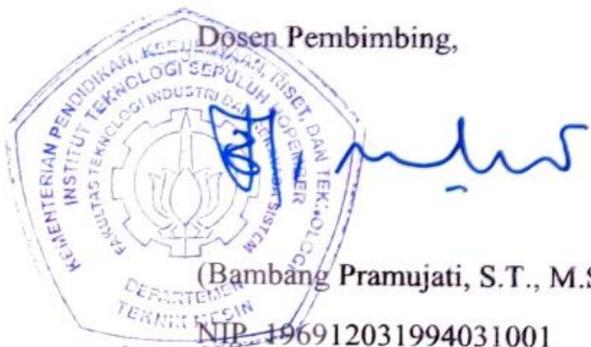


(Satriyo Wibisono Aspar)

NRP. 02111840000111

Mengetahui

Dosen Pembimbing,



(Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.)
NIP. 196912031994031001

Dosen Ko-pembimbing,



(Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si)
NRP. 197906202006042001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Satriyo Wibisono Aspar / 02111840000111
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D. /
196912031994031001
Co-advisor / NIP : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si /
197906202006042001

hereby declare that the Final Project with the title of "Optimization Of Barrel and Mold Temperature On Injection Molding Process For Dimensional Change and Roundness Of Cu/Pa6 Composite Projectile" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 13 July 2022

Student,



(Satriyo Wibisono Aspar)

NRP. 02111840000111

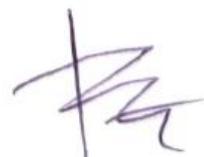
Acknowledge

Advisor,



(Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.)
NIP. 196912031994031001

Co-advisor,



(Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si)

NRP. 197906202006042001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMASI TEMPERATUR *BARREL* DAN TEMPERATUR CETAKAN PADA PROSES INJECTION MOLDING TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL KOMPOSIT Cu/PA6

Nama Mahasiswa / NRP : Satriyo Wibisono Aspar / 02111840000111
Dapartemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
Dosen Ko-pembimbing : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

ABSTRAK

Proyektil frangible adalah jenis proyektil yang didesain untuk hancur ketika berbenturan dengan permukaan yang kaku untuk mengurangi bahaya yang timbul akibat pantulan acak dari proyektil. Proyektil memerlukan nilai toleransi yang kecil agar dapat berfungsi dengan baik. Injection molding dipilih sebagai metode manufaktur untuk membuat proyektil frangible. Untuk mendapatkan hasil proyektil yang baik secara dimensi dan geometri, parameter yang digunakan harus tepat dan sesuai. Dimensi dan kebulatan proyektil adalah hal yang menjadi perhatian pada penelitian ini. Dari tugas akhir ini diharapkan mampu mendapatkan nilai parameter proses injeksi yang optimal dalam meminimalisir perubahan dimensi dan penyimpanan pada kebulatan peluru. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah komposit Cu/PA6. Pertama, proses simulasi menggunakan Autodesk Moldflow 2019 dilakukan untuk mendapatkan perkiraan parameter yang berpengaruh dan mendapatkan nilai parameter yang digunakan pada proses injeksi. Produk hasil injeksi diukur diameter dan kebulatannya serta dilakukan proses optimasi menggunakan metode Taguchi-grey-fuzzy dengan keluarannya adalah nilai Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG). Nilai GFRG kemudian dilanjutkan dengan perhitungan ANOVA sehingga didapatkan nilai kontribusi dari parameter proses yang digunakan. Uji konfirmasi dilakukan untuk membuktikan apakah temperatur yang didapat melalui proses optimasi adalah temperatur optimal. Dari penelitian ini didapatkan nilai parameter temperatur barrel dan cetakan yang optimal adalah 250°C dan 120°C dengan masing-masing nilai kontribusi yang didapat dari ANOVA adalah 15,79% dan 28,47% dan hasil uji hipotesis menyatakan bahwa kedua parameter tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan. Optimasi dikonfirmasi dengan penggunaan parameter optimal pada eksperimen dan menghasilkan nilai GFRG yang berada pada confidence interval sehingga hasil desain optimasi memenuhi hasil eksperimen.

Kata Kunci: *Cu/PA6, Injection molding, Kebulatan, Perubahan dimensi, Proyektil frangible, Taguchi-grey-fuzzy*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**OPTIMIZATION OF BARREL AND MOLD TEMPERATURE ON INJECTION
MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL CHANGE AND ROUNDNESS OF
Cu/PA6 COMPOSITE PROJECTILE**

Student Name / NRP : Satriyo Wibisono Aspar / 0211184000111
Departement : Mechanical Engineering FT-IRS ITS
Advisor : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
Co-advisor : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

ABSTRACT

Frangible projectile is a type of projectile that is designed to disintegrate upon impact with a rigid surface to reduce the hazard arising from random ricochet from the projectile. Projectiles require a small tolerance value to function properly. Injection molding was chosen as the manufacturing method for making frangible projectiles. To get good projectile results in dimensions and geometry, the parameters used must be precise and appropriate. Dimension and roundness of the projectile are the concerns of this study. From this final project, it is expected to be able to get the optimal injection process parameter values in minimizing the dimensional change value and irregularities in the roundness of the bullet. Material used in this research is Cu/PA6 composite. First, simulation process using Autodesk Moldflow 2019 is carried out to get an estimate of the influential parameters and get the parameter values used in the injection process. The injection product is measured for diameter and roundness and optimization process was carried out using the Taguchi-grey-fuzzy method with the output being the Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG) value. The GFRG value then continued with ANOVA calculations so that the contribution value of the process parameters used was obtained. Confirmation experiments were carried out to prove whether the parameters and values obtained were the optimum temperatures. From this research, the optimal value of barrel and mold temperature parameters are 250°C and 120°C with the respective contribution values obtained from ANOVA are 15.79% and 28.47% and the results of the hypothesis test state that the two parameters have no effect on changes in dimensions and roundness. Optimization is confirmed by using optimal parameters in the experiment and resulted in a GFRG value that in the confidence interval so that the results of the optimization design meet the experimental results.

Keyword: Cu/PA6, Dimensional change, Frangible projectile, Injection molding, Roundness, Taguchi-grey-fuzzy

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **Optimasi Temperatur Barrel dan Temperatur Cetakan Pada Proses Injection Molding Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan Proyektil Komposit Cu/Pa6**.

Penulis telah banyak memperoleh dukungan serta bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan Laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Bapak **Wimpie Agoeng Noegroho Aspar** dan Ibu **Dian Wiwekowati**, serta kakak-kakak Penulis, **Aspar Anggoro Wibowo** dan **Novilia Anggraeni** yang telah memberikan dukungan serta doa yang tiada henti-hentinya agar segala urusan Penulis dimudahkan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak **Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.** dan Ibu **Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si** selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, motivasi, dukungan, serta doa dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Bapak **Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, ME**, Bapak **Ari Kurniawan, S.T., M.T.**, dan Ibu **Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.** selaku dosen penguji dalam sidang Tugas Akhir Penulis yang telah memberikan masukan serta saran untuk Tugas Akhir ini.
4. Bapak **Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.** selaku dosen wali yang telah membantu dan membimbing Penulis selama masa perkuliahan.
5. Seluruh teman-teman Badan Pengurus Harian (**Kevin, Data, Falin, Faqih, Paru, Adhi, Kelpo, Jay, Yafi, Ganesh, Otniel, Raedi, Pray, Fian, dan Fazhli**) dan Pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2021/2022 serta teman-teman Pengurus Departemen Dalam Negeri Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2020/2021 (**Adit, Radit, Sauki, Bari, Alfin, Irfan, Rianti, Ican, Tyo, Kelpo, Jay, dan Goji**) yang telah ikut berkembang bersama dan mengisi keseharian Penulis selama masa perkuliahan.
6. Seluruh teman bimbingan Tugas Akhir (**Andi, Fadel, dan PW**) atas segala motivasi, bantuan, dan ilmu yang telah diberikan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh keluarga besar Gunadya (**Ajis, Vicky, Ganes, Raffi, Ican, Mumud, Acid, Pray, Edo, Fadel, Fazhli, Andi, Aga, Ghani, Klipo, dan Ilham**) yang telah membantu dan menemani Penulis dengan dipenuhi canda, tawa, pujian, cacian, serta semangat yang tiada henti diberikan untuk penulis selama perkuliahan.
8. Seluruh warga *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan (**Mas Sugi, Mas Anyun, Mas Adhy, Azhar, dan Mbak Jen**) yang telah memberikan fasilitas, motivasi, dan masukkan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh mahasiswa tugas akhir *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan (**Wafiq, Serly, Dwiki, Mori, Fransisca, Daffa, Tyo, dan Shafa**) yang telah berjuang bersama-sama menyelesaikan Tugas Akhir.
10. Seluruh keluarga besar M61 yang telah menemani Penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS.
11. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS, atas segala bantuan dan kerjasamanya selama masa perkuliahan.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas bantuan serta doa-doa baiknya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi positif dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi

pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Selain itu, semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang akan mengerjakan.

Surabaya, 28 Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL DEPAN	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	vi
PERNYATAAN ORISINALITAS	x
ABSTRAK.....	xiv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Proyektil <i>Frangible</i>	4
2.2 <i>Injection Molding</i>	5
2.2.1 <i>Injection Molding Machine</i>	6
2.2.2 Parameter IMM	7
2.3 <i>Shrinkage</i> dan <i>Warpage</i>	9
2.4 Kebulatan	11
2.5 Komposit.....	13
2.6 Autodesk Moldflow	13
2.7 Optimasi Taguchi- <i>Grey-Fuzzy</i>	17
2.7.1 Penentuan Derajat Kebebasan	17
2.7.2 Ukuran Matriks Ortogonal.....	17
2.7.3 Rasio Signal-to-Noise.....	18
2.7.4 Grey Relational Analysis.....	18
2.7.5 Grey-Fuzzy Reasoning Grade	19
2.7.6 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	20
2.7.7 Uji Konfirmasi.....	20
2.8 Penelitian Terdahulu	21
BAB III METODOLOGI.....	26
3.1 Diagram Alir Penelitian	26

3.2	Tahapan Penelitian.....	26
3.2.1	Studi Literatur dan Lapangan	27
3.2.2	Simulasi Proses Injeksi dengan <i>Software</i> Autodesk Moldflow.....	27
3.2.3	Desain Eksperimen	30
3.2.4	Persiapan Bahan dan Mesin.....	31
3.2.6	Proses Injeksi Proyektil	32
3.2.7	Pengukuran Perubahan Dimensi dan Penyimpangan Kebulatan Proyektil	33
3.2.8	Optimasi Metode Taguchi- <i>Grey-Fuzzy</i>	34
3.2.9	<i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	37
3.2.11	Uji Konfirmasi.....	37
3.2.12	Kesimpulan dan Saran	37
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		38
4.1	Penentuan Nilai Variabel Eksperimen dengan Autodesk Moldflow Adviser 2019 ..	38
4.2	Pelaksanaan Eksperimen Injeksi.....	41
4.2.1	Pengaruh Temperatur <i>Barrel</i> Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan	42
4.2.2	Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan...	43
4.2.3	Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Simulasi	45
4.3	Optimasi Parameter Proses Injeksi Menggunakan Taguchi- <i>Grey-Fuzzy</i> dan ANOVA	46
4.3.1	Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N	46
4.3.2	Grey Relational Coefficient (GRC).....	47
4.3.3	Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)	47
4.3.4	<i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	49
4.4	Uji Konfirmasi	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		54
5.1	Kesimpulan	54
2.1	Saran	54
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN		57
BIODATA PENULIS		75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Proyektil <i>Frangible</i> (Bui dkk, 2021).....	4
Gambar 2.2 Siklus Dasar Proses <i>Injection Molding</i> (Rosato dkk, 2000)	5
Gambar 2.3 Komponen Dari <i>Injection Molding Machine</i> (Tremblay, 2012).....	6
Gambar 2.4 <i>Injection Molding Machine</i> Vertikal (Engel GmbH, 2010)	6
Gambar 2.5 Beberapa Parameter Mesin Injeksi dan Pengaruhnya Terhadap <i>Shrinkage</i> (Rosato dkk, 2000).....	10
Gambar 2.6 (a) Pengaruh Waktu <i>Packing</i> terhadap Berat Prdouk (Fischer, 2003), (b) Pengaruh Tekanan Injeksi terhadap Berat Produk (Rosato dkk, 2000).....	11
Gambar 2.7 Klasifikasi Jenis Komposit Berdasarkan Fase Penguat (Callister, 2007)	13
Gambar 2.8 Ilustrasi Autodesk Moldflow Adviser 2019 Setelah Melakukan <i>Input</i> Geometri Produk, Desain Cetakan, dan Jenis Material (Autodesk, 2019)	14
Gambar 2.9 Hasil Simulasi “Molding Window” (Autodesk, 2019)	15
Gambar 2.10 Hasil <i>Quality Prediction</i> (Autodesk, 2019)	16
Gambar 2.11 (a) Hasil <i>Volumetric Shrinkage</i> , (b) Hasil <i>Warpage</i>	16
Gambar 2.12 Ilustrasi Kurva Fungsi Keanggotaan (Das dkk, 2015).....	19
Gambar 2.13 Ilustrasi Dari Hasil Proses GFRG (Das dkk, 2015)	20
Gambar 2.14 Grafik <i>Shrinkage</i> terhadap Waktu (Kościuszko dkk, 2021)	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Menggunakan Autodesk Moldflow Adviser 2019	27
Gambar 3.3 Pemberian Nama <i>File Project</i>	28
Gambar 3.4 (a) CAD Proyektil Ukuran 9 Mm Tampak Isometrik, (b) CAD Proyektil Ukuran 9 Mm Tampak Depan.	28
Gambar 3.5 Cetakan dan <i>Gating System</i> yang Digunakan untuk Simulasi	28
Gambar 3.6 Menu “Select Material” untuk Memilih Material	29
Gambar 3.7 Tampilan Autodesk Moldflow Adviser Setelah Melakukan Analisis “Fill+Pack”	29
Gambar 3.8 Mesin Injeksi <i>Workshop</i> Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan.....	31
Gambar 3.9 Mikrometer Sekrup yang Digunakan	32
Gambar 3.10 Alat Pengukur Kebulatan yang Digunakan.....	32
Gambar 3.11 Pengukuran Perubahan Dimensi pada Proyektil	33
Gambar 3.12 (a) Titik Pengukuran Kebulatan, (b) Contoh Hasil Pengukuran Kebulatan.....	33
Gambar 3.13 Diagram Alir Proses Optimasi	34
Gambar 3.14 (a) Fungsi Keanggotaan untuk <i>Input</i> , (b) Fungsi Keanggotaan untuk <i>Output</i> ..	36
Gambar 3.15 Contoh Perhitungan GFRG pada MATLAB	37
Gambar 4.1 Tahapan Utama Penelitian	38
Gambar 4.2 (a) Hasil <i>quality Prediction</i> , (b) Hasil <i>Actual Injection pressure</i>	39
Gambar 4.3 Kecacatan pada Proyektil Hasil Injeksi.....	41
Gambar 4.4 Proyektil <i>Frangible</i> Hasil Proses Injeksi	41
Gambar 4.5 (a) Grafik Temperatur <i>Barrel</i> dan Cetakan terhadap Perubahan Dimensi, (b) Grafik Temperatur <i>Barrel</i> dan Cetakan terhadap Kebulatan.....	42
Gambar 4.6 (a) Grafik Temperatur <i>Barrel</i> dan Cetakan terhadap <i>Volumetric Shrinkage</i> , (b) Grafik Temperatur <i>Barrel</i> dan Cetakan terhadap <i>deflection</i>	45
Gambar 4.7 (a) Pengaruh Temperatur <i>Barrel</i> terhadap Respons GFRG, (b) Pengaruh Temperatur Cetakan terhadap Respons GFRG	49

Gambar 4.8 Perhitungan *P-value* dengan Menggunakan Minitab51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kategori Ukuran Dari Pecahan yang Ditampung	4
Tabel 2.2 Spesifikasi Dari Beberapa Jenis Proyektil <i>Frangible</i>	5
Tabel 2.3 Perbandingan Mesin Injeksi <i>Single-stage</i> dan <i>Two-stage</i> (Rosato dkk, 2000).....	7
Tabel 2.4 Temperatur Leleh Dari Tiap Jenis Material Plastik (Valero & R., 2020)	8
Tabel 2.5 Rekomendasi Temperatur Cetakan untuk Beberapa Jenis Plastik (Rosato dkk, 2000)	9
Tabel 2.6 Cara untuk Mengurangi <i>Warpage</i> (Fischer, 2003)	11
Tabel 2.7 Metode Pengukuran Penyimpangan Kebulatan (Sui & Zhang, 2012).....	12
Tabel 2.8 Penjelasan hasil “Molding Window” (Autodesk, 2019).....	14
Tabel 2.9 Hasil <i>quality prediction</i> (Autodesk, 2019)	15
Tabel 2.10 Matriks Ortogonal (Soejanto, 2009)	17
Tabel 2.11 Perhitungan ANOVA.....	20
Tabel 2.12 Variasi Nilai Parameter Proses Dari Penelitian “ <i>Taguchi Optimization of Roundness and Concentricity of a Plastic Injection Molded Barrel of a Telecentric Lens</i> ” (C.M. Lin & Chen, 2021)	21
Tabel 2.13 Variasi Nilai Parameter Proses Dari Penelitian “ <i>A Practical Numerical Approach to Characterizing Non-Linear Shrinkage and Optimizing Dimensional Deviation of Injection-Molded Small Module Plastic Gears</i> ” (He & Wu, 2021).....	22
Tabel 2.14 Nilai <i>Shrinkage</i> Setelah Di- <i>annealing</i> (Kościeszko dkk, 2021).....	22
Tabel 2.15 Variasi Nilai Parameter Proses dan Kontribusi terhadap <i>Shrinkage</i> Searah Arah Aliran (Ryu dkk, 2020).....	23
Tabel 2.16 Variasi Nilai Parameter Proses dan Kontribusi terhadap <i>Shrinkage</i> Tegak Lurus Arah Aliran (Ryu dkk, 2020).....	23
Tabel 2.17 Variasi Nilai Parameter Proses dan Kontribusi terhadap <i>Warpage</i> (Ryu dkk, 2020)	23
Tabel 2.18 Penelitian Sebelumnya Mengenai Penggunaan Parameter Proses <i>Injection Molding</i>	24
Tabel 3.1 Variabel Proses dan Level	30
Tabel 3.2 Variabel Konstan	30
Tabel 3.3 Derajat Kebebasan Eksperimen	30
Tabel 3.4 Desain Eksperimen Berdasarkan Matriks Ortogonal.....	31
Tabel 3.5 Data Respons Eksperimen	34
Tabel 3.6 Nilai Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N.....	35
Tabel 3.7 Nilai <i>Deviation Sequence</i> dan GRC	35
Tabel 3.8 Fungsi Keanggotaan Logika <i>Fuzzy</i>	35
Tabel 3.9 Logika <i>Fuzzy</i>	36
Tabel 3.10 Perhitungan ANOVA.....	37
Tabel 4.1 Hasil Analisis “Fill”	39
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Moldflow dengan Variabel dari Desain Eksperimen	41
Tabel 4.3 Data Hasil Eksperimen	42
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Moldflow	44
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N.....	46
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan <i>Deviation Sequence</i> dan GRC.....	47
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan GFRG	48

Tabel 4.8 Nilai Rata-rata Multi-respons GFRG pada Masing-masing Level Parameter Proses	48
Tabel 4.9 Hasil Analisis Variansi (ANOVA)	51
Tabel 4.10 Kesimpulan Tahap Pengolahan Data	52
Tabel 4.11 Hasil Uji Konfirmasi.....	53
Tabel 4.12 Hasil Optimasi dari Uji Konfirmasi.....	53
Tabel 4.13 Kesimpulan Tahap Uji Konfirmasi.....	53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Injection molding adalah salah satu jenis metode manufaktur yaitu proses menginjeksikan suatu material ke dalam cetakan untuk menjadikan material tersebut sesuai dengan bentuk cetakan yang diinginkan. *Injection molding machine* (IMM) banyak digunakan di dunia dan biasa digunakan untuk proses manufaktur plastik (Rosato dkk, 2000). IMM juga dapat melakukan proses pembuatan *polymer matrix composite* (PMC). Dalam proses *injection molding*, terdapat beberapa tantangan yang dihadapi yaitu terjadinya *shrinkage*. *Shrinkage* adalah perbedaan antara dimensi cetakan dengan dimensi produk hasil proses injeksi. Fenomena ini terjadi akibat penurunan densitas dari material seiring dengan penurunan temperatur dan tekanan yang diberikan pada material. *Shrinkage* lumrah terjadi dalam proses *injection molding*, namun perlu menjadi perhatian jika produk yang dibuat harus memiliki toleransi dan ketelitian yang tinggi seperti proyektil. Proyektil *frangible* adalah jenis proyektil yang didesain untuk hancur ketika terkena benturan terhadap permukaan kaku untuk mengurangi bahaya yang terjadi akibat pantulan acak dari proyektil (Mates dkk, 2008). Proyektil harus memiliki nilai toleransi dimensi yang kecil karena tingkat akurasi dipengaruhi oleh diameter dari proyektil. Diameter yang terlalu besar dapat menyebabkan proyektil pecah di dalam selongsong senjata, sedangkan proyektil yang terlalu kecil dapat mengurangi tingkat akurasi. Dari paten yang ada, proyektil *frangible* memiliki toleransi sebesar ± 0.0254 mm (Bélanger dkk, 1993). Berdasarkan standar manufaktur proyektil yang disusun oleh SAAMI (2015), toleransi diameter proyektil memiliki nilai sebesar ± 0.0005 mm. Pada penelitian ini akan dilakukan eksperimen untuk mendapatkan parameter injeksi yang optimal untuk kebutuhan proyektil *frangible* dengan menggunakan metode *injection molding*.

Untuk mendapatkan nilai kebulatan dan konsentrisitas dari sebuah teleskop, dilakukan sebuah penelitian oleh Lin dan Chen (2021). Pada penelitian tersebut, dilakukan simulasi menggunakan *software* Moldflow Moldex 3D dan optimasi menggunakan desain eksperimen Taguchi. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa parameter injeksi yang berpengaruh terhadap kebulatan dan konsentrisitas adalah temperatur leleh dan tekanan *packing*. Dari penelitian tersebut juga didapatkan bahwa penyimpangan pada kebulatan dan konsentrisitas terjadi akibat timbulnya *warpage*. *Warpage* sendiri timbul akibat terjadinya *non-uniform shrinkage*. He dan Wu (2021) melakukan penelitian untuk mendapatkan solusi permasalahan dari kurangnya akurasi dimensi yang timbul akibat deformasi pada roda gigi. Material yang digunakan untuk membuat roda gigi adalah *polyformaldenide* (POM). Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah analisis numerik dan simulasi menggunakan aplikasi Moldflow. Dari penelitian ini didapat bahwa temperatur leleh memiliki pengaruh paling besar terhadap *non-linear shrinkage*. Kemudian, Ryu dkk (2020) melakukan penelitian untuk meminimalisir *shrinkage* dan *warpage* pada material PA6 yang diperkuat dengan serat gelas dan menggunakan metode injeksi *microcellular foam*. Desain eksperimen yang digunakan pada penelitian ini adalah Taguchi dan *Response Surface Material* (RSM) dan ANOVA untuk mendapatkan nilai kontribusi dari masing-masing parameter proses. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa parameter proses yang paling berpengaruh terhadap *shrinkage* dan *warpage* adalah temperatur leleh dan temperatur cetakan.

Proyektil *frangible* perlu memiliki dimensi dan geometri yang baik untuk mendapatkan kepresisian dan keakurasian dalam menembak. Dimensi dan geometri pada proses *injection molding* dipengaruhi oleh banyak parameter proses injeksi. Temperatur leleh yang tinggi pada proses injeksi dapat memuaikan material yang diinjeksikan dan berdampak pada penyusutan setelah proses injeksi dilakukan. Hal ini menjadi penting pada pembuatan proyektil *frangible* karena dapat mempengaruhi diameter dari *proyektil* yang akan dibuat. Perubahan dimensi pada

proses *injection molding* juga dipengaruhi oleh temperatur cetakan. Temperatur cetakan berfungsi untuk menjaga agar material yang terdapat pada *gate* dan tembok *cavity* tidak membeku sebelum seluruh bagian *cavity* terisi. Temperatur cetakan yang tinggi dapat menjaga agar *gate* dan tembok *cavity* membeku lebih lama, namun dapat menimbulkan efek *shrinkage* yang lebih besar pada produk injeksi. Kemudian untuk mendapatkan geometri yang baik, kebulatan proyektil perlu diperhatikan. Pengaruh proses *injection molding* pada kebulatan produk mengacu pada *non-uniform shrinkage* yang terjadi pada produk hasil injeksi. Untuk mengurangi nilai *non-uniform shrinkage*, hal yang perlu dilakukan berlawanan dengan perlakuan yang dibutuhkan untuk mengurangi efek *shrinkage*.

Berdasarkan hipotesis yang disebutkan sebelumnya, perlu dilakukan eksperimen untuk mendapatkan optimasi dari parameter proses *injection molding* sehingga didapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan yang terkecil sehingga produk proyektil yang dihasilkan baik secara dimensi maupun geometri. Variabel proses yang digunakan pada penelitian ini adalah temperatur *barrel* dan temperatur cetakan yang didapatkan dari studi literatur yang telah dilakukan sebelumnya. Nilai dari variabel proses yang digunakan dipilih berdasarkan *trial* dan studi literatur yang dilakukan. Simulasi menggunakan Autodesk Moldflow Adviser dilakukan untuk mendapatkan prediksi nilai perubahan dimensi dan kebulatan sebelum dilakukan eksperimen secara langsung. Parameter proses yang optimal didapatkan dengan menggunakan metode Taguchi-*grey-fuzzy*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dapat dibuat perumusan masalah sebagai berikut:

1. Apakah temperatur *barrel* berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil komposit Cu/PA6?
2. Apakah temperatur cetakan berpengaruh terhadap perubahan dimensi kebulatan pada proyektil komposit Cu/PA6?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis pengaruh temperatur *barrel* terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil komposit Cu/PA6.
2. Analisis pengaruh temperatur cetakan terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil komposit Cu/PA6.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah yang diberlakukan pada penelitian adalah sebagai berikut:

1. Komposisi material yang digunakan adalah Cu 90 wt% dan PA6.
2. Material yang digunakan pada simulasi adalah Ecomass 1700C094: Ecomass Technologies dengan komposisi material Cu 93 wt% dan PA12.
3. Proses pendinginan cetakan setelah proses injeksi dianggap homogen.
4. Proyektil disimpan pada proses pengondisian dengan temperatur 25°C.
5. Temperatur ruangan saat pengukuran dimensi berada pada temperatur 25°C.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menjadi sumber literatur dan pembelajaran terkait proses *injection molding*.
2. Mengetahui pengaturan parameter terbaik dari mesin *injection molding* untuk mendapatkan hasil produk proyektil dengan dimensi dan geometri terbaik.
3. Menjadi inovasi dalam teknologi pertahanan di Indonesia.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proyektil *Frangible*

Amunisi pada dasarnya tersusun atas empat bagian yaitu *cartridge* (selongsong), *primer* (pemantik), *propellant/powder* (bahan pembakar), dan *projectile* (proyektil) (Anders dkk, 2006). Cara kerja dari amunisi pada umumnya diawali dengan pelatuk menggerakkan sebuah pin yang kemudian mengenai *primer* dari amunisi dan menimbulkan percikan api. Percikan api ini akan membakar *propellant/powder* di dalam *cartridge* yang akan menghasilkan gas. Gas ini yang akan mendorong proyektil untuk keluar dari laras senjata.

Frangible projectile atau proyektil *frangible* adalah jenis proyektil yang didesain untuk pecah jika mengenai suatu target. Hal ini disebabkan karena proyektil *frangible* tidak mengandung timbal dan lebih ramah lingkungan. Proyektil jenis ini biasa digunakan saat latihan atau untuk kebutuhan rekreasi (Mates dkk, 2008). Adapun contoh dari proyektil *frangible* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ilustrasi Proyektil *Frangible* (Bui dkk, 2021)

Untuk mengukur kemampuan pecah dari proyektil *frangible*, digunakan sebuah kuantifikasi yang disebut *frangibility factor* (FF_{em}). Untuk mengukur *frangibility factor*, dilakukan eksperimen dengan menembakkan proyektil kepada sebuah target keras. Kemudian, pecahan dari proyektil akan ditampung oleh semacam perangkat yang kemudian massa dari pecahan tersebut ditimbang. Massa proyektil yang ditampung harus lebih besar dari 90% massa awal proyektil (Bui dkk, 2021).

Untuk menentukan *frangibility factor* dapat digunakan rumus (2.1) sebagai berikut,

$$FF_{em} = 100 \sum_{i=1}^5 K_{mi} \frac{m_{ci}}{m_q} (\%) \quad (2.1)$$

dimana m_{ci} adalah massa dari pecahan proyektil pada kategori i , m_q adalah massa awal proyektil sebelum ditembakkan, dan K_{mi} adalah koefisien ukuran dari pecahan proyektil dari kategori i . Adapun K_m dibagi menjadi 5 kategori ukuran sebagaimana disajikan pada Tabel 2.1 (Bui dkk, 2021).

Tabel 2.1 Kategori Ukuran dari Pecahan yang Ditampung

Kategori ukuran i	Ukuran dari pecahan (mm)	Koefisien ukuran K_m
1	(0; 0,5]	1
2	(0,5; 1]	0,75
3	(1, 2]	0,5
4	(2, 5]	0,25
5	(5, panjang proyektil]	0,01

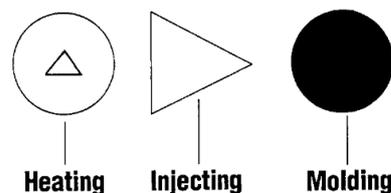
Dalam proses pembuatan proyektil *frangible*, perlu untuk mengetahui spesifikasi dari produk yang telah ada sebelumnya. Spesifikasi dari proyektil *frangible* yang dapat digunakan sebagai pembandingan disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi dari Beberapa Jenis Proyektil *Frangible*

Karakteristik	Nilai	Sumber
Massa Jenis (kg/m ³)	6650-9550	(Bui dkk, 2021)
Gravitasi Spesifik	5.7	
Toleransi Diameter (mm)	± 0.0254	(Bélanger dkk, 1993)
Toleransi Panjang (mm)	± 0.005	(Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute Inc., 2015)
Toleransi Diameter (mm)	± 0.0005	
Toleransi Massa	± 3%	

2.2 Injection Molding

Injection molding adalah alat yang digunakan untuk memproses dan memproduksi berbahan plastik dengan menginjeksi plastik leleh ke dalam sebuah cetakan (Rosato dkk, 2000). Setiap proses *injection molding* melakukan fungsi berikut: (1) *plasticizing* yaitu proses pemanasan dan pelelehan dari plastik di plastisator, (2) *injection* yaitu proses menginjeksi plastik leleh dari *plasticator* ke dalam cetakan, (3) *afterfilling* yaitu proses menjaga plastik yang sudah di injeksi di dalam cetakan selama waktu tertentu untuk mencegah aliran balik dari plastik leleh dan untuk mengurangi penyusutan yang terjadi ketika plastik mengering, (4) *cooling* yaitu proses mendinginkan plastik hingga siap dikeluarkan dari cetakan, dan (5) *molded-part release* yaitu proses membuka cetakan dan mengeluarkan produk yang sudah jadi. Pada Gambar 2.2 ditunjukkan siklus dasar pada proses *injection molding* yaitu terdiri dari proses *heating* (pemanasan), *injecting* (injeksi), dan *molding* (pencetakan).

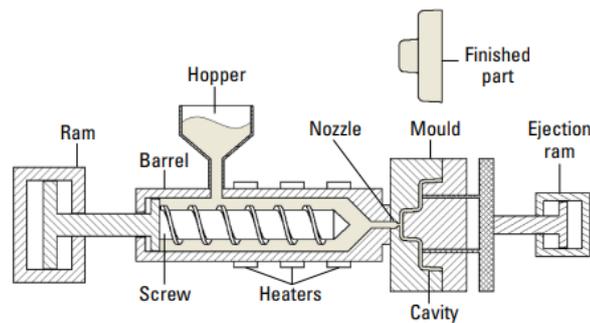


Gambar 2.2 Siklus Dasar Proses *Injection Molding* (Rosato dkk, 2000)

Secara singkat, proses *injection molding* adalah proses repetitif dari melelehkan dan menginjeksikan plastik ke dalam rongga cetakan yang ditahan dengan tekanan sampai dilepaskan dalam bentuk padat. Cetakan bisa memiliki satu rongga atau beberapa jumlah rongga dengan bentuk yang sama atau berbeda. Masing-masing dihubungkan dengan penghubung aliran atau disebut *runner* yang mengalirkan lelehan kepada tiap rongga. Pada proses ini terjadi tiga operasi dasar yaitu pelelehan dari plastik pada unit *plasticizing* agar dapat mengalir pada tekanan, kemudian pemadatan dari lelehan plastik, dan membuka cetakan untuk melepaskan produk yang sudah jadi. Tiga tahapan tersebut adalah operasi dari masukan mekanik dan termal dari alat injeksi dimana perlu mempertimbangkan properti dan sifat dasar dari plastik yang diproses karena setiap plastik memiliki sifat lelehan yang berbeda (Rosato dkk, 2000).

2.2.1 Injection Molding Machine

Injection molding machine (IMM) terbagi atas tiga komponen utama, unit injeksi, cetakan, dan sistem penjepit. Unit injeksi yang disebut juga sebagai *plasticator* berfungsi untuk mempersiapkan lelehan untuk diinjeksi ke dalam *mold* atau cetakan. Sistem penjepit berfungsi untuk membuka dan menutup cetakan, untuk mengeluarkan hasil injeksi yang sudah selesai (Rosato dkk, 2000). Pada Gambar 2.3, ditunjukkan komponen-komponen dari IMM dan pada Gambar 2.4 ditunjukkan salah satu contoh IMM berbentuk vertikal.



Gambar 2.3 Komponen dari *Injection Molding Machine* (Tremblay, 2012)



Gambar 2.4 *Injection Molding Machine* Vertikal (Engel GmbH, 2010)

Karakteristik IMM ditentukan berdasarkan kapasitas volume lelehan maksimum yang dapat diinjeksikan ke dalam cetakan atau yang disebut juga *shot*. Biasanya kapasitas yang dimiliki oleh IMM berkisar antara 30-70% dari volume *plasticator*. Karena berbagai jenis plastik memiliki massa jenis yang berbeda-beda, maka digunakan istilah volume dari lelehan yang dapat diinjeksikan dalam tekanan tertentu untuk menjelaskan ukuran *shot*. Laju injeksi dari *shot* berhubungan dengan kecepatan IMM dan kapabilitas dari pengendalian proses untuk memutar cairan kembali ke dalam *cavity* atau rongga cetakan (Rosato dkk, 2000).

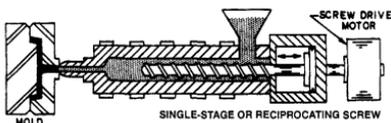
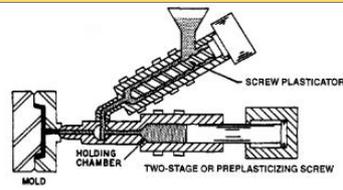
IMM sendiri memiliki dua tipe mesin yang umum digunakan dalam industri. *Single-stage* atau yang disebut juga sebagai *reciprocating-screw* dan *two-stage* atau yang biasa disebut sebagai *piggy-back*. Ada pun mesin yang memiliki tiga tahapan atau lebih (Rosato dkk, 2000).

Single-stage adalah jenis IMM konvensional dimana plastik dilelehkan menggunakan kombinasi elemen pemanas pada *barrel* dan panas dari hasil gesekan *screw* di dalam *barrel*. Screw pada mesin injeksi akan bergerak mundur untuk mengalirkan lelehan material

terakumulasi pada ujung mesin. Akumulasi lelehan pada ujung *screw* dan diinjeksikan setelah jumlah material yang diperlukan terkumpul (Rosato dkk, 2000).

Two-stage adalah jenis IMM lain yang memiliki mekanisme yang berbeda yaitu proses *plasticating* atau pelelehan plastik dan penginjeksian plastik dilakukan pada tahap yang berbeda. Bagian *screw* yang berfungsi untuk melelehkan plastik, akan membawa lelehan plastik menuju ruangan yang berbeda untuk diinjeksikan. Di ruangan tersebut (akumulator), lelehan plastik akan ditekan masuk ke dalam cetakan dengan tekanan yang sesuai dengan yang dibutuhkan. Mesin dengan jenis *two-stage* biasanya memiliki mekanisme tertentu untuk menahan lelehan plastik tidak kembali ke ruangan *screw* seperti dengan menggunakan *diverter valve*. Penggunaan mesin berjenis *two-stage* relatif lebih mahal dibandingkan *single-stage* (Rosato dkk, 2000). Tabel 2.3 menunjukkan perbandingan antara IMM *single-stage* dan *two-stage*.

Tabel 2.3 Perbandingan Mesin Injeksi *Single-stage* dan *Two-stage* (Rosato dkk, 2000)

Pembandingan	<i>Single-Stage</i> IMM	<i>Two-Stage</i> IMM
Bentuk Mesin	 <p>(Rosato dkk, 2000)</p>	 <p>(Rosato dkk, 2000)</p>
Daya	Daya yang dibutuhkan untuk melakukan proses injeksi lebih tinggi dibandingkan <i>two-stage</i> IMM.	Daya yang dibutuhkan untuk melakukan proses injeksi rendah.
<i>Shot</i>	Kapasitas <i>shot-size</i> dapat berubah-ubah karena kontrol posisi <i>screw</i> yang lebih sulit.	Kontrol dari kapasitas <i>shot-size</i> lebih akurat karena hanya membutuhkan perputaran <i>screw</i> .
Tekanan	Tekanan yang dihasilkan lebih rendah karena jarak pendorongan <i>screw</i> terbatas.	Mampu menghasilkan kapasitas tekanan yang lebih besar dengan tingkat presisi yang lebih baik.
Temperatur	Temperatur leleh kurang presisi karena <i>screw</i> dan mekanisme pendorong berada pada satu <i>barrel</i> .	Temperatur lebih mudah terkontrol.
Biaya Pembuatan	Biaya pembuatan lebih murah karena desain yang sederhana.	Biaya pembuatan tinggi karena perlu adanya pemisah antara <i>screw</i> dan pendorong.
Perawatan	Karena hanya ada satu <i>barrel</i> , maka <i>screw</i> dapat digunakan untuk membersihkan mesin.	Perlu adanya pembersihan rutin dan lebih membutuhkan banyak perawatan karena komponen yang lebih banyak.

2.2.2 Parameter *Injection Molding Machine* (IMM)

Dalam pengerjaan menggunakan *Injection Molding Machine* (IMM), terdapat beberapa parameter yang perlu diatur dan ditentukan agar produk yang diinginkan dapat tercetak dengan baik dan sesuai. Adapun parameter tersebut antara lain, kecepatan injeksi, temperatur leleh, kecepatan *screw*, tekanan balik, tekanan injeksi, tekanan *holding*, waktu *holding*, dan temperatur cetakan (Valero & R., 2020).

Parameter yang pertama adalah kecepatan injeksi atau *injection speed*. Semakin cepat kecepatan dari injeksi, maka semakin singkat waktu injeksi dan sebaliknya jika kecepatan injeksi rendah, maka semakin lambat waktu injeksi. Kecepatan injeksi yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan peningkatan tekanan injeksi yang terlalu signifikan, Kecepatan injeksi yang terlalu rendah dapat mengakibatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang disebabkan oleh penambahan lapisan dari lelehan plastik yang mengeras yang terlalu cepat. Semakin tinggi kecepatan injeksi, maka semakin tinggi tekanan injeksi yang diperlukan.

Dalam proses pengisian *cavity*, tentu hal yang paling diinginkan adalah pengisian secepat mungkin. Namun, jika proses pengisian terlalu cepat maka akan mengakibatkan pemanasan yang terlalu berlebihan pada material dan dapat merusaknya, menimbulkan tegangan geser maksimum pada material yang dapat menyebabkan kerusakan pada ikatan molekul material, serta dapat menyebabkan penarikan dan perpindahan pada produk ketika sudah mengeras. Jika proses pengisian terlalu lambat juga dapat menimbulkan permasalahan dengan berkurangnya jalur material untuk memasuki *cavity* akibat pendinginan yang lebih cepat sehingga lebih banyak membutuhkan tekanan injeksi untuk menggerakkan lelehan.

Parameter yang berikutnya adalah temperatur leleh atau *melt temperature*. Temperatur leleh terjadi berdasarkan tiga sumber, yaitu kecepatan putar *screw*, tekanan balik, serta temperatur yang diberikan oleh IMM. Temperatur leleh sangat bergantung pada material yang dikerjakan, selain itu juga bergantung pada desain dari cetakan dan aliran lelehan dari material. Temperatur leleh dapat mempengaruhi beberapa hal. Jika temperatur leleh dinaikkan, maka viskositas material menurun dan meningkatnya aliran lelehan, penurunan pada tegangan internal, *pressure drop* pada cetakan yang lebih kecil, meningkatnya *shrinkage*, meningkatnya waktu pendinginan, serta meningkatnya kemungkinan adanya *flash*. Adapun setiap material memiliki temperatur leleh yang dibutuhkan untuk melelehkan material tersebut yang tersajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Temperatur Leleh dari Tiap Jenis Material Plastik (Valero & R., 2020)

Material (<i>Amorphous</i>)	Temperatur leleh (°C)	Material (<i>Semi- crystalline</i>)	Temperatur leleh (°C)
PS	170-200	LDPE	190-200
SB	180-280	HDPE	210-300
SAN	200-260	PP	200-290
ABS	200-270	PA66	270-320
PPO	250-290	PA6	230-280
<i>Rigid</i> PVC	170-210	PA6 10	230-280
<i>Flexible</i> PVC	140-200	PA11	200-250
PMMA	180-260	PA12	200-260
PC	280-320	POM	190-220
		PET	260-280
		PBT	240-260

Selanjutnya adalah kecepatan *screw* atau *screw speed* yang merupakan kecepatan putar dari *screw*. Kecepatan *screw* dapat mempengaruhi temperatur leleh akibat dari gesekan dan pergeseran yang terjadi pada proses pelelehan dan *plasticating*.

Parameter selanjutnya adalah tekanan balik atau *back pressure* yaitu tekanan efektif yang terdapat pada ujung dari *screw*. Nilai tekanan balik sama dengan tekanan dari material leleh yang dibawa oleh gerakan rotasi *screw* dan desain *screw* di area depan saat material dipompa ke area depan *screw*, dan tekanan yang membawa *screw* mundur. Parameter ini dapat dikontrol dan diatur pada mesin. Tekanan balik yang tinggi dapat mengakibatkan material lebih homogen, panas yang dihasilkan oleh gaya gesek, dan dapat menghilangkan udara yang tersisa di bagian

depan *screw*. Namun, tekanan balik yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan material terdegradasi dan waktu siklus yang lebih lama.

Berikutnya adalah tekanan injeksi atau *injection pressure* yaitu tekanan yang diberikan ketika menginjeksikan plastik ke dalam cetakan. Tekanan injeksi dipengaruhi oleh resistansi dari aliran material, kecepatan pengisian, temperatur material, dan temperatur cetakan. Konsistensi dari tekanan injeksi di dalam *cavity* sangat penting untuk menghasilkan produk yang baik (Rosato dkk, 2000).

Parameter yang keenam dan ketujuh adalah tekanan *holding* dan waktu *holding*. Tekanan *holding* adalah tekanan yang diberikan untuk menahan plastik agar tidak masuk kembali ke dalam mesin atau yang disebut juga *back flow*. Waktu *holding* adalah waktu yang dilakukan untuk memberikan tekanan *holding*. Adapun waktu yang dibutuhkan tersebut tergantung pada tekanan yang ada di dalam *cavity* atau berat material yang diinjeksikan.

Yang terakhir adalah temperatur cetakan. Perlakuan panas pada cetakan tergantung pada material yang digunakan. Jika jenis plastik yang digunakan adalah *thermoplastic*, maka temperatur pada cetakan diatur rendah agar ketika plastik menyentuh *cavity*, pengerasan yang terjadi dimulai dari permukaan terlebih dahulu. Namun, jika material yang digunakan adalah *thermosets*, maka temperatur pada cetakan diatur tinggi agar proses pendinginan pada produk di dalam *cavity* tidak prematur (Rosato dkk, 2000). Temperatur cetakan juga berpengaruh pada proses relaksasi dari *residual stress* dan *thermal stress* yang terjadi pada produk. Kedua *stress* ini muncul dari keseluruhan proses injeksi. Terdapat rekomendasi temperatur leleh yang baik digunakan untuk beberapa jenis plastik disajikan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Rekomendasi Temperatur Cetakan untuk Beberapa Jenis Plastik (Rosato dkk, 2000)

Material	Temperatur Cetakan (°C)
ABS	40-60
ABS reinforced	60-95
Acetal	75-95
Akrilik	40-80
Nylon 6	60-95
Nylon 6/6	40-95
Nylon 6/10	55-95
Nylon 4/6	85-150
Nylon 11	40-65
Nylon 12	150-200

2.3 *Shrinkage* dan *Warpage*

Shrinkage adalah perbedaan dimensi antara cetakan dengan hasil produk yang telah diinjeksikan. Fenomena ini terjadi akibat penurunan densitas dari material seiring dengan penurunan temperatur dan tekanan yang diberikan pada material. *Shrinkage* terjadi ketika proses injeksi berlangsung, saat proses pendinginan di dalam cetakan, dan sampai produk didiamkan selama 48 jam di luar cetakan. Proses pengukuran *shrinkage* yang direkomendasikan dilakukan setelah 48 jam proses injeksi untuk mendapatkan nilai *shrinkage* yang lebih stabil (Fischer, 2003). Nilai *shrinkage* dapat dihitung menggunakan rumus (2.2) berikut

$$Shrinkage = \frac{C - P}{C} \times 100\% \quad (2.2)$$

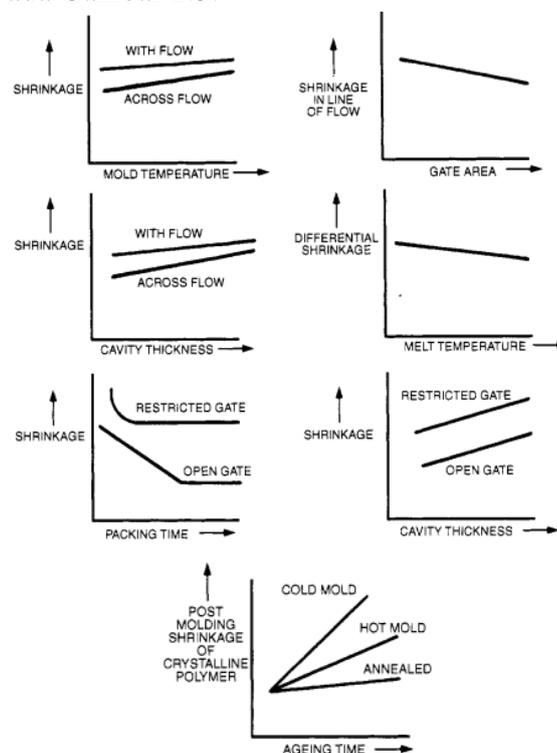
dimana C adalah dimensi awal cetakan dan P adalah dimensi dari produk yang sudah jadi.

Shrinkage terjadi berdasarkan prinsip gas ideal dimana volume berbanding lurus dengan temperatur dan berbanding terbalik dengan tekanan sebagaimana ditunjukkan pada perumusan (2.3) berikut.

$$V = \frac{R \times T}{P} \quad (2.3)$$

Ketika plastik dipanaskan, maka volumenya akan memuai dan ketika terjadi pendinginan volumenya akan kembali pada kondisi sebelum dipanaskan jika kita mengabaikan efek dari kristalinitas. Artinya, semakin tinggi temperatur yang diberikan pada material, maka penyusutan volume yang terjadi juga semakin besar. Untuk mengkompensasi hal tersebut, maka material yang dimasukkan ke dalam *cavity* harus ditambahkan untuk menjaga agar volume yang diinginkan tercapai. Hal ini dapat dilakukan dengan menambahkan tekanan pada proses injeksi (Rosato dkk, 2000).

Shrinkage yang terjadi melewati 48 jam waktu setelah injeksi disebut dengan *post-mold shrinkage*. *Post-mold shrinkage* terjadi karena tegangan yang timbul akibat pemanasan (*thermal stress*) dan penekanan tersisa di dalam produk. Hal ini dapat menimbulkan *shrinkage* seiring dengan berkurangnya tegangan sisa (*residual stress*) pada produk akibat paparan waktu, suhu, dan kelembapan (Fischer, 2003). *Post-mold shrinkage* yang signifikan sering terjadi pada material yang memiliki struktur *crystalline* seperti nylon karena adanya kecenderungan material untuk mempertahankan strukturnya setelah proses pemanasan. Kecenderungan ini menyebabkan penyusutan volume terjadi lebih signifikan. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi *post-mold shrinkage* adalah dengan meningkatkan temperatur cetakan untuk mempercepat relaksasi *residual stress* dan *thermal stress*. Namun, proses tersebut dapat mengakibatkan tingginya *shrinkage* yang terjadi ketika produk baru selesai diinjeksikan. *Residual stress* juga dapat menyebabkan terjadinya *non-uniform shrinkage* yang jika terjadi dapat menimbulkan kecacatan dan defleksi pada produk. Pengaruh parameter injeksi dengan *shrinkage* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



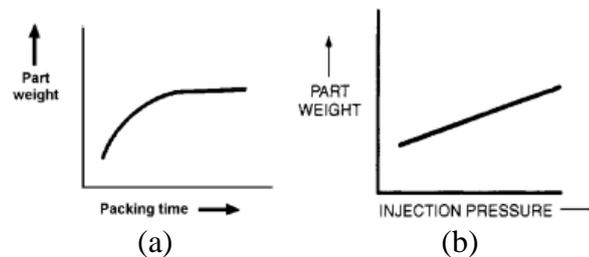
Gambar 2.5 Beberapa Parameter Mesin Injeksi dan Pengaruhnya Terhadap *Shrinkage* (Rosato dkk, 2000)

Warpage adalah perubahan bentuk dari produk yang dihasilkan dari proses injeksi akibat perbedaan *shrinkage* pada bagian-bagian tertentu produk (*non-uniform shrinkage*). Hal ini mengakibatkan produk menjadi melengkung atau memutar sehingga bentuk dan ukuran dari produk tidak sesuai dengan yang diinginkan. Tentu fenomena ini harus dihindari terkhusus pada produk yang memiliki toleransi yang tinggi. *Warpage* bisa terjadi salah satunya dikarenakan arah aliran dari material. *Shrinkage* akan lebih mudah terjadi pada bagian yang searah dengan arah aliran dari material yang diinjeksikan dan akan lebih sukar terjadi pada bagian yang tegak lurus terhadap arah aliran. *Warpage* dapat terjadi salah satunya dikarenakan pengaturan temperatur leleh maupun cetakan yang kurang sesuai. Proses pendinginan yang tidak merata juga dapat menyebabkan terjadinya *warpage*. Berikut adalah cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi *warpage* pada produk disampaikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Cara untuk Mengurangi *Warpage* (Fischer, 2003)

Parameter Injeksi	Perlakuan
Tekanan Injeksi	Diturunkan
Temperatur Leleh	Ditinggikan
Temperatur Cetakan	Dihangatkan (tidak tinggi maupun rendah)
Waktu Injeksi	Dipercepat
Waktu <i>Packing</i>	Dipercepat

Berat dari produk yang dihasilkan pada proses injeksi sangat bergantung pada jumlah berat yang diinjeksikan. Berat akan terus bertambah selama proses injeksi dan akan menjadi tetap setelah *gate* membeku. Namun, berat juga dapat berkurang jika terjadi aliran balik ke dalam *barrel* mesin injeksi. Cara untuk meningkatkan berat produk adalah dengan mengatur lama waktu *packing*, mengatur temperatur pada elemen pemanas mesin injeksi, dan tekanan injeksi. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan berat produk dan parameter proses injeksi yang mempengaruhi.



Gambar 2.6 (a) Pengaruh Waktu *Packing* terhadap Berat Prdouk (Fischer, 2003), (b) Pengaruh Tekanan Injeksi terhadap Berat Produk (Rosato dkk, 2000)

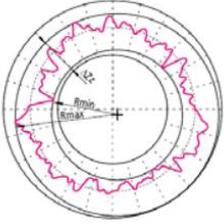
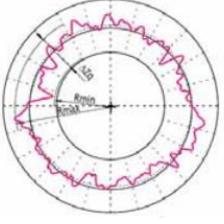
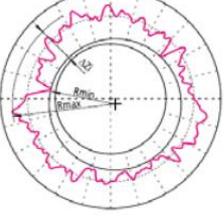
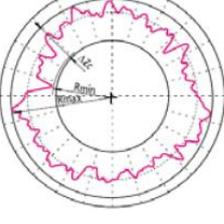
2.4 Kebulatan

Dalam proses manufaktur, perlu suatu sistem komunikasi yang universal sehingga dapat dihasilkan produk yang diinginkan. Bahasa komunikasi yang digunakan salah satunya adalah toleransi geometri. Toleransi geometri dapat digunakan untuk mendeskripsikan bentuk dari suatu produk dan toleransi yang diperlukan untuk produk tersebut. Toleransi dapat diartikan sebagai tingkat presisi yang diperlukan pada proses manufaktur. Jika produk yang dihasilkan tidak sesuai dengan toleransi yang diberikan, maka akan muncul masalah-masalah setelah proses manufaktur seperti perbedaan dimensi produk, sulitnya proses pemasangan, atau kualitas produk yang buruk. Nilai toleransi dapat dijadikan sebagai acuan pengambilan keputusan dari proses manufaktur yang akan digunakan. Jika nilai toleransi besar, maka proses manufaktur

yang sederhana dapat digunakan, sedangkan jika nilai toleransi kecil, maka proses manufaktur yang dibutuhkan menjadi lebih kompleks (Drake, 1999).

Kebulatan merupakan salah satu jenis toleransi geometri untuk memberikan toleransi dari produk berbentuk lingkaran pada bidang lingkaran. Proses pengukuran kebulatan dapat menggunakan alat ukur seperti *dial indicator* dan mikrometer tiga kaki. Kebulatan pada sebuah produk dapat diketahui nilainya dengan menggunakan beberapa metode yang ada. Adapun metode yang dapat digunakan untuk mengukur penyimpangan kebulatan dari sebuah produk ditunjukkan pada Tabel 2.7.

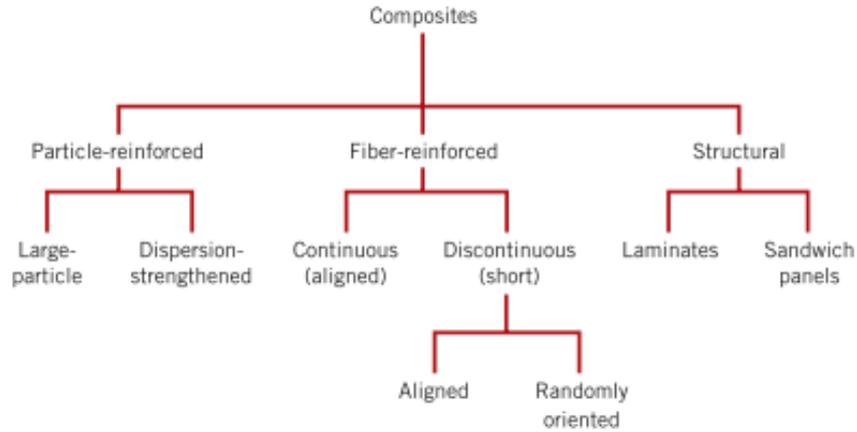
Tabel 2.7 Metode Pengukuran Penyimpangan Kebulatan (Sui & Zhang, 2012)

Metode	Deskripsi
<p>Minimum Zone Reference Circle (MZC)</p> 	<p>Pada metode ini, digambar dua lingkaran yang menunjukan penyimpangan kebulatan terbesar dan terkecil. Nilai penyimpangan didapat dari selisih radius dari kedua lingkaran tersebut atau selisih dari radius penyimpangan maksimum dan minimum.</p>
<p>Least Squares Circle (LSC)</p> 	<p>Pada metode ini, dibuat lingkaran dengan kriteria luas dari area di dalam lingkaran sama dengan luas dari area di luar lingkaran. Pengukuran kebulatan dilakukan dengan selisih antara jarak defleksi maksimum dan minimum terhadap referensi lingkaran.</p>
<p>Maximum Inscribed Circle (MIC)</p> 	<p>Pada metode ini, dibuat lingkaran referensi sebesar mungkin yang mampu digambar pada bagian dalam profil penyimpangan. Perhitungan dari metode ini adalah selisih antara jarak maksimum profil penyimpangan dengan lingkaran referensi.</p>
<p>Maximum Circumscribed Circle (MCC)</p> 	<p>Pada metode ini, dibuat lingkaran referensi sebesar mungkin yang mampu digambar pada bagian luar profil penyimpangan. Perhitungan dari metode ini adalah selisih antara jarak maksimum profil penyimpangan dengan lingkaran referensi.</p>

Untuk mendapatkan produk dengan toleransi yang kecil, beberapa faktor pada proses *injection molding*. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan antara lain, desain dari produk, desain cetakan, material yang digunakan, kapasitas mesin, dan siklus dari mesin. Cetakan yang dibuat harus diproduksi dengan toleransi pengerjaan yang akurat serta ukurannya harus disesuaikan

dengan data *shrinkage* dari material yang digunakan (Rosato dkk, 2000). *Non-uniform shrinkage* dapat menimbulkan penyimpangan pada toleransi geometri sehingga parameter proses injeksi yang tepat perlu digunakan dalam proses injeksi.

2.5 Komposit



Gambar 2.7 Klasifikasi Jenis Komposit Berdasarkan Fase Penguat (Callister, 2007)

Komposit adalah material multifase buatan untuk mendapatkan kombinasi sifat material tertentu. Kebanyakan komposit dibuat untuk mendapatkan sifat superior tertentu seperti kekakuan, kekerasan, ketahanan panas, dan sifat lainnya yang didapatkan dari penggabungan beberapa material yang berbeda. Syarat dari sebuah penggabungan material bisa dikategorikan sebagai komposit adalah fase penyusunnya harus berbeda secara kimiawi dan dipisahkan oleh pembatas yang jelas (Callister, 2007).

Kebanyakan komposit tersusun atas dua fase saja yaitu fase penguat (*reinforced*) yang merupakan komponen utama yang menahan beban yang terjadi pada material dan fase matriks (*matrix*) yang berfungsi untuk mengikat fase penguat. Komposit dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan jenis penguatnya yaitu, *particle-reinforced*, *fiber-reinforced*, dan *structural*. Selain berdasarkan jenis penguat, komposit juga dapat diklasifikasikan berdasarkan matriksnya yaitu, Polymer Matrix Composite (PMC), Metal Matrix Composite (MMC), dan Ceramic Matrix Composites (CMC). Gambar 2.7 menunjukkan klasifikasi dari jenis komposit berdasarkan fase penguatnya.

2.6 Autodesk Moldflow

Dalam proses *injection molding*, penggunaan alat bantu berupa *software* dapat dilakukan untuk menyimulasikan proses *injection molding* sebelum dilakukan pada mesin secara langsung. Penggunaan *software* simulasi diharapkan dapat meningkatkan produktivitas dari pembuatan produk karena jumlah *trial and error* dapat dikurangi. Hal ini dikarenakan dengan dilakukannya proses simulasi, dapat diketahui nilai parameter-parameter injeksi yang digunakan pada MIM. Dengan didapatkannya parameter-parameter proses injeksi yang tepat, maka hanya perlu dilakukan proses *fine tuning* pada mesin agar produk dapat dibuat secara optimal (Rosato dkk, 2000).

Salah satu *software* yang dapat digunakan untuk melakukan proses simulasi adalah Autodesk Moldflow Adviser 2019. *Output* dari *software* ini adalah parameter proses injeksi yang optimal untuk digunakan pada mesin secara langsung. Geometri produk, desain cetakan, beserta jenis material dijadikan sebagai *input* awal *software* sebelum proses simulasi. Jenis material yang digunakan dapat dipilih dari *database* yang dimiliki *software* atau dengan membuat *database* baru dengan data sifat-sifat material sebagai masukannya. Tampilan dari

Autodesk Moldflow Adviser 2019 setelah melakukan *input* geometri produk, desain cetakan, dan jenis material ditunjukkan pada Gambar 2.8.

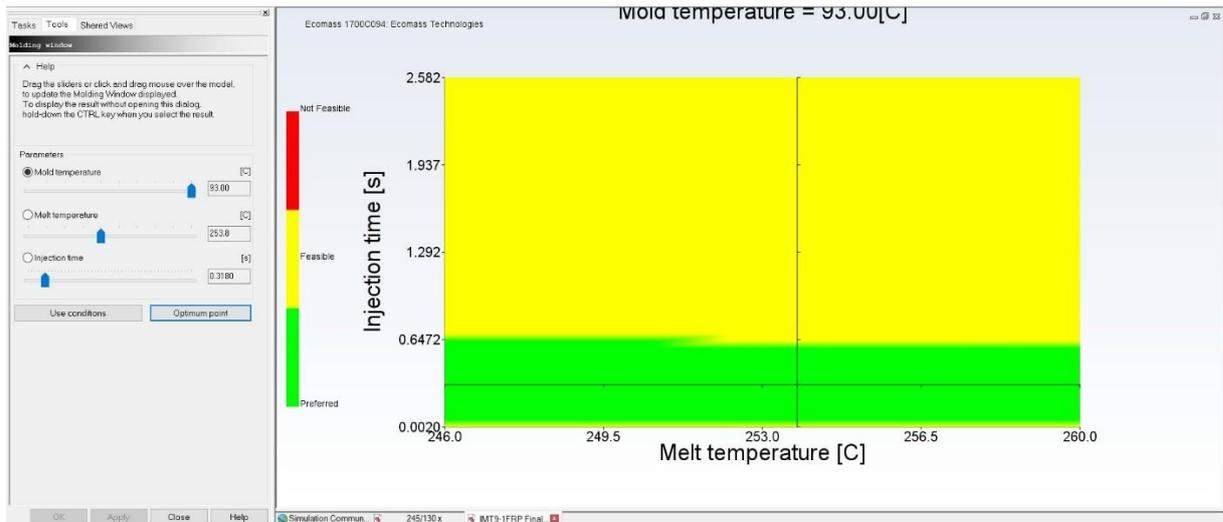


Gambar 2.8 Ilustrasi Autodesk Moldflow Adviser 2019 Setelah Melakukan *Input* Geometri Produk, Desain Cetakan, dan Jenis Material (Autodesk, 2019)

Setelah semua *input* dimasukkan, maka dapat dilanjutkan dengan proses simulasi. Terdapat beberapa simulasi yang dapat dilakukan pada *software* Autodesk Moldflow Adviser 2019. “Molding Window” adalah salah satu simulasi yang dapat dilakukan Autodesk Moldflow Adviser 2019. “Molding Window” dilakukan untuk mendapatkan rekomendasi parameter proses temperatur leleh, temperatur cetakan, dan waktu injeksi. Rekomendasi yang diberikan berdasarkan tipe material, geometri cetakan, lokasi injeksi, dan maksimal tekanan injeksi. Hasil dari simulasi ditunjukkan dengan tiga jenis kondisi yaitu *preferred* dengan warna hijau, *feasible* dengan warna kuning, dan *not feasible* dengan warna merah. Ilustrasi dari simulasi hasil “Molding Window” ditunjukkan pada Gambar 2.9. Penjelasan lebih rinci mengenai warna dan artinya ditunjukkan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Penjelasan Hasil “Molding Window” (Autodesk, 2019)

Hasil	Pengertian
Hijau	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak mengalami <i>short shot</i> - Tekanan injeksi yang dibutuhkan lebih besar dibandingkan 80% dari tekanan injeksi maksimum mesin - Temperatur material melebihi nilai temperatur leleh ditambah 10°C dan kurang dari nilai temperatur leleh dikurangi 10°C - Nilai <i>shear stress</i> kurang dari batas maksimum rekomendasi - Nilai <i>shear rate</i> kurang dari batas maksimum rekomendasi
Kuning	<ul style="list-style-type: none"> - Produk hasil injeksi tidak mengalami <i>short shot</i> - Tekanan injeksi yang dibutuhkan kurang dari tekanan injeksi maksimum dari mesin. - Nilai <i>shear rate</i> di luar batas rekomendasi maksimum material - Nilai <i>shear stress</i> di luar batas rekomendasi maksimum material
Merah	<ul style="list-style-type: none"> - Produk hasil injeksi tidak mengalami <i>short shot</i> - Tekanan injeksi yang dibutuhkan melebihi tekanan injeksi mesin

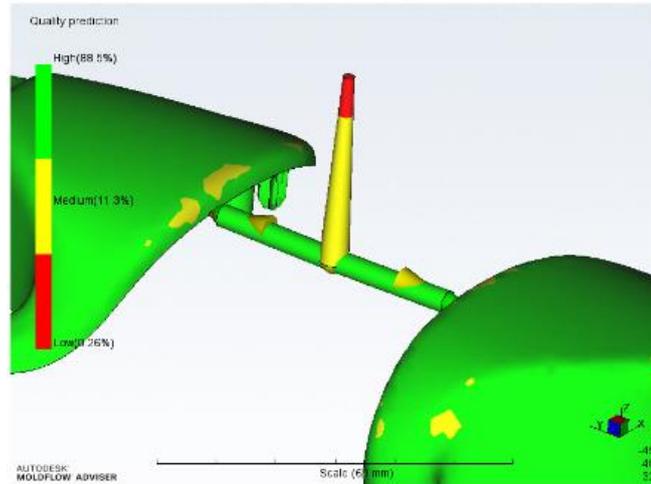


Gambar 2.9 Hasil Simulasi “Molding Window” (Autodesk, 2019)

Simulasi lain yang dapat dilakukan menggunakan Autodesk Moldflow Adviser 2019 adalah “Fill”, “Pack”, dan “Warp”. Analisis “Fill” adalah simulasi untuk mendapatkan rekomendasi nilai dari beberapa parameter proses injeksi seperti waktu pengisian, tekanan injeksi, dan volume material yang diinjeksikan. Selain itu juga didapatkan nilai prediksi kualitas (*quality prediction*) produk, *pressure drop* ketika proses injeksi, dan *weld lines* pada hasil produk. *Quality prediction* pada Autodesk Moldflow dapat digunakan untuk menjadi acuan parameter proses injeksi yang paling optimal untuk mendapatkan hasil produk sebaik mungkin. *Quality prediction* menunjukkan prakiraan sifat mekanik dan penampilan dari produk. *Quality prediction* didapatkan dari perhitungan tekanan, temperatur, dan lain-lain. Adapun penjelasan dari *quality prediction* beserta contoh dari hasil *quality prediction* ditampilkan pada Tabel 2.9 dan Gambar 2.10.

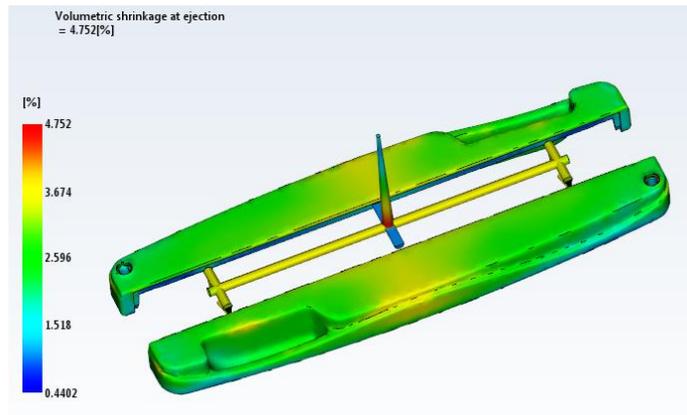
Tabel 2.9 Hasil *Quality Prediction* (Autodesk, 2019)

Hasil	Pengertian
<i>High Quality</i>	- Semua faktor yang mempengaruhi kualitas dari produk adalah diterima
<i>Medium Quality</i>	- Membutuhkan tekanan injeksi yang lebih besar
	- Temperatur terlalu rendah atau terlalu tinggi
	- Waktu pendinginan terlalu lama
	- Nilai <i>shear rate</i> melebihi batas rekomendasi material
<i>Low Quality</i>	- Nilai <i>shear stress</i> melebihi batas rekomendasi material
	- <i>Pressure drop</i> yang terjadi lebih besar 80% dari tekanan injeksi yang diberikan.
	- Temperatur menurun drastis dari batas minimum material
	- Temperatur pada aliran terdepan terlalu tinggi
	- Waktu pendinginan terlalu lama
	- Nilai <i>shear rate</i> melebihi batas rekomendasi material
	- Nilai <i>shear stress</i> melebihi batas rekomendasi material

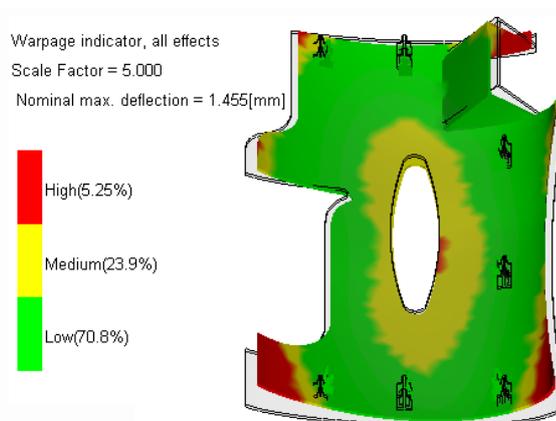


Gambar 2.10 Hasil *Quality Prediction* (Autodesk, 2019)

Analisis “Pack” adalah simulasi untuk mendapatkan nilai *shrinkage* pada produk. Selain itu, dari analisis “Pack” juga didapatkan tekanan *packing* dan waktu *packing* yang direkomendasikan. Kemudian terdapat analisis “Warp” yaitu analisis simulasi yang dilakukan untuk mendapatkan nilai kemungkinan terjadinya *warpage*. Adapun ilustrasi nilai *shrinkage* dan *warpage* ditunjukkan pada Gambar 2.11.



(a)



(b)

Gambar 2.11 (a) Hasil *Volumetric Shrinkage*, (b) Hasil *Warpage*

2.7 Optimasi Taguchi-Grey-Fuzzy

Taguchi merupakan metode desain eksperimen untuk mendapatkan produk dengan kualitas terbaik tanpa meningkatkan biaya yang dibutuhkan. Selain itu, metode Taguchi juga digunakan karena yang paling tidak sensitif terhadap variasi lingkungan dan gangguan lainnya (C. L. Lin, 2004). Kekurangan dari metode Taguchi adalah hanya dapat untuk menyelesaikan desain eksperimen dengan satu variabel respons saja. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan metode *grey relational analysis* (GRA). Dengan menggunakan metode GRA, didapatkan *grey relational coefficient* untuk menganalisis hubungan antara beberapa respons. Penggunaan logika *fuzzy* dilakukan untuk mengurangi kekaburan dalam proses perhitungan agar didapatkan nilai keluaran yang lebih optimal (Senthilkumar et al., 2015). Langkah yang dilakukan untuk melakukan metode Taguchi-grey-fuzzy adalah sebagai berikut:

2.7.1 Penentuan Derajat Kebebasan

Untuk menentukan ukuran matriks ortogonal eksperimen yang digunakan, perlu menghitung derajat kebebasan dari eksperimen. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk memperoleh jumlah minimum percobaan yang harus dilakukan dan matriks yang sesuai sehingga hasil dari eksperimen optimal. Adapapun persamaan yang digunakan untuk perhitungan derajat kebebasan (Soejanto, 2009).

$$V_{OA} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.4)$$

$$V_{fl} = \text{banyak level} - 1 \quad (2.5)$$

$$\text{Total}V_{fl} = (\text{banyak faktor}) \cdot (V_{fl}) \quad (2.6)$$

Derajat kebebasan dari *orthogonal array* (V_{OA}) diperlukan untuk menentukan jumlah eksperimen yang diamati. Derajat kebebasan faktor dan level (V_{fl}) untuk menghitung jumlah level yang harus diuji pada sebuah faktor. Matriks ortogonal yang sesuai adalah harus lebih besar atau sama dengan total derajat faktor dan level dari eksperimen ($\text{Total}V_{fl}$).

2.7.2 Ukuran Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang digunakan akan menentukan jumlah minimum yang perlu dilakukan dalam eksperimen. Ukuran matriks ortogonal ditentukan berdasarkan jumlah derajat kebebasan dari eksperimen. Ukuran derajat kebebasan dari matriks ortogonal harus lebih besar atau sama dengan jumlah derajat kebebasan dari eksperimen. Matriks ortogonal Taguchi dilambangkan dengan bentuk persamaan $L_a(b^c)$ dengan L adalah rancangan bujur sangkar latin, a adalah jumlah baris eksperimen, b adalah jumlah level pada tiap faktor, dan c adalah jumlah faktor. Tabel matriks ortogonal dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Matriks Ortogonal (Soejanto, 2009)

2 Level	3 Level	4 Level	5 Level	Mixed level
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_{25}(5^6)$	$L_{18}(2^1 \times 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$	-	$L_{32}(2^1 \times 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(3^{40})$	-	-	$L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$	-	-	-	$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$
$L_{32}(2^{31})$	-	-	-	$L_{54}(2^1 \times 3^{25})$
$L_{64}(2^{63})$	-	-	-	$L_{50}(2^1 \times 5^{11})$

2.7.3 Rasio Signal-to-Noise

Rasio *signal-to-noise* (S/N) digunakan untuk mendapatkan performa karakteristik yang terdefiasi dari nilai yang diinginkan. Untuk mendapatkan rasio S/N perlu diketahui terlebih dahulu *loss function*. *Loss function* adalah deviasi antara nilai eksperimen dengan nilai yang diinginkan. Terdapat tiga kategori *loss function* yaitu *lower-the-better* (semakin kecil semakin baik), *higher-the-better* (semakin besar semakin baik), dan *nominal-the-better* (nilai tertentu semakin baik). (Tarng dkk, 2000). Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan *loss function lower-the-better* adalah

$$L = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k^2 \quad (2.7)$$

untuk kategori *loss function higher-the-better* adalah

$$L = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{y_k^2} \quad (2.8)$$

dan yang terakhir untuk kategori *loss function nominal-the-better* adalah

$$L = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - y_0)^2 \quad (2.9)$$

dengan nilai dari *loss function* dipengaruhi oleh jumlah eksperimen (n) dan nilai dari masing-masing proses (y). Perhitungan nilai rasio S/N setelah didapatkan nilai *loss function* adalah dengan menggunakan rumus berikut.

$$\frac{S}{N} = -10 \log L \quad (2.10)$$

2.7.4 Grey Relational Analysis

Grey relational analysis (GRA) adalah metode yang digunakan untuk melakukan optimasi eksperimen multi respon. Hal ini dilakukan dengan menggabungkan beberapa respon menjadi satu respon. Tahapan pertama dari proses GRA adalah dengan melakukan proses normalisasi data (Das dkk, 2015). Proses normalisasi data bergantung pada kategori respon yaitu *lower-the-better* (semakin kecil semakin baik), *higher-the-better* (semakin besar semakin baik), dan *nominal-the-better* (nilai tertentu semakin baik) (Kumar dkk, 2019). Adapaun rumus dari normalisasi data dengan kategori *lower-the-better* adalah

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^\circ(k) - x_i^\circ(k)}{\max x_i^\circ(k) - \min x_i^\circ(k)} \quad (2.11)$$

untuk kategori *higher-the-better* adalah

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^\circ(k) - \min x_i^\circ(k)}{\max x_i^\circ(k) - \min x_i^\circ(k)} \quad (2.12)$$

dan yang terakhir untuk kategori *nominal-the-better* adalah

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i^\circ(k) - X^\circ|}{\max \{\max x_i^\circ(k) - X^\circ, X^\circ - \min x_i^\circ(k)\}} \quad (2.13)$$

dengan

- $x_i^*(k)$ = nilai normalisasi rasio S/N ke-i pada respons eksperimen ke-k
- $x_i^\circ(k)$ = nilai rasio S/N ke-i pada respons eksperimen ke-k
- $\max x_i^\circ(k)$ = nilai terbesar dari keseluruhan rasio S/N
- $\min x_i^\circ(k)$ = nilai terkecil dari keseluruhan rasio S/N
- X° = nilai target yang diinginkan

Setelah dilakukan proses normalisasi, maka dapat dilakukan tahap berikutnya yaitu menghitung nilai dari *grey relation coefficient* (GRC). GRC adalah hubungan antara kondisi yang ideal dengan kondisi yang aktual dari respons yang dinormalisasikan (Das dkk, 2015). Perhitungan dari GRC dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (2.14)$$

Perumusan dari nilai *deviation sequence* adalah

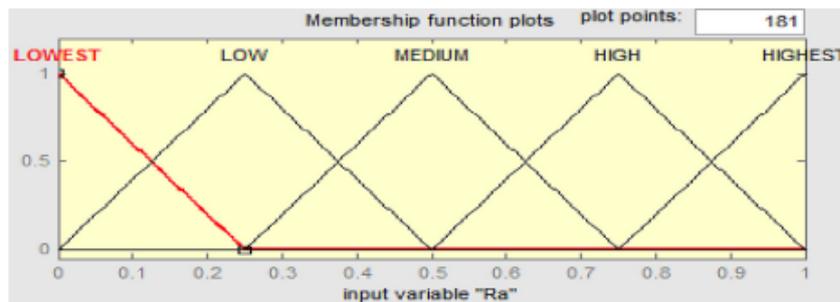
$$\Delta_{0,i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (2.15)$$

dengan

- Δ_{min} = nilai minimum dari *deviation sequence*
- Δ_{max} = nilai maksimum dari *deviation sequence*
- ξ = koefisien bernilai 0,5
- $x_0^*(k)$ = nilai terbesar dari normalisasi rasio S/N sebesar 1

2.7.5 Grey-Fuzzy Reasoning Grade

Dari hasil perhitungan yang didapat menggunakan *grey relational analysis* akan muncul ketidakpastian. Untuk mengurangi ketidakpastian tersebut dapat diperiksa menggunakan logika *fuzzy* yang dinamakan *grey-fuzzy reasoning grade* (GRFG). Optimasi menggunakan logika *fuzzy* terbagi atas tiga bagian yaitu fungsi keanggotaan, logika *fuzzy*, dan *defuzzification*. Pada tahap pertama, nilai GRC yang didapat dari tahap sebelumnya di-*fuzzify* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan digunakan untuk mendefinisikan bagaimana nilai *input* (GRC) dan *output* (GRFG) dipetakan pada sebuah nilai antara 0 dan 1 dalam bentuk kurva (Das dkk, 2015). Contoh kurva fungsi keanggotaan diilustrasikan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Ilustrasi Kurva Fungsi Keanggotaan (Das dkk, 2015)

Tahap selanjutnya adalah menentukan logika *fuzzy* yang digunakan. Logika *fuzzy* ditentukan berdasarkan *input* dari fungsi keanggotaan terhadap kesimpulan *output*. Logika *fuzzy*

berbentuk serangkaian logika *if-then* yang memiliki jumlah *input* dan *output* bergantung pada kebutuhan. Sebagai contoh, berikut adalah logika *fuzzy* dengan 2 *input* dan 1 *ouput*.

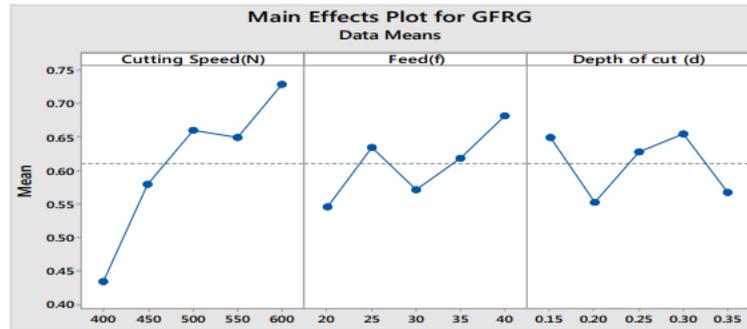
Aturan 1 : Jika x_1 adalah A_1 dan x_2 adalah B_1 , maka y adalah C_1

Aturan 2 : Jika x_1 adalah A_2 dan x_2 adalah B_2 , maka y adalah C_2

⋮

Aturan n : Jika x_1 adalah A_n dan x_2 adalah B_n , maka y adalah C_n .

Pada tahap terakhir, dilakukan proses *defuzzification*. Pada proses ini, nilai dari *fuzzy* dikonversikan menjadi nilai yang lebih *crisp* (tegas). Hasil nilai GFRG diilustrasikan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Ilustrasi Dari Hasil Proses GFRG (Das dkk, 2015)

2.7.6 Analysis of Variance (ANOVA)

Analysis of variance (ANOVA) atau analisis variansi dilakukan untuk mengetahui variabel proses yang paling berpengaruh terhadap variabel respons yang diteliti (Soepangkat & Pramujati, 2013). Nilai-nilai yang digunakan pada ANOVA berdasarkan GFRG yang didapatkan dari tahapan sebelumnya. Perhitungan ANOVA terdiri dari derajat kebebasan (DF), jumlah kuadrat (SS), jumlah kuadrat tengah (MS), jumlah kuadrat sesungguhnya (SS'), dan nilai kontribusi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.11.

Hasil dari ANOVA akan didapatkan *p-value* dan persen kontribusi. *P-value* digunakan untuk melakukan uji hipotesis terhadap nilai tingkat kepercayaan yang digunakan. Jika nilai *p-value* lebih kecil dari nilai tingkat kepercayaan, maka parameter yang diujikan pada penelitian berpengaruh terhadap respons percobaan. Persen kontribusi menyatakan besarnya pengaruh dari parameter yang diteliti terhadap respons percobaan.

Tabel 2.11 Perhitungan ANOVA

Parameter	DF	SS	MS	Kontribusi
Variabel	$a - 1$	$SS_{TR} = n \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y})^2$	$MS_T = \frac{SS_T}{DF}$	$\%Tr = \frac{SS_{TR}'}{SS_T}$
Error	$N - a - 1$	$SS_E = SS_T - SS_{TR}$	$MS_E = \frac{SS_E}{DF}$	$100\% - \%Tr$
Total	$N - 1$	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y)^2$		100%

2.7.7 Uji Konfirmasi

Setelah semua tahapan dilakukan, perlu memvalidasi dari hasil perhitungan yang didapat. Untuk melakukan eksperimen konfirmasi, perlu untuk menghitung rata-rata GFRG dengan menggunakan nilai GFRG optimal yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya (Soepangkat & Pramujati, 2013). Rumus dari perhitungan rata-rata GFRG adalah sebagai berikut:

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^a \hat{\gamma}_i - \gamma_m \quad (2.16)$$

dimana,

γ_m = Total rata-rata GFRG

$\hat{\gamma}_i$ = Rata-rata GFRG optimal

i = Banyaknya parameter proses pada eksperimen

Untuk memvalidasi hasil eksperimen, ditentukan dengan *confidence interval* untuk menguji eksperimen konfirmasi yang dilakukan apakah masih dalam batas *confidence interval*. Rumus yang digunakan untuk melakukan perhitungan *confidence interval* adalah sebagai berikut:

$$CI = \sqrt{F_{(\alpha;v1;v2)} MS_E [1/\eta_{eff} + 1/r]} \quad (2.17)$$

dimana,

$F_{(\alpha;v1;v2)}$ = F-ratio (dari tabel F)

α = Level kepercayaan = 0,05

$v1$ = 1

$v2$ = Derajat kebebasan *error*

MS_E = *Mean Square Error*

η_{eff} = Banyaknya pengamatan efektif

r = Banyak sampel pada percobaan konfirmasi

2.8 Penelitian Terdahulu

Pernah dilakukan sebuah penelitian oleh Lin dan Chen (2021) untuk mengetahui pengaruh dari parameter proses *injection molding* terhadap kebulatan dan konsentrisitas dari teleskop yang dibuat dengan material PA66. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* Moldflow Moldex 3D. Optimasi juga dilakukan pada penelitian tersebut menggunakan desain eksperimen Taguchi. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa parameter proses yang paling berpengaruh terhadap kebulatan dan konsentrisitas dari produk teleskop adalah temperatur leleh dan tekanan *packing*. Adapun nilai parameter dan variasi yang digunakan disajikan pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Variasi Nilai Parameter Proses dari Penelitian “*Taguchi Optimization of Roundness and Concentricity of a Plastic Injection Molded Barrel of a Telecentric Lens*” (C.M. Lin & Chen, 2021)

Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Peringkat Kontribusi
Tekanan Injeksi (MPa)	180	200	220	240	4
Tekanan <i>Packing</i> (MPa)	180	200	220	240	2
Temperatur Leleh (°C)	275	280	285	290	1
Temperatur Cetakan (°C)	70	80	90	100	5
Waktu Pendinginan (s)	11	13	15	17	3

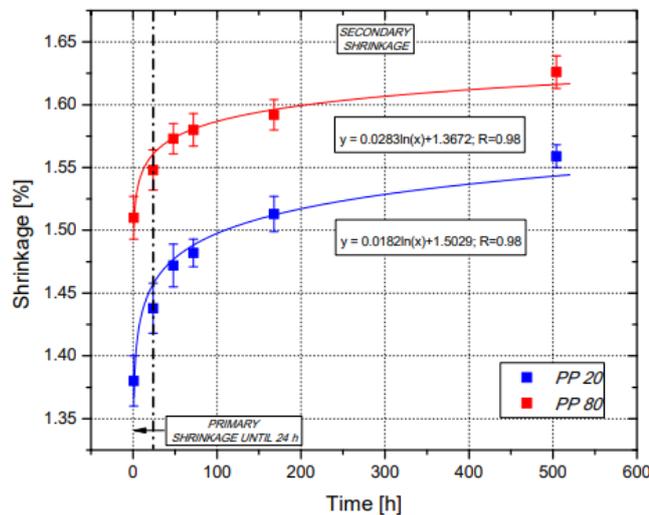
He dan Wu (2021) melakukan penelitian untuk mendapatkan solusi dari permasalahan kurangnya akurasi dimensi yang timbul akibat deformasi *non-linear shrinkage* pada roda gigi dengan material plastik *polyformaldenide* (POM). Metode yang digunakan pada eksperimen ini adalah dengan menggunakan analisis numerik dan simulasi dengan aplikasi Moldflow. Perhitungan statistik yang digunakan menggunakan ANOVA. Dari hasil ANOVA, didapatkan

bahwa temperatur leleh memiliki pengaruh paling besar terhadap *non-linear shrinkage*. Nilai parameter dan variasi yang digunakan disajikan pada Tabel 2.14.

Tabel 2.13 Variasi Nilai Parameter Proses dari Penelitian “*A Practical Numerical Approach to Characterizing Non-Linear Shrinkage and Optimizing Dimensional Deviation of Injection-Molded Small Module Plastic Gears*” (He & Wu, 2021)

Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Peringkat Kontribusi
Temperatur Leleh (°C)	190	200	210	220	230	1
Temperatur Cetakan (°C)	70	80	90	100	110	4
Tekanan <i>Packing</i> (MPa)	40	50	60	70	80	5
Waktu <i>Packing</i> (s)	15	20	25	30	35	3
Temperatur Pendingin (°C)	10	15	20	25	30	2

Pernah dilakukan sebelumnya penelitian untuk mengetahui ketergantungan waktu pasca-proses dari *shrinkage* dan sifat mekanik material *polypropylene* (Kościeszko dkk, 2021). Sifat-sifat yang menjadi respons pada penelitian ini adalah *shrinkage*, massa jenis, derajat kristalinitas, sifat tarik, dan kekuatan impak. Pada penelitian ini, material yang diinjeksikan dengan dua temperatur cetakan yang berbeda yaitu 20°C dan 80°C dan dikondisikan selama 504 jam pada temperatur 23°C. Kemudian, spesimen di-*annealing* selama 24 jam dengan temperatur 140°C untuk mempercepat penuaan. Hasil dari eksperimen ini didapatkan bahwa waktu pasca-proses dapat mempengaruhi *shrinkage* dan sifat mekanik dari *propylene* yang dijadikan material injeksi. Pada pengukuran *shrinkage*, pengukuran dilakukan pada pengondisian 1 jam, 24 jam, 48 jam, 72 jam, 168 jam, dan 504 jam. Berdasarkan Gambar 2.14 dapat disimpulkan bahwa *shrinkage* masih dapat terjadi sampai 504 jam proses pengondisian dan akan bertambah setelah di-*annealing* sebagaimana disampaikan pada Tabel 2.14.



Gambar 2.14 Grafik *Shrinkage* terhadap Waktu (Kościeszko dkk, 2021)

Tabel 2.14 Nilai *Shrinkage* Setelah Di-*annealing* (Kościeszko dkk, 2021)

Spesimen	Panjang Spesimen (mm)	<i>Shrinkage</i> (%)
PP20 504h A	164.54 ± 0.03	2.06 ± 0.2
PP80 504h A	164.59 ± 0.03	2.03 ± 0.02

Ryu dkk (2020) melakukan penelitian untuk meminimalisir *shrinkage* dan *warpage* pada material *polyamide 6* yang diperkuat dengan serat gelas menggunakan metode *microcellular*

foam injection molding. Pada metode ini, material yang diinjeksikan ditambahkan dengan gas N₂. Penelitian menggunakan metode Taguchi dan *Response Surface Material* (RSM) untuk membuat desain eksperimen dan ANOVA untuk mendapatkan nilai pengaruh dari masing-masing parameter proses yang digunakan. Simulasi juga dilakukan menggunakan *software* Autodesk Moldflow Insight untuk menganalisis *shrinkage* dan *warpage* terlebih dahulu sebelum dieksperimenkan langsung. Hasil dari penelitian tersebut berdasarkan ANOVA didapatkan bahwa temperatur leleh dan temperatur cetakan adalah yang paling berpengaruh terhadap *shrinkage* dan *warpage* secara keseluruhan. Nilai parameter yang digunakan beserta kontribusinya disajikan pada Tabel 2.15, Tabel 2.16, dan Tabel 2.17.

Tabel 2.15 Variasi Nilai Parameter Proses dan Kontribusi terhadap *Shrinkage* Searah Arah Aliran (Ryu dkk, 2020)

Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Peringkat Kontribusi
Temperatur Leleh (°C)	240	250	260	2
Temperatur Cetakan (°C)	60	70	80	1
Waktu Pendinginan (s)	20	30	40	4
Waktu <i>Packing</i> (s)	0	1	2	5
Kandungan Gas (wt %)	0.2	0.6	1.0	3

Tabel 2.16 Variasi Nilai Parameter Proses dan Kontribusi terhadap *Shrinkage* Tegak Lurus Arah Aliran (Ryu dkk, 2020)

Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Peringkat Kontribusi
Temperatur Leleh (°C)	240	250	260	3
Temperatur Cetakan (°C)	60	70	80	2
Waktu Pendinginan (s)	20	30	40	4
Waktu <i>Packing</i> (s)	0	1	2	5
Kandungan Gas (wt %)	0.2	0.6	1.0	1

Tabel 2.17 Variasi Nilai Parameter Proses dan Kontribusi terhadap *Warpage* (Ryu dkk, 2020)

Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Peringkat Kontribusi
Temperatur Leleh (°C)	240	250	260	2
Temperatur Cetakan (°C)	60	70	80	1
Waktu Pendinginan (s)	20	30	40	5
Waktu <i>Packing</i> (s)	0	1	2	4
Kandungan Gas (wt %)	0.2	0.6	1.0	3

Tabel 2.18 Penelitian Sebelumnya Mengenai Penggunaan Parameter Proses *Injection Molding*

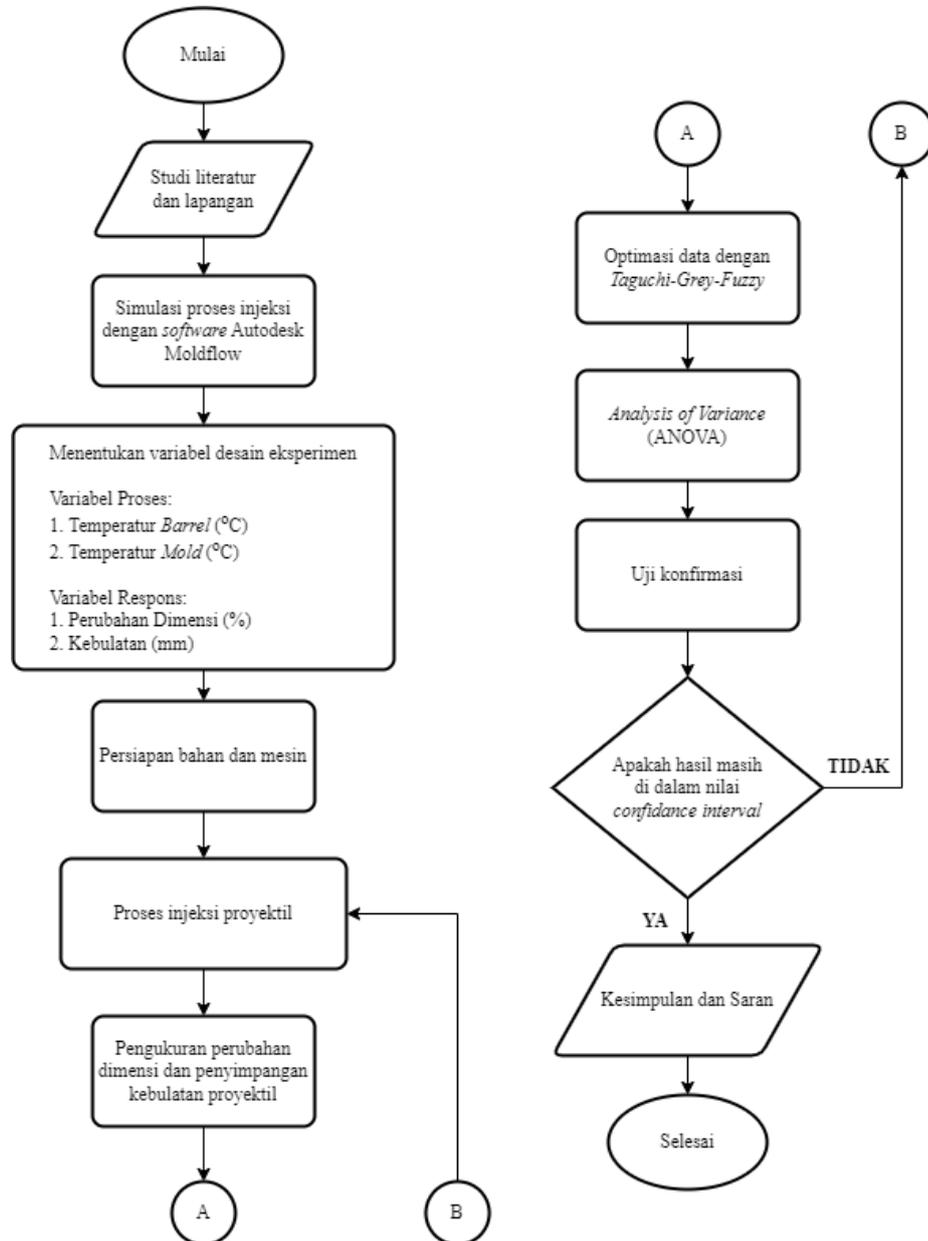
Peneliti	Respons	Metode	Parameter
C.M. Lin & Chen (2021)	Kebulatan dan konsentrisitas	Simulasi injeksi menggunakan aplikasi Moldflow Moldex 3D dengan material PA66	Peringkat kontribusi: 1. Temperatur leleh = 275 °C 2. Tekanan <i>packing</i> = 240 MPa 3. Waktu pendinginan = 17 s 4. Tekanan injeksi = 220 MPa 5. Temperatur cetakan = 90 °C
He & Wu (2021)	<i>Non-linear shrinkage</i>	Analisis numerik dan simulasi menggunakan aplikasi Moldflow dengan material <i>polyformaldenide</i> (POM)	Peringkat kontribusi: 1. Temperatur leleh = 230 °C 2. Temperatur pendingin = 10 °C 3. Waktu <i>packing</i> = 15 s 4. Temperatur pendingin = 100 °C 5. Tekanan <i>packing</i> = 70 MPa
Koćiuszko dkk (2021)	<i>Shrinkage</i> dan sifat mekanik	Spesimen diinjeksi dengan mesin Engel e-victory 110 hybrid dengan material PP. Dimensi diukur pada 1 jam, 24 jam, 48 jam, 72 jam, dan 168 jam setelah injeksi dan di- <i>annealing</i> selama 24 jam dengan temperatur 140 °C	Temperatur cetakan = 20 dan 80 Temperatur leleh = 230 °C Kecepatan injeksi = 50 cm ³ /s Tekanan <i>packing</i> = 19 MPa
Ryu dkk (2020)	<i>Shrinkage</i> dan <i>warpage</i>	Simulasi dengan Autodesk Moldflow Insight untuk memprediksi nilai <i>shrinkage</i> dan <i>warpage</i> . Saat proses injeksi ditambahkan gas N ₂ . Optimasi menggunakan Taguchi dan RSM.	Temperatur leleh = 260 °C Temperatur cetakan = 60 °C Waktu pendinginan = 20 dan 30 s Waktu <i>packing</i> = 0 dan 2 s Kandungan gas = 0.2 dan 0.6 wt %

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam melakukan penelitian pengaruh dari parameter temperatur *barrel* dan temperatur cetakan beserta optimasinya diperlukan tahapan yang harus dilakukan seperti yang ditunjukkan diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

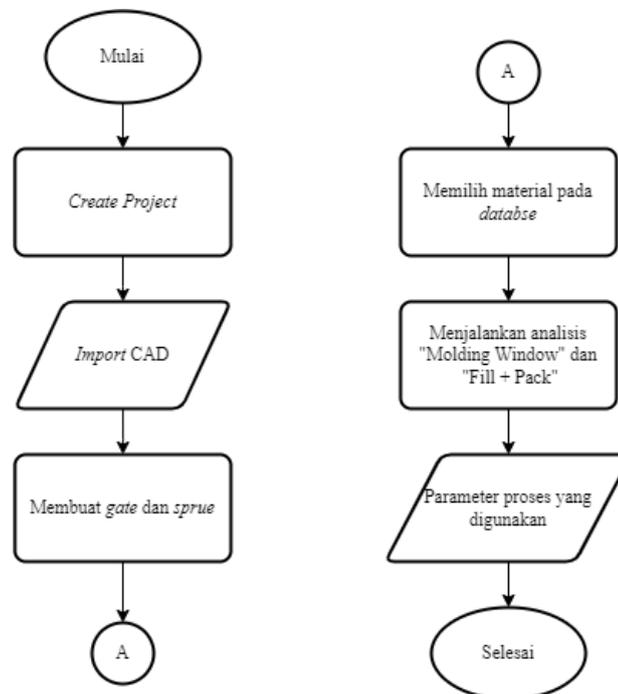
Tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini adalah berdasarkan dari diagram alir sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.1. Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

3.2.1 Studi Literatur dan Lapangan

Sebelum dilakukannya sebuah penelitian, perlu dilakukan kajian materi terlebih dahulu untuk mendapatkan dasar-dasar dari dilakukannya sebuah penelitian. Materi tersebut dapat diperoleh melalui buku dan jurnal dari penelitian terdahulu. Materi-materi yang perlu diketahui dan dipelajari seperti spesifikasi proyektil *frangible*, proses dari *injection molding*, pemahaman mengenai komposit, simulasi proses *injection molding* dengan Autodesk Moldflow Adviser, dan proses optimasi menggunakan Taguchi-Grey-Fuzzy. Studi lapangan dilakukan untuk memahami kondisi empiris dari proses eksperimen yang akan dilakukan sehingga masalah-masalah yang terjadi pada proses penelitian dapat diminimalisir. Studi lapangan juga dilakukan untuk mendapatkan nilai-nilai parameter yang akan dicoba pada proses simulasi.

3.2.2 Simulasi Proses Injeksi dengan Software Autodesk Moldflow

Software Autodesk Moldflow Adviser digunakan pada penelitian ini. Simulasi dilakukan untuk menjadi pertimbangan nilai parameter proses dan variasi yang akan digunakan pada eksperimen. Proses simulasi dilakukan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.2.

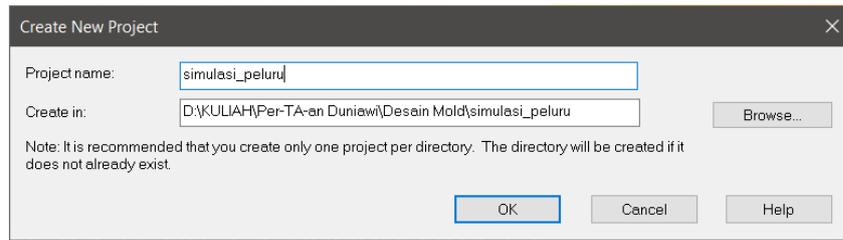


Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Menggunakan Autodesk Moldflow Adviser 2019

Berikut ini adalah tahapan dalam menggunakan *software* Autodesk Moldflow Adviser 2017:

1. *Create Project*

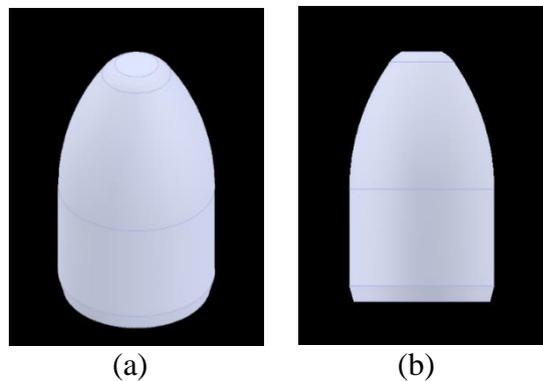
Untuk memulai menggunakan *software*, perlu untuk membuat *file project* dari simulasi. *File project* tersebut berfungsi sebagai tempat penyimpanan dari semua hasil analisis yang dilakukan pada *project*. Proses pembuatan *project* adalah dengan memilih fitur *new project* dan dilanjutkan dengan memberi nama *file* dan tempat penyimpanan *project*. Ilustrasi pembuatan *file project* ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pemberian Nama *File Project*

2. *Import CAD Model*

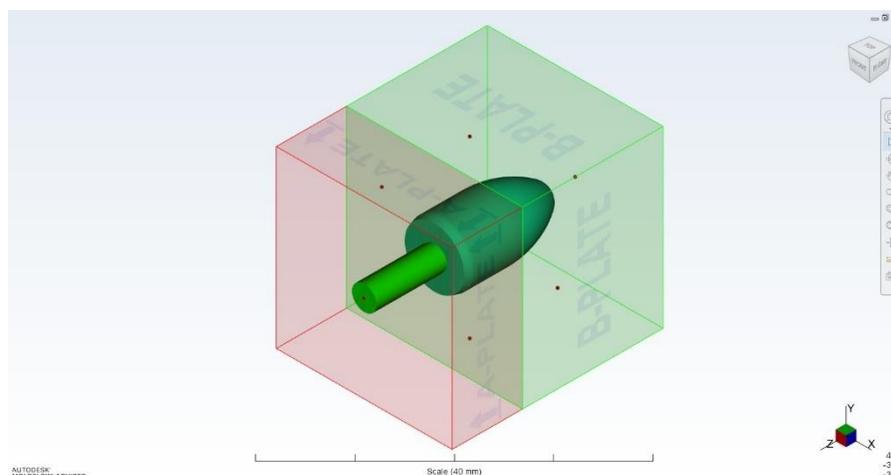
Pada langkah ini, CAD dari proyektil proyektil dimasukkan ke dalam *software. Modelling CAD* yang digunakan adalah proyektil ukuran 9 mm sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.4. Setelah dimasukkan, *modelling CAD* disusun sesuai dengan bentuk cetakan yang akan digunakan.



Gambar 3.4 (a) CAD Proyektil Ukuran 9 Mm Tampak Isometrik, (b) CAD Proyektil Ukuran 9 Mm Tampak Depan.

3. *Membuat Gate dan Sprue*

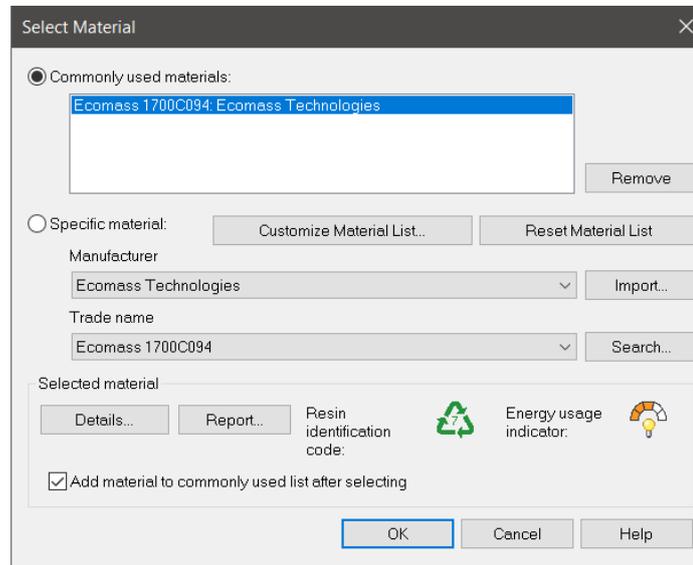
Setelah CAD di-*import*, maka CAD perlu di-*mesh* terlebih dahulu. Setelah selesai di-*mesh*, *gate* dan *sprue* diatur sesuai dengan cetakan yang akan digunakan pada eksperimen. *Gating system* dapat diatur melalui menu “Geometry” dan “Create”. Ukuran *sprue* dan *gate* dapat diatur sesuai kebutuhan.



Gambar 3.5 Cetakan dan *Gating System* yang Digunakan untuk Simulasi

4. Memilih Material Pada *Database*

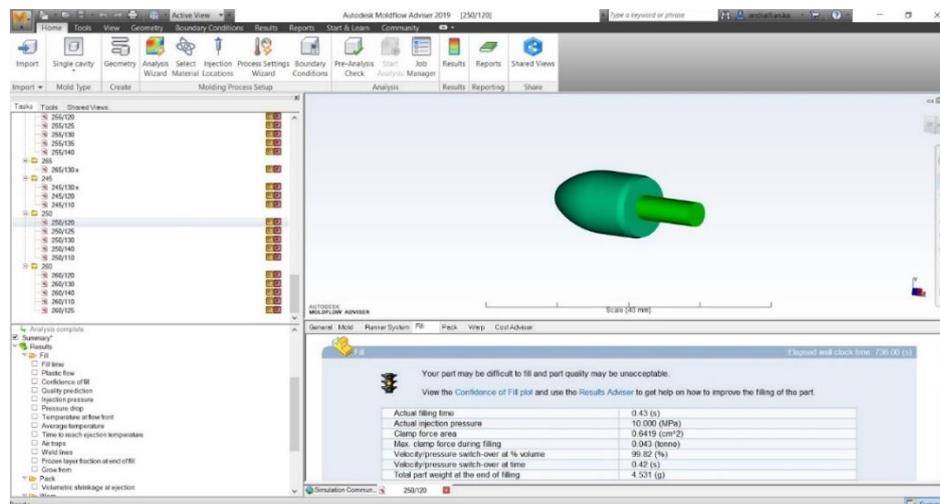
Pemilihan material dilakukan dengan menggunakan menu “Select Material”. Kemudian, “Customize Material List” dipilih untuk membuka *database* material yang dimiliki oleh *software* Autodesk Moldflow Adviser 2019. “Ecomass 1700C094: Ecomass Technologies” dipilih dari *database* material. Tampilan pemilihan material pada *software* ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Menu “Select Material” untuk Memilih Material

5. Analisis “Molding Window” dan “Fill + Pack”

Analisis “Molding Window” dilakukan untuk mengetahui parameter proses yang optimal untuk digunakan pada proses injeksi. Parameter injeksi yang didapatkan dari hasil analisis ini adalah waktu injeksi, temperatur leleh, dan temperatur cetakan. Setelah didapatkan nilai parameter yang optimal, dilanjutkan dengan analisis selanjutnya yaitu “Fill + Pack”. Analisis “Fill + Pack” dijalankan untuk mendapatkan nilai tekanan injeksi yang dibutuhkan, *quality prediction*, serta untuk mengetahui pengaruh dari tekanan *packing* pada produk yang disimulasikan. Adapun tampilan dari Autodesk Moldflow Adviser setelah melakukan analisis “Fill + Pack” ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Tampilan Autodesk Moldflow Adviser Setelah Melakukan Analisis “Fill+Pack”

6. Parameter Proses yang Digunakan

Hasil simulasi dapat dilihat melalui bagian *results*. Hasil dari *quality prediction* dan tekanan injeksi menjadi pertimbangan untuk menentukan apakah parameter dapat digunakan pada proses eksperimen. *Quality prediction* yang diharapkan adalah produk dengan kualitas *high* terbanyak atau dengan kualitas *low* tersedikit. Untuk tekanan injeksi yang diharapkan adalah yang memiliki nilai dibawah 10 MPa.

3.2.3 Desain Eksperimen

Desain eksperimen dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen serta bagaimana variasi yang perlu dilakukan untuk mengoptimasikan parameter proses injeksi. Hal ini dilakukan dengan harapan agar mendapatkan nilai variabel respons yang baik. Adapun desain eksperimen dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Menentukan Variabel Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat tiga jenis variabel yang digunakan yaitu, variabel proses, variabel konstan, dan variabel respons. Variabel proses adalah variabel yang dikendalikan dan divariasikan serta nilainya ditentukan oleh peneliti. Terdapat dua variabel proses dengan tiga level yang digunakan pada penelitian ini yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel Proses dan Level

No.	Variabel Proses	Level 1	Level 2	Level 3
1.	Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	245	250	255
2.	Temperatur Cetakan (°C)	110	120	130

Variabel konstan adalah variabel yang tidak divariasikan dan dibiarkan tetap selama eksperimen dilakukan sehingga tidak mempengaruhi nilai dari variabel respons. Variabel konstan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel Konstan

Variabel Konstan	Nilai
Tekanan Injeksi (MPa)	10
Tekanan <i> Holding</i> (MPa)	8
Waktu <i> Holding</i> (s)	5
Waktu Pendinginan (s)	30

Variabel respons adalah nilai yang menjadi keluaran dari eksperimen yang dilakukan. Variabel respons dari penelitian ini adalah nilai perubahan dimensi dan kebulatan dari proyektil.

2. Menentukan Derajat Kebebasan

Penentuan derajat kebebasan dilakukan untuk mendapatkan ukuran matriks ortogonal eksperimen yang digunakan. Derajat kebebasan eksperimen ditampilkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Derajat Kebebasan Eksperimen

No	Variabel Proses	Level	Derajat Kebebasan
1.	Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	3	2
2.	Temperatur Cetakan (°C)	3	2
Total derajat kebebasan			4

3. Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal didapatkan berdasarkan total derajat kebebasan dari eksperimen. Ukuran dari matriks ortogonal harus lebih besar dibandingkan total derajat kebebasan. Telah didapat sebelumnya bahwa total derajat kebebasan eksperimen adalah 4. Berdasarkan tabel pemilihan matriks ortogonal Taguchi, digunakan matriks ortogonal sebesar 9. Eksperimen akan dilakukan sebanyak 9 kali dengan replikasi sebanyak 2 kali sehingga, total eksperimen yang dilakukan adalah sebanyak 27 kali. Rancangan eksperimen berdasarkan matriks ortogonal ditampilkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Desain Eksperimen Berdasarkan Matriks Ortogonal

Variabel Proses		Variabel Respos	
Temperatur Barrel (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
245	110	...	...
	120	...	...
	130	...	...
250	110	...	...
	120	...	...
	130	...	...
255	110	...	...
	120	...	...
	130	...	...

3.2.4 Persiapan Bahan dan Mesin

Dalam melakukan eksperimen, mesin dan bahan yang diperlukan harus dipersiapkan terlebih dahulu. Bahan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *feedstock* dengan komposisi 90% Cu dan 10% PA6. *Feedstock* digunakan sebagai material yang diinjeksikan pada mesin. Dalam eksperimen ini, terdapat satu mesin utama dan dua alat untuk pengukuran yang digunakan yaitu mesin *injection molding*, mikrometer sekrup, dan alat pengukur kebulatan.

1. Mesin *Injection Molding*

Mesin injeksi yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin kompaksi yang dimodifikasi menjadi mesin injeksi yang terdapat pada *workshop* Laboratorium Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS. Mesin injeksi yang digunakan memiliki orientasi vertikal. Adapun ilustrasi dari mesin yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Mesin Injeksi *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan

2. Mikrometer Sekrup

Untuk mengetahui perubahan dimensi pada proyektil diperlukan alat untuk mengukur dimensi. Digunakan mikrometer sekrup untuk mendapatkan nilai pengukuran dimensi yang terjadi setelah proses injeksi selesai. Mikrometer sekrup yang digunakan pada eksperimen ini adalah mikrometer sekrup yang terdapat di *workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS. Mikrometer tersebut memiliki toleransi sebesar 0,001 mm. Mikrometer sekrup yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Mikrometer Sekrup yang Digunakan

3. Alat Pengukur Kebulatan

Untuk mengukur kebulatan dari proyektil, perlu menggunakan alat yang sesuai. Alat pengukur kebulatan yang digunakan pada eksperimen ini terdapat di *workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS. Cara menggunakan alat tersebut yaitu pertama, proyektil diletakan pada dudukan yang ada pada alat tersebut. Kemudian, ujung dari *dial indicator* diletakan pada badan proyektil. Proyektil diputar secara perlahan sehingga *dial indicator* akan mendeteksi jika ada perubahan dimensi pada proyektil. Adapun ketelitian dari *dial indicator* yang digunakan adalah 0,002 mm. Pada Gambar 3.10 ditunjukkan alat pengukur kebulatan yang digunakan.



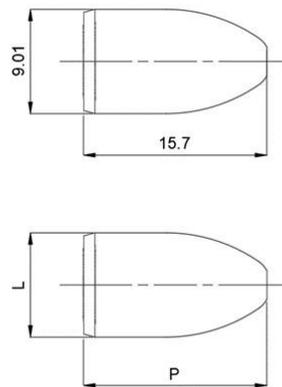
Gambar 3.10 Alat Pengukur Kebulatan yang Digunakan

3.2.6 Proses Injeksi Proyektil

Proses injeksi dilakukan setelah proses persiapan mesin dan bahan telah selesai. *Feedstock* yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam mesin injeksi. Temperatur pada *barrel* dan cetakan diatur terlebih dahulu sesuai dengan nilai parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah nilai temperatur yang diinginkan sudah terbaca dengan *thermocouple* yang terdapat pada mesin, maka proses injeksi dapat dilakukan. Total keseluruhan injeksi adalah 27 kali sesuai dengan desain eksperimen yang telah dibuat sebelumnya. Bentuk cetakan yang digunakan adalah sesuai dengan bentuk proyektil kaliber 9 mm.

3.2.7 Pengukuran Perubahan Dimensi dan Penyimpangan Kebulatan Proyektil

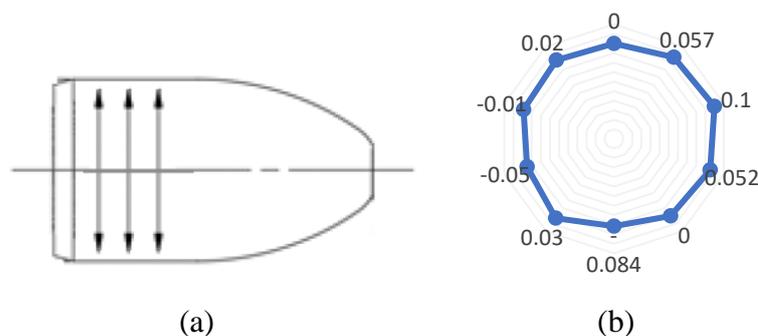
Proyektil yang sudah diinjeksikan kemudian akan diukur dengan masing-masing alat ukur yang sesuai. Terdapat dua pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pengukuran perubahan dimensi dan pengukuran berat. Sebelum semua proyektil diukur, proyektil didiamkan terlebih dahulu selama 48 jam pada suhu ruangan. Hal ini dilakukan agar *stress* yang terjadi pada proyektil berkurang sehingga tidak lagi mempengaruhi dimensi proyektil. Pengukuran dilakukan menggunakan mikrometer sekrup.



Gambar 3.11 Pengukuran Perubahan Dimensi pada Proyektil

Nilai perubahan dimensi didapatkan dengan melakukan perbandingan antara dimensi cetakan dengan dimensi hasil pengukuran. Pada penelitian ini, perbandingan dilakukan pada diameter badan proyektil (L) seperti pada Gambar 3.11 sehingga nilai diameter badan proyektil pada cetakan dibandingkan dengan diameter badan proyektil yang telah diinjeksikan menggunakan perumusan yang sama untuk mengukur *shrinkage* seperti ditunjukkan pada perumusan (2.2). Dimensi cetakan memiliki ukuran 9,01 mm dan pengukuran dilakukan pada 3 titik pengukuran seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12 (a).

Untuk melakukan pengukuran kebulatan digunakan metode *Minimum Zone Reference Circle* (MZC). Metode ini dipakai karena sesuai dengan standar ISO dan penyimpangan nilai yang terjadi paling kecil diantara metode lain (Sui & Zhang, 2012). Pada metode MZC, perhitungan yang dilakukan adalah dengan menghitung selisih dari diameter lingkaran terbesar dengan diameter lingkaran terkecil sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.7. Pengukuran kebulatan dilakukan pada titik yang sama dengan letak pengukuran perubahan dimensi yaitu pada badan proyektil. Pengukuran kebulatan pada proyektil dilakukan di 3 titik sepanjang badan proyektil sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.12 (a). Nilai kebulatan diukur tiap 36° sehingga menghasilkan 10 titik defleksi seperti pada Gambar 3.12 (b).



Gambar 3.12 (a) Titik Pengukuran Kebulatan, (b) Contoh Hasil Pengukuran Kebulatan

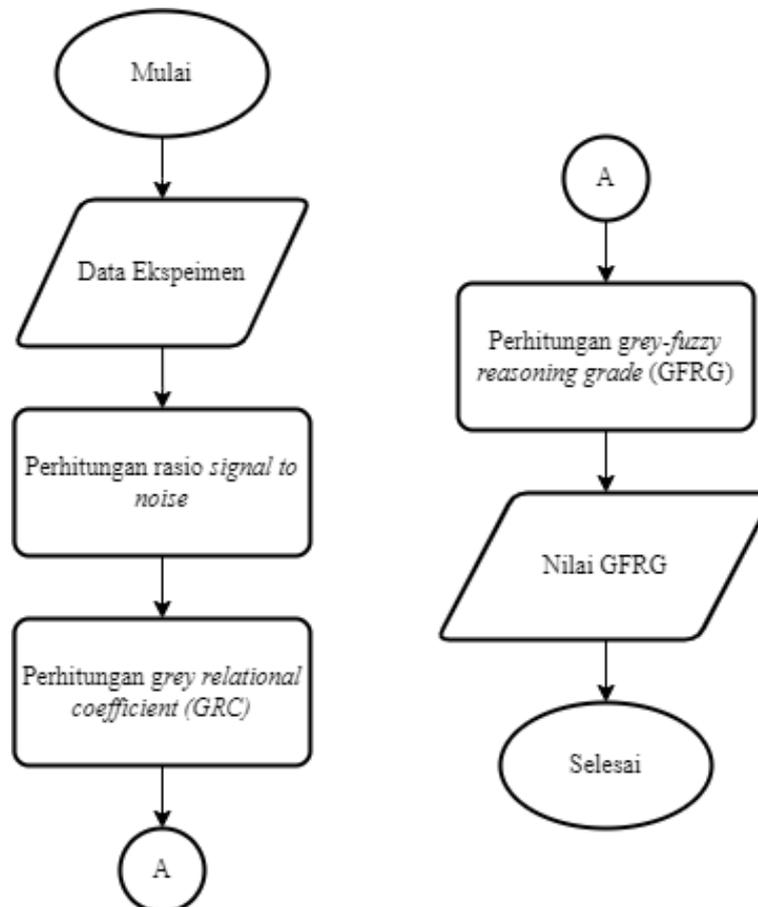
Data perubahan dimensi dan kebulatan yang didapatkan dari hasil pengujian merupakan data variabel respons pada eksperimen. Karena terdapat 2 kali replikasi, maka terdapat 3 nilai dari masing-masing respons. Penyajian data respons disajikan sebagaimana Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Data Respons Eksperimen

Eksperimen	Respons					
	Perubahan Dimensi (%)			Kebulatan (mm)		
1.	Y_{111}	Y_{112}	Y_{113}	Y_{121}	Y_{122}	Y_{123}
2.	Y_{211}	Y_{212}	Y_{213}	Y_{221}	Y_{222}	Y_{223}
⋮						
9.	Y_{911}	Y_{912}	Y_{913}	Y_{921}	Y_{922}	Y_{923}

3.2.8 Optimasi Metode Taguchi-Grey-Fuzzy

Proses optimasi dilakukan untuk mendapatkan variabel respons terbaik dari parameter proses yang digunakan. Metode optimasi yang digunakan adalah dengan Taguchi-Grey-Fuzzy. Langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan metode tersebut disajikan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Diagram Alir Proses Optimasi

1. Perhitungan Rasio *Signal to Noise*

Untuk melakukan perhitungan rasio *signal to noise*, perhitungan *loss function* dilakukan pada tiap eksperimen dilakukan terlebih dahulu. Perhitungan *loss function* yang digunakan pada eksperimen ini menggunakan kategori *lower-is-better* untuk kedua respons dengan menggunakan Persamaan (2.7). Setelah perhitungan *loss function*, dapat menghitung rasio

signal to noise dengan Persamaan (2.10). Nilai *signal to noise* yang telah didapatkan perlu dinormalisasi dengan Persamaan (2.12). Hasil perhitungan rasio S/N dan normalisasi rasio S/N dimasukkan pada tabel seperti pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Nilai Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N

Eksperimen	Rasio S/N		Normalisasi Rasio S/N	
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan
1.	X_{11}	X_{12}	Y_{11}	Y_{12}
2.	X_{21}	X_{22}	Y_{21}	Y_{22}
⋮				
9.	X_{91}	X_{92}	Y_{91}	Y_{92}

2. Perhitungan *Grey Relational Coefficient* (GRC)

Untuk melakukan perhitungan GRC, perlu untuk menghitung nilai *deviation sequence* dari tiap eksperimen dengan Persamaan (2.15). Perhitungan GRC dilakukan menggunakan Persamaan (2.14). Nilai *deviation sequence* dan GRC dimasukkan pada tabel seperti pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Nilai *Deviation Sequence* dan GRC

Eksperimen	<i>Deviation Square</i>		GRC	
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan
1.	X_{11}	X_{12}	Y_{11}	Y_{12}
2.	X_{21}	X_{22}	Y_{21}	Y_{22}
⋮				
9.	X_{91}	X_{92}	Y_{91}	Y_{92}

3. Perhitungan *Grey-Fuzzy Reasoning Grade* (GFRG)

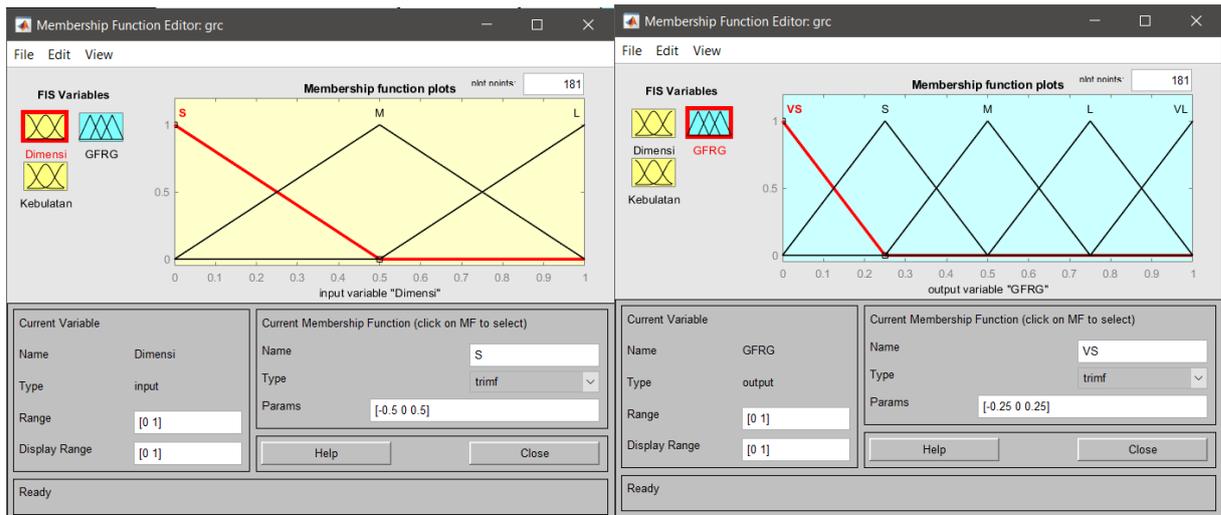
Untuk mendapatkan nilai GFRG, terdapat 3 bagian yaitu *fuzzification*, logika *fuzzy*, dan *defuzzification*. Nilai *fuzzification* didapatkan dengan menggunakan fungsi keanggotaan terhadap nilai GRC. Logika *fuzzy* dilakukan berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah dibuat. Nilai GFRG didapatkan dengan proses *defuzzification* setelah penjabaran logika *fuzzy*. Keseluruhan proses untuk mendapatkan GFRG dapat menggunakan *software* MATLAB menggunakan *tools Fuzzy Logic Toolbox*.

Proses *fuzzification* dilakukan pada awal tahapan proses GFRG. Fungsi keanggotaan yang ditentukan adalah untuk *input* (GRC) dan *output* (GFRG) pada logika *fuzzy*. Fungsi keanggotaan dari *input* (GRC) yang digunakan pada penelitian ini adalah *small* (S), *medium* (M), dan *large* (L). Untuk fungsi keanggotaan dari *output* (GFRG) yang digunakan pada penelitian ini adalah *very small* (VS), *small* (S), *medium* (M), *large* (L), dan *very large* (VL). Penggambaran fungsi keanggotaan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Fungsi Keanggotaan Logika *Fuzzy*

		GRC Perubahan Dimensi		
		S	M	L
GRC Kebulatan	S	VS	S	M
	M	S	M	L
	L	M	L	VL

Bentuk segitiga digunakan sebagai fungsi keanggotaan pada eksperimen ini sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.14.



(a)

(b)

Gambar 3.14 (a) Fungsi Keanggotaan untuk *Input*, (b) Fungsi Keanggotaan untuk *Output*

Logika *fuzzy* dibuat sesuai dengan fungsi keanggotaan yang telah dibuat. Logika *fuzzy* ini digunakan pada proses perhitungan GFRG pada *toolbox* sesuai *input* nilai GRC dari tiap respons. Contoh logika *fuzzy* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Aturan 1: Jika GRC perubahan dimensi adalah *small* dan GRC kebulatan adalah *small*, maka GFRG adalah *very small*

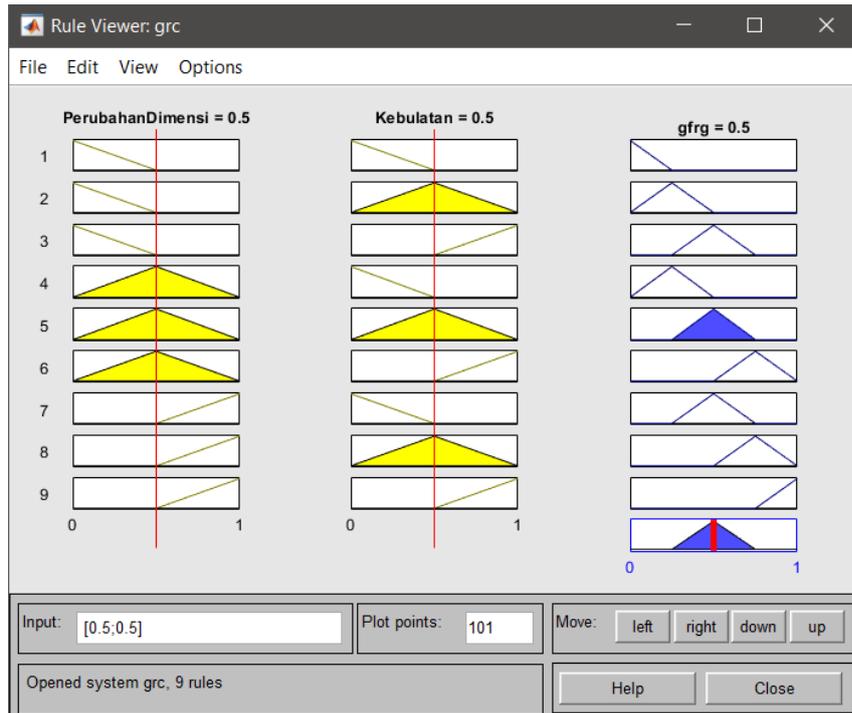
Aturan 2: Jika GRC perubahan dimensi adalah *small* dan GRC kebulatan adalah *medium*, maka GFRG adalah *small*

dan seterusnya sebagaimana disajikan pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Logika *Fuzzy*

No	GRC		GFRG
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	
1	S	S	VS
2	S	M	S
3	S	L	M
4	M	S	S
5	M	M	M
6	M	L	L
7	L	S	M
8	L	M	L
9	L	L	VL

Nilai GFRG didapat dari proses yang dilakukan menggunakan *software* MATLAB. Nilai GRC dari perubahan dimensi dan kebulatan dimasukkan ke dalam logika *fuzzy* sehingga mendapatkan nilai GFRG. Berikut contoh perhitungan GFRG pada *software* MATLAB menggunakan *fuzzy logic toolbox* ditunjukkan oleh Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Contoh Perhitungan GFRG pada MATLAB

3.2.9 Analysis of Variance (ANOVA)

Analysis of variance (ANOVA) dilakukan untuk mendapatkan nilai kontribusi dari setiap parameter proses yang diuji pada eksperimen. Perhitungan ANOVA berdasarkan nilai GFRG yang telah didapat sebelumnya. Untuk melakukan perhitungan ANOVA, digunakan perumusan berdasarkan Tabel 2.11. Perhitungan ANOVA dapat dibantu dengan menggunakan aplikasi Minitab. Hasil perhitungan ANOVA ditunjukkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Perhitungan ANOVA

Parameter	DF	SS	MS	F	P-value	Kontribusi (%)
Temperatur <i>barrel</i> (°C)
Temperatur cetakan (°C)
Error
Total	100%

3.2.11 Uji Konfirmasi

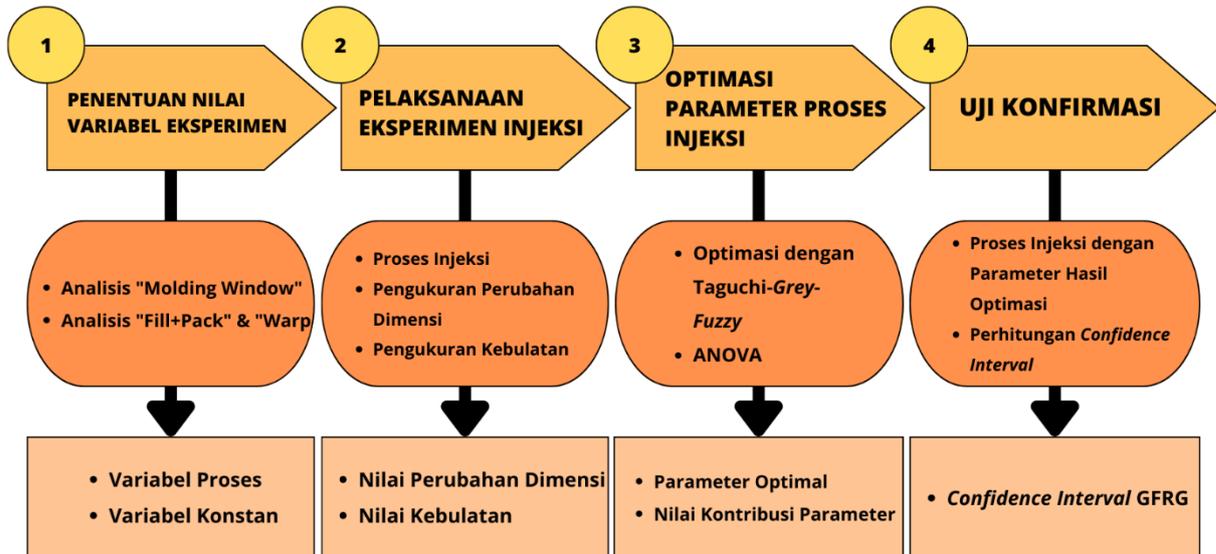
Setelah mendapatkan nilai parameter proses optimal, perlu dilakukan konfirmasi untuk mengetahui apakah perhitungan sudah dilakukan dengan tepat. Dilakukan sebanyak 3 kali uji konfirmasi. Hasil dari uji konfirmasi dibandingkan nilai rata-rata GFRG dengan *confidence interval* GFRG prediksi.

3.2.12 Kesimpulan dan Saran

Hasil dari penelitian ini perlu dibuatkan kesimpulan sebagai ringkasan dari keseluruhan jalannya penelitian. Kesimpulan yang dibuat akan menjawab rumusan masalah dan tujuan dari penelitian ini. Kemudian, saran dibuat sebagai bentuk masukan bagi peneliti selanjutnya yang ingin melakukan penelitian serupa hal-hal apa saja yang menjadi kekurangan dan perlu diperbaiki pada penelitian selanjutnya.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

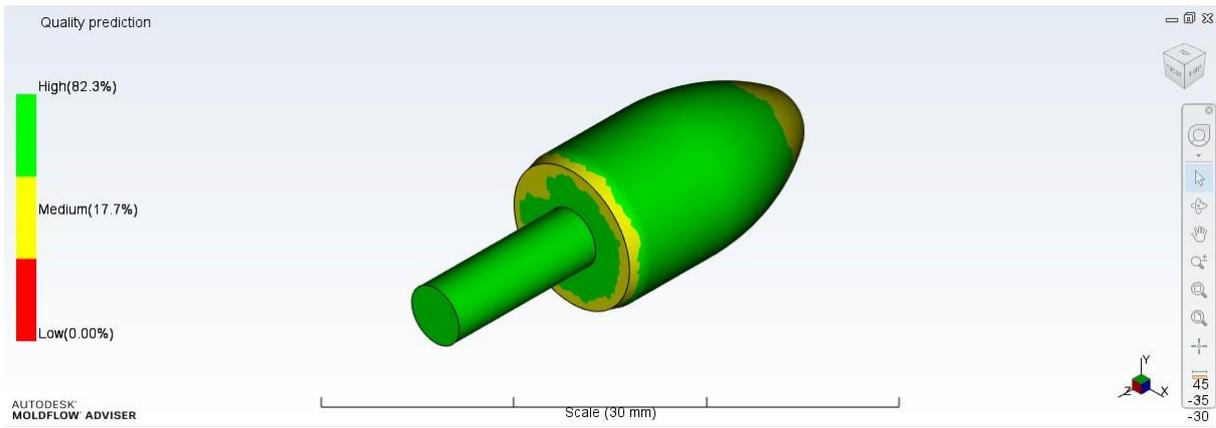
Penelitian ini dilakukan untuk mengoptimasi nilai parameter dari temperatur *barrel* dan temperatur cetakan pada proses *injection molding*. Pada penelitian ini terhadap 4 tahapan utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1. Tahap pertama adalah penentuan nilai variabel eksperimen. Penentuan ini dilakukan berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* Autodesk Moldflow Adviser 2019. Tahap yang kedua adalah proses injeksi. Pada proses injeksi silakukan eksperimen injeksi menggunakan mesin *injection molding* dan proses pengambilan data dari nilai perubahan dimensi dan kebulatan proyektil. Tahap yang ketiga adalah pengolahan data dari data yang telah diambil dari tahap sebelumnya. Adapun pengolahan data yang dilakukan yaitu proses optimasi dan *analysis of variance* (ANOVA). Proses optimasi dilakukan untuk mendapatkan nilai temperatur *barrel* dan cetakan yang optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan dari proyektil yang terkecil. Optimasi dilakukan menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy. Proses ANOVA dilakukan untuk mengetahui kontribusi dari masing-masing parameter proses terhadap kedua variabel respons. Tahapan yang terakhir adalah uji konfirmasi yang bertujuan untuk membuktikan jika nilai parameter dari hasil optimasi yang telah dilakukan adalah benar.



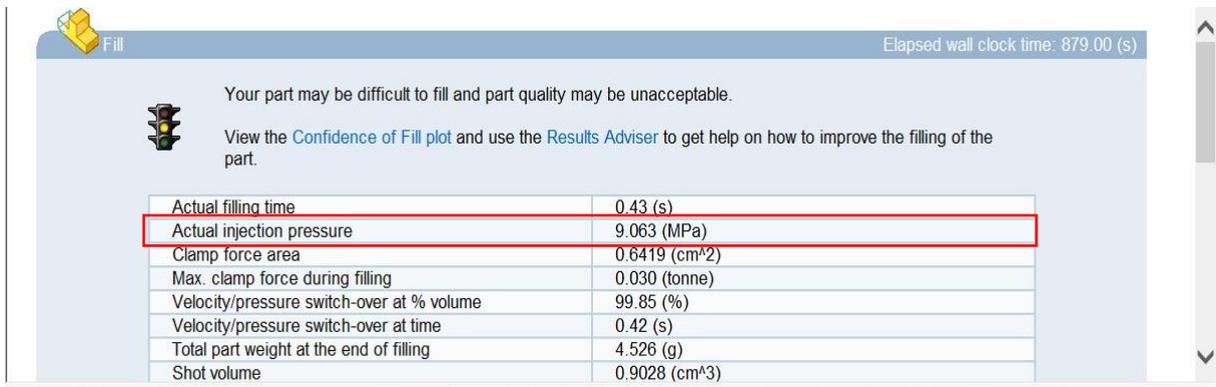
Gambar 4.1 Tahapan Utama Penelitian

4.1 Penentuan Nilai Variabel Eksperimen dengan Autodesk Moldflow Adviser 2019

Pada eksperimen ini, variabel konstan dan variabel bebas perlu ditentukan terlebih dahulu dengan proses simulasi menggunakan *software* Autodesk Moldflow Adviser 2019. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan perkiraan nilai parameter proses yang optimal sebelum digunakan pada mesin injeksi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya, parameter temperatur *barrel* dan cetakan yang optimal adalah 255°C dan 120°C, untuk tekanan injeksi dan tekanan *packing* adalah 8 MPa dan 10 MPa. Proses simulasi selanjutnya dilakukan untuk mencari variasi terbaik yang mampu diinjeksikan menggunakan mesin injeksi yang ada. Adapun proses simulasi dilakukan menggunakan analisis "Fill" untuk melihat hasil *quality prediction* dan tekanan injeksi yang sebenarnya (*actual injection pressure*) dibutuhkan untuk membuat produk proyektil. Adapun ilustrasi dari hasil *quality prediction* dan *actual injection pressure* ditunjukkan pada Gambar 4.2. Beberapa hasil analisis "Fill" yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 4.1.



(a)



(b)

Gambar 4.2 (a) Hasil *quality Prediction*, (b) Hasil *Actual Injection pressure*

Tabel 4.1 Hasil Analisis “Fill”

Temperatur Leleh (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Quality Prediction (%)		Actual Injection Pressure (MPa)
245	110	High	0	10
		Medium	37,5	
		Low	62,5	
	120	High	0	10
		Medium	66,5	
		Low	33,5	
130	High	0	10	
	Medium	86,3		
	Low	13,7		
250	110	High	24,8	10
		Medium	63,9	
		Low	11,3	
	120	High	27,2	10
		Medium	64,5	
		Low	8,32	
	125	High	34,8	10
		Medium	56,4	
		Low	8,81	
130	High	50,5	10	
	Medium	39,3		

Temperatur Leleh (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Quality Prediction (%)		Actual Injection Pressure (MPa)		
255	140	Low	10,2	9,804		
		High	76,5			
		Medium	23,5			
	110	110	Low	0	10	
			High	75,7		
			Medium	15,5		
		115	115	Low	8,77	10
				High	78,8	
				Medium	12,5	
		120	120	Low	8,71	9,063
				High	78,8	
				Medium	12,5	
		125	125	Low	8,71	8,836
				High	83,8	
				Medium	16,2	
130	130	Low	0	9,246		
		High	84,7			
		Medium	15,3			
135	135	Low	0	8,503		
		High	87,0			
		Medium	13,0			
140	140	Low	8,71	8,034		
		High	90,3			
		Medium	9,67			
260	110	Low	0	8,751		
		High	0			
		Medium	100			
	120	120	Low	0	8,068	
			High	0		
			Medium	100		
	125	125	Low	0	7,897	
			High	0		
			Medium	100		
	130	130	Low	0	7,197	
			High	0		
			Medium	100		
	140	140	Low	0	6,979	
			High	0		
			Medium	100		
265	130	Low	0	6,078		
		High	0			
		Medium	3,52			
		Low	100			

Dari hasil analisis “Fill” didapatkan bahwa variasi temperatur *barrel* yang akan digunakan pada eksperimen adalah 250°C, 255°C, dan 260°C dan temperatur cetakan yang akan digunakan pada eksperimen adalah 120°C, 130°C, dan 140°C dengan hasil *quality prediction* dan tekanan injeksi ditunjukkan pada Tabel 4.1 yang diwarnai. Namun saat diinjeksikan langsung pada mesin injeksi, terjadi kecacatan pada produk yang menggunakan parameter temperatur *barrel* 260°C dan temperatur cetakan 140°C. Kecacatan yang terjadi adalah material menempel pada cetakan sehingga pada saat proses pengeluaran dari cetakan terdapat retakan pada proyektil. Kecacatan ditunjukkan pada Gambar 4.3. Maka dari itu, dicoba kembali proses injeksi menggunakan temperatur yang lebih rendah yaitu temperatur *barrel* 245°C dan

temperatur cetakan 110°C sehingga, parameter proses dan parameter konstan yang digunakan pada eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.2.



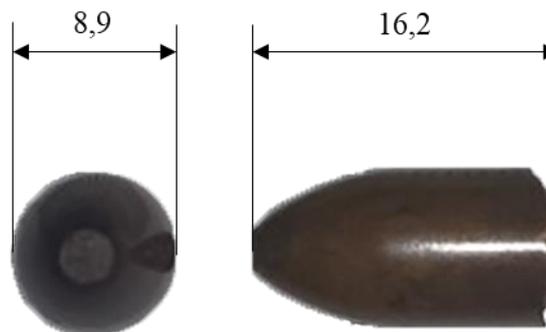
Gambar 4.3 Kecacatan pada Proyektil Hasil Injeksi

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Moldflow dengan Variabel dari Desain Eksperimen

Variabel	Nilai		
	Level 1	Level 2	Level 3
Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	245	250	255
Temperatur Cetakan (°C)	110	120	130
Tekanan Injeksi (MPa)	10		
Tekanan <i> Holding </i> (MPa)	8		

4.2 Pelaksanaan Eksperimen Injeksi

Proses dilakukan dengan menggunakan mesin *injection molding* yang terdapat pada *workshop* rekayasa material dan teknologi pertahanan. Proses injeksi dilakukan untuk membuat spesimen proyektil. Material yang diinjeksikan adalah *feedstock* dengan komposisi 90 wt% Cu/PA6. Contoh hasil proses injeksi yang dihasilkan pada eksperimen dengan desain eksperimen yang sudah ditentukan ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Proyektil *Frangible* Hasil Proses Injeksi

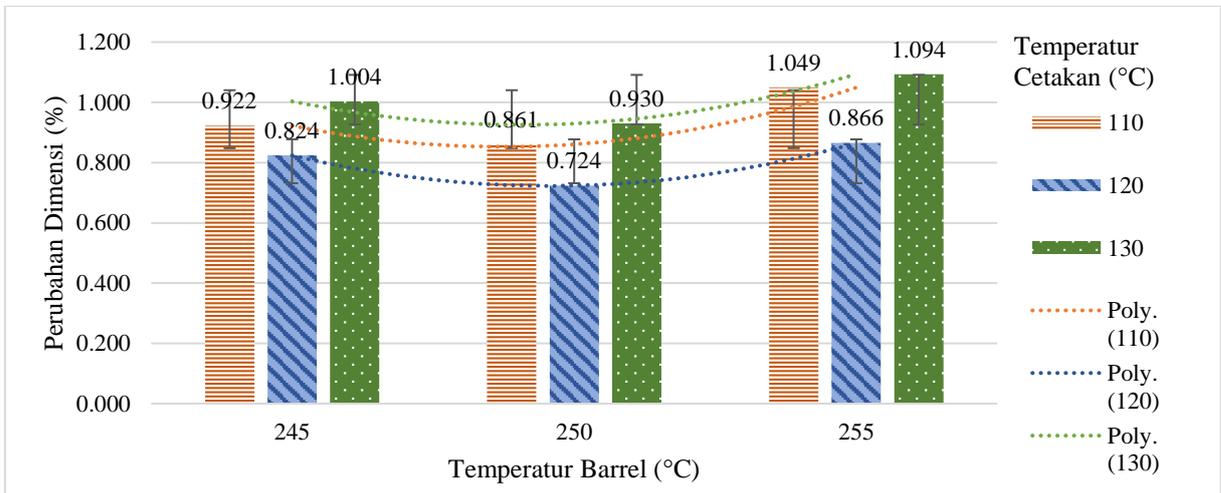
Berdasarkan desain eksperimen yang digunakan pada penelitian ini, terdapat 9 eksperimen dengan jumlah replikasi sebanyak 2 kali dari masing-masing eksperimen sehingga,

total keseluruhan proses injeksi 27 kali. Hasil data respons yang didapatkan dari proses pengukuran proyektil ditampilkan pada Tabel 4.3.

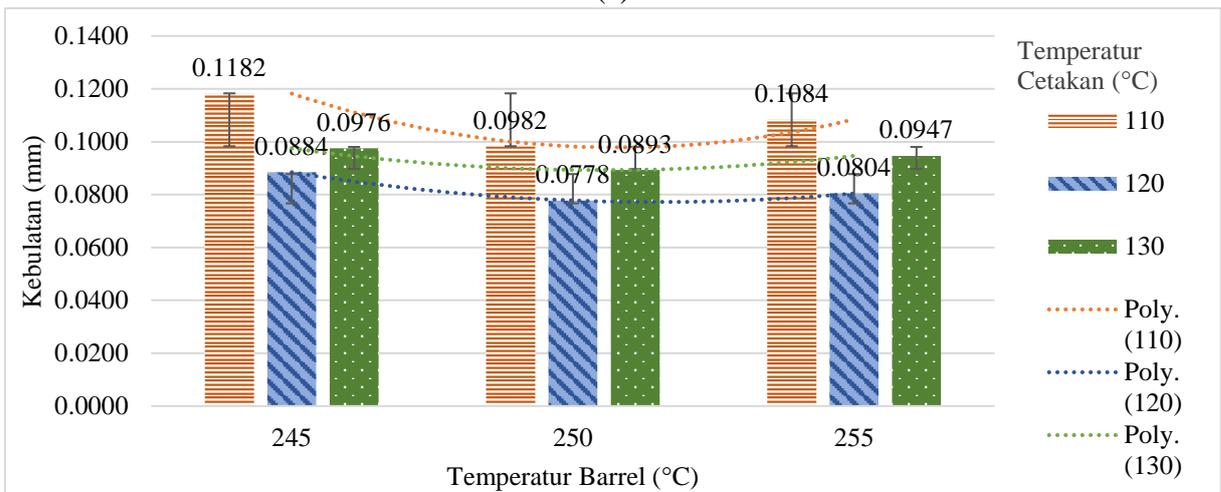
Tabel 4.3 Data Hasil Eksperimen

Variabel Proses		Variabel Respons					
Temperatur Barrel (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Perubahan Dimensi (%)			Kebulatan (mm)		
245	110	0,855	0,969	0,943	0,1013	0,1013	0,1520
	120	0,903	0,784	0,784	0,0880	0,0933	0,0840
	130	1,025	1,006	0,980	0,1320	0,0713	0,0893
250	110	0,836	0,881	0,866	0,0800	0,1333	0,0813
	120	0,703	0,707	0,762	0,0733	0,0800	0,0800
	130	0,921	0,940	0,929	0,0773	0,1093	0,0813
255	110	1,088	1,095	0,966	0,1200	0,1280	0,0773
	120	0,858	0,840	0,899	0,1027	0,0733	0,0653
	130	1,088	1,102	1,091	0,1053	0,0853	0,0933

4.2.1 Pengaruh Temperatur Barrel Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan



(a)



(b)

Gambar 4.5 (a) Grafik Temperatur Barrel dan Cetakan terhadap Perubahan Dimensi, (b) Grafik Temperatur Barrel dan Cetakan terhadap Kebulatan

Berdasarkan data dari proses eksperimen, dibuat grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5 untuk melihat pengaruh temperatur *barrel* terhadap nilai perubahan dimensi dan kebulatan. Gambar 4.5 (a) menunjukkan pengaruh temperatur *barrel* terhadap perubahan dimensi. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a) bahwa terjadi penurunan nilai perubahan dimensi pada temperatur 250°C dari temperatur 245°C dan meningkat pada temperatur 255°C. Fenomena ini terjadi pada semua variasi temperatur cetakan. Nilai perubahan dimensi terkecil terjadi pada temperatur *barrel* 250°C dan temperatur cetakan 120°C sebesar 0,724%. Nilai perubahan dimensi terbesar terjadi pada temperatur *barrel* 255°C dan temperatur cetakan 130°C sebesar 1,094%.

Kemudian pada Gambar 4.5 (b) menunjukkan pengaruh temperatur *barrel* terhadap nilai kebulatan proyektil. Dapat dilihat pada grafik bahwa terjadi penurunan nilai kebulatan pada temperatur 250°C dari temperatur 245°C dan meningkat pada temperatur 255°C. Fenomena ini terjadi pada semua variasi temperatur cetakan. Nilai kebulatan terkecil terjadi pada temperatur *barrel* 250°C dan temperatur cetakan 120°C sebesar 0,0778 mm. Nilai kebulatan terbesar terjadi pada temperatur *barrel* 245°C dan temperatur cetakan 110°C sebesar 0,1182%.

Berdasarkan hipotesis, nilai perubahan dimensi akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *barrel* dan cetakan. Namun, pada grafik timbul penurunan nilai perubahan dimensi pada temperatur *barrel* 250°C. Hal ini terjadi karena pada proses injeksi, temperatur leleh dapat mempengaruhi lamanya *gate* membeku. *Gate* yang lama membeku dapat menambah jumlah material yang masuk ke dalam *cavity* selama proses *holding*. Dalam hal ini, temperatur *barrel* 250°C menjadi titik dimana *gate* tidak cepat membeku sehingga jumlah material yang masuk lebih banyak dan berdampak pada kecilnya nilai perubahan dimensi proyektil. Yang terjadi pada temperatur *barrel* 255°C, temperatur tersebut sudah cukup tinggi untuk membuat penyusutan material lebih besar dan tidak mampu terkompensasi oleh jumlah material yang masuk.

Untuk hipotesis berikutnya, nilai kebulatan proyektil akan meningkat seiring dengan besarnya *residual stress* pada proyektil. *Residual stress* dapat ditimbulkan dari *thermal stress* akibat nilai dari temperatur *barrel* dan cetakan yang tinggi namun, juga bisa direlaksasi dengan pemilihan nilai temperatur *barrel* dan cetakan yang relatif hangat atau tinggi. Pada grafik ditunjukkan bahwa adanya penurunan nilai kebulatan pada temperatur *barrel* 250°C dan peningkatan pada temperatur *barrel* 255°C. Terjadinya penurunan dikarenakan *thermal stress* yang timbul pada saat proses injeksi menggunakan temperatur *barrel* 250°C tidak begitu besar dan masih bisa dikompensasi dengan proses relaksasi *stress* oleh temperatur cetakan sehingga didapat nilai kebulatan yang kecil. Sedangkan pada temperatur 255°C *thermal stress* yang timbul pada proses injeksi terlalu besar sehingga tidak mampu direlaksasi oleh temperatur cetakan sehingga relaksasi *stress* terjadi lebih banyak terjadi setelah dikeluarkan dari cetakan. Hal tersebut yang membuat besarnya nilai kebulatan pada temperatur 255°C.

4.2.2 Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan

Berdasarkan data dari proses eksperimen, dibuat grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5 untuk melihat pengaruh temperatur cetakan terhadap nilai perubahan dimensi dan kebulatan. Gambar 4.5 (a) menunjukkan pengaruh temperatur cetakan terhadap perubahan dimensi. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a) bahwa terjadi penurunan nilai perubahan dimensi pada temperatur 120°C dari temperatur 110°C dan meningkat pada temperatur 130°C. Fenomena ini terjadi pada semua variasi temperatur *barrel*. Nilai perubahan dimensi terkecil terjadi pada temperatur cetakan 120°C dan temperatur *barrel* 250°C sebesar 0,724%. Nilai

perubahan dimensi terbesar terjadi pada temperatur cetakan 130°C dan temperatur *barrel* 255°C sebesar 1,094%.

Kemudian pada Gambar 4.5 (b) menunjukkan pengaruh temperatur *barrel* terhadap nilai kebulatan proyektil. Dapat dilihat pada grafik bahwa terjadi penurunan nilai kebulatan pada temperatur 120°C dari temperatur 110°C dan meningkat pada temperatur 130°C. Fenomena ini terjadi pada semua variasi temperatur *barrel*. Nilai kebulatan terkecil terjadi pada temperatur cetakan 120°C dan temperatur *barrel* 250°C sebesar 0,0778 mm. Nilai kebulatan terbesar terjadi pada temperatur cetakan 110°C dan temperatur *barrel* 245°C sebesar 0,1182%.

Berdasarkan hipotesis, nilai perubahan dimensi akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *barrel* dan cetakan. Namun, pada grafik timbul penurunan nilai perubahan dimensi pada temperatur cetakan 120°C. Hal ini terjadi karena pada proses injeksi, temperatur cetakan dapat mempengaruhi lamanya *gate* membeku. Temperatur cetakan yang tinggi menyebabkan material yang masuk ke dalam *cavity* tidak langsung membeku ketika menyentuh dinding *cavity*. *Gate* yang lama membeku dapat menambah jumlah material yang masuk ke dalam *cavity* selama proses *holding*. Dalam hal ini, temperatur cetakan 120°C menjadi titik dimana *gate* tidak cepat membeku sehingga jumlah material yang masuk lebih banyak dan berdampak pada kecilnya nilai perubahan dimensi proyektil. Yang terjadi pada temperatur cetakan 130°C, temperatur cetakan tersebut sudah cukup tinggi untuk membuat penyusutan material lebih besar dan tidak mampu terkompensasi oleh jumlah material yang masuk.

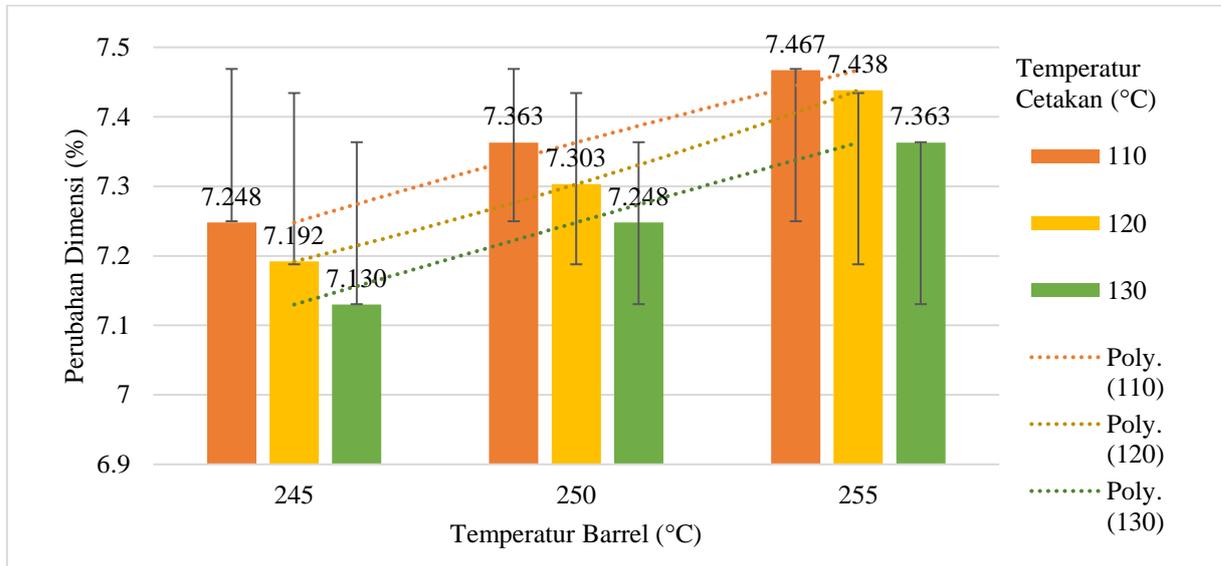
Untuk hipotesis berikutnya, nilai kebulatan proyektil akan meningkat seiring dengan besarnya *residual stress* pada proyektil. *Residual stress* dapat ditimbulkan dari *thermal stress* akibat nilai dari temperatur *barrel* dan cetakan yang tinggi namun, juga bisa direlaksasi dengan pemilihan nilai temperatur *barrel* dan cetakan yang relatif hangat atau tinggi. Pada grafik ditunjukkan bahwa adanya penurunan nilai kebulatan pada temperatur cetakan 120°C, sedikit peningkatan nilai kebulatan pada temperatur cetakan 130°C, dan nilai kebulatan tertinggi terjadi pada temperatur cetakan 110°C. Terjadinya penurunan nilai kebulatan dikarenakan *residual stress* yang timbul pada saat proses injeksi direlaksasi dengan baik pada temperatur cetakan 120°C. Pada temperatur cetakan 110°C dapat terlihat terjadinya nilai kebulatan yang tinggi dikarenakan relaksasi *residual stress* yang terjadi tidak cukup baik untuk membuat nilai kebulatan yang rendah.

Tabel 4.4 Hasil Simulasi Moldflow

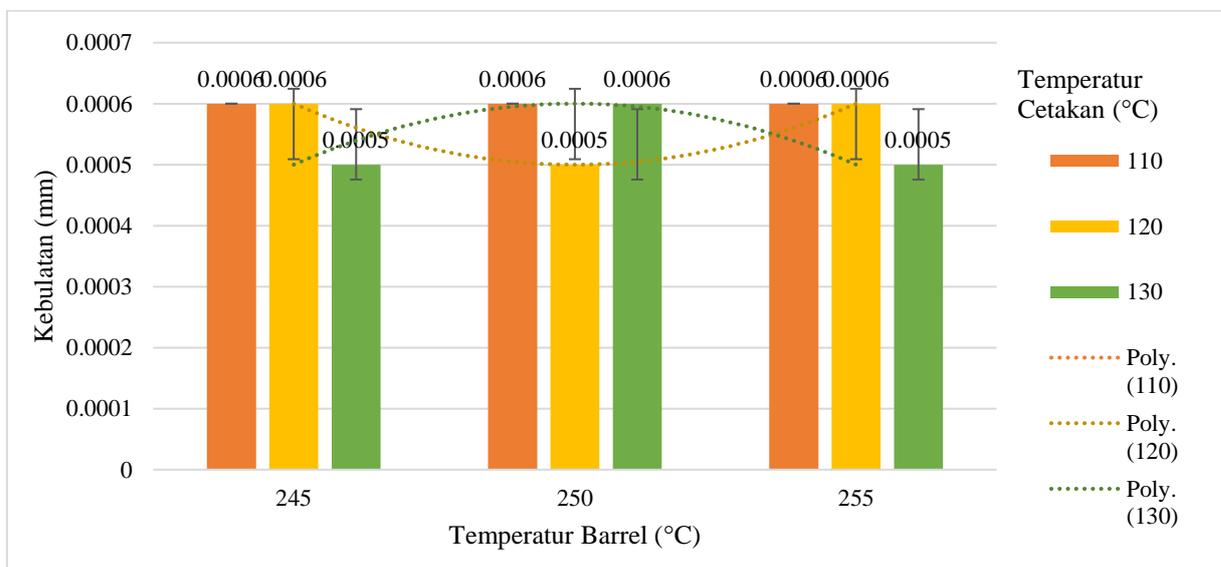
Variabel Proses		Variabel Respons	
Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Volumetric Shrinkage (%)	Deflection (mm)
245	110	7,248	0,0006
	120	7,192	0,0006
	130	7,130	0,0005
250	110	7,363	0,0006
	120	7,303	0,0005
	130	7,248	0,0006
255	110	7,467	0,0006
	120	7,438	0,0006
	130	7,363	0,0005

4.2.3 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Simulasi

Analisis menggunakan Autodesk Moldflow Adviser 2019 dilakukan untuk mendapatkan hasil perbandingan dari hasil eksperimen yang telah dilakukan. Hasil analisis dari Moldflow ditunjukkan pada Tabel 4.4 dengan disajikan menggunakan grafik pada Gambar 4.6.



(a)



(b)

Gambar 4.6 (a) Grafik Temperatur *Barrel* dan Cetakan terhadap *Volumetric Shrinkage*, (b) Grafik Temperatur *Barrel* dan Cetakan terhadap *deflection*

Pada Gambar 4.6 (a), dapat dilihat nilai *volumetric shrinkage* yang meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *barrel*. Hal ini memiliki kesesuaian dengan hipotesis yang ada namun berbeda dengan hasil eksperimen dimana terjadi penurunan nilai perubahan dimensi pada temperatur *barrel* 250 °C. Untuk temperatur cetakan memiliki perbedaan dengan hipotesis dan hasil eksperimen. Pada hasil analisis Moldflow ditunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai

volumetric shrinkage sedangkan hipotesis dan eksperimen menunjukkan yang sebaliknya. Pada Gambar 4.6 (b), tiap-tiap parameter tidak menunjukkan pengaruh terhadap nilai *deflection* hasil analisis dengan Moldflow. Nilai *deflection* juga sangat kecil yaitu 0,0005 mm dibandingkan dengan hasil eksperimen yang memiliki nilai kebulatan mencapai 0,1 mm.

4.3 Optimasi Parameter Proses Injeksi Menggunakan Taguchi-Grey-Fuzzy dan ANOVA

Setelah data hasil eksperimen didapatkan, proses pengolahan data dapat dilakukan. Proses pengolahan data terbagi atas dua tahap yaitu proses optimasi dan ANOVA. Untuk proses optimasi menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy dan untuk ANOVA dilakukan untuk mendapatkan nilai kontribusi dari tiap parameter proses terhadap respons.

4.3.1 Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N

Eksperimen	Rasio S/N		Normalisasi Rasio S/N	
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan
1.	0.689	18.372	0.410	0.000
2.	1.664	21.058	0.682	0.706
3.	-0.035	19.929	0.208	0.409
4.	1.300	19.887	0.581	0.398
5.	2.801	22.176	1.000	1.000
6.	0.632	20.871	0.394	0.657
7.	-0.433	19.117	0.097	0.196
8.	1.249	21.721	0.567	0.880
9.	-0.779	20.443	0.000	0.545

Setelah didapat nilai dari hasil pengukuran variabel respons pada penelitian ini, dilakukan perhitungan masing-masing rasio S/N dan normalisasi rasio S/N dari respons hasil eksperimen. Perhitungan rasio S/N dilakukan dengan Persamaan 2.8 untuk mendapatkan nilai *loss function* dan dilanjutkan dengan menggunakan Persamaan 2.11. Contoh perhitungan rasio S/N pada eksperimen ke-1 untuk nilai perubahan dimensi adalah sebagai berikut:

$$\frac{S}{N} = -10 \log L$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y^2_k \right)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{0,855^2 + 0,969^2 + 0,943^2}{3} \right)$$

$$\frac{S}{N} = 0,689$$

Normalisasi S/N didapatkan dengan menggunakan Persamaan 2.13. Contoh perhitungan dari normalisasi rasio S/N pada eksperimen ke-1 untuk nilai perubahan dimensi adalah sebagai berikut:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^\circ(k) - \min x_i^\circ(k)}{\max x_i^\circ(k) - \min x_i^\circ(k)}$$

$$x_i^*(k) = \frac{0,689 - (-0,779)}{2,801 - (-0,779)}$$

$$x_i^*(k) = 0,410$$

Adapun hasil perhitungan rasio S/N dan normalisasi rasio S/N disajikan pada Tabel 4.5.

4.3.2 Grey Relational Coefficient (GRC)

Perhitungan *grey relational coefficient* (GRC) dilakukan dengan melakukan perhitungan *deviation sequence* terlebih dahulu. *Deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.16. Perhitungan GRC dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.15. Contoh perhitungan *deviation sequence* pada eksperimen ke-1 untuk nilai perubahan dimensi adalah sebagai berikut:

$$\Delta_{0,i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)|$$

$$\Delta_{0,i}(k) = |1 - 0,410|$$

$$\Delta_{0,i}(k) = 0,590$$

Untuk perhitungan GRC dicontohkan menggunakan eksperimen ke-1 untuk nilai perubahan dimensi adalah sebagai berikut:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \xi\Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \xi\Delta_{max}}$$

$$\xi_i(k) = \frac{0 + 0,5(1)}{0,590 + 0,5(1)}$$

$$\xi_i(k) = 0,459$$

Setelah dilakukan perhitungan *deviation sequence* dan GRC, maka proses perhitungan dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya. Adapun hasil perhitungan *deviation sequence* dan GRC ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan *Deviation Sequence* dan GRC

Eksperimen	<i>Deviation Square</i>		GRC	
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan
1.	0.590	1.000	0.459	0.333
2.	0.318	0.294	0.612	0.630
3.	0.792	0.591	0.387	0.458
4.	0.419	0.602	0.544	0.454
5.	0.000	0.000	1.000	1.000
6.	0.606	0.343	0.452	0.593
7.	0.903	0.804	0.356	0.383
8.	0.433	0.120	0.536	0.807
9.	1.000	0.455	0.333	0.523

4.3.3 Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)

Untuk mendapatkan nilai parameter proses optimal, nilai GRC kedua respons digabungkan menggunakan metode *fuzzy* dengan keluarannya disebut *Grey-Fuzzy Reasoning Grade* (GFRG). Nilai GFRG didapatkan dengan menggunakan bantuan *software* MATLAB dan *tools Fuzzy Logic Toolbox*. Adapun proses perhitungan GFRG adalah sebagai berikut. Nilai yang telah didapatkan dari proses perhitungan menggunakan MATLAB disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan GFRG

No	GRC		GFRG
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	
1	0.459	0.333	0.407
2	0.612	0.630	0.585
3	0.387	0.458	0.431
4	0.544	0.454	0.499
5	1.000	1.000	0.920
6	0.452	0.593	0.525
7	0.356	0.383	0.409
8	0.536	0.807	0.649
9	0.333	0.523	0.426
Rata-rata			0,539

Dari hasil perhitungan GFRG, nilai parameter optimal dapat diketahui untuk mendapatkan hasil respons perubahan dimensi dan kebulatan yang terbaik. Untuk menentukan nilai parameter yang optimal dari GFRG yang didapatkan, dilakukan perhitungan rata-rata dari nilai GFRG dari masing-masing variabel proses dan levelnya. Hasil dari perhitungan rata-rata tersebut disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Nilai Rata-rata Multi-respons GFRG pada Masing-masing Level Parameter Proses

Level	Variabel Proses	
	Temperatur Barrel	Temperatur Cetakan
1	0,474	0,438
2	0,648	0,718
3	0,495	0,461
Selisih	0,174	0,280
Rank	2	1
Rata-rata	0,539	

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan bahwa nilai temperatur *barrel* yang optimal adalah pada level 2 yaitu sebesar 250 °C sementara untuk nilai temperatur cetakan yang optimal adalah pada level 2 yaitu sebesar 120 °C. Adapun grafik dari pengaruh masing-masing variabel proses terhadap GFRG ditunjukkan oleh Gambar 4.7.



(a)



(b)

Gambar 4.7 (a) Pengaruh Temperatur *Barrel* terhadap Respons GFRG, (b) Pengaruh Temperatur Cetakan terhadap Respons GFRG

4.3.4 Analysis of Variance (ANOVA)

Proses *analysis of variance* atau analisis variansi dilakukan untuk mengetahui parameter yang dioptimasi memiliki pengaruh atau tidak terhadap respons yang diteliti. Pada analisis variansi ini juga dilakukan untuk mendapatkan persen kontribusi parameter proses terhadap keseluruhan penelitian. Perhitungan analisis variansi dimulai dengan melakukan perhitungan derajat kebebasan (DF), selanjutnya dengan melakukan perhitungan *sum of square* (SS), *mean square* (MS), nilai F, P-value, dan terakhir persen kontribusi. Analisis variansi menggunakan perumusan pada Tabel 2.12. Contoh perhitungan analisis variansi adalah sebagai berikut:

1. Derajat kebebasan

Analisis variansi dimulai dengan menghitung derajat kebebasan dari parameter proses. Derajat kebebasan dihitung dengan mengurangi jumlah level parameter dengan 1.

$$DF_{TR} = a - 1$$

$$DF_{TR} = 3 - 1 = 2$$

Untuk menghitung derajat kebebasan total, jumlah eksperimen dikurangi dengan 1.

$$DF_T = N - 1$$

$$DF_T = 9 - 1 = 8$$

Yang terakhir, derajat kebebasan dari *error* dilakukan dengan mengurangi derajat kebebasan total dengan total derajat kebebasan variabel proses. Karena pada eksperimen ini tiap variabel proses memiliki jumlah level yang sama, maka total derajat kebebasan variabel proses adalah 4. Sehingga nilai derajat kebebasan dari *error* adalah sebagai berikut.

$$DF_E = DF_T - DF_{TR}$$

$$DF_E = 8 - 4 = 4$$

2. Sum of Square

Contoh perhitungan *sum of square* dari variabel proses temperatur *barrel* adalah sebagai berikut.

$$SS_{Tr} = a \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y})^2$$

$$SS_{Tr} = 3 \times [(0,525 - 0,553)^2 + (0,620 - 0,553)^2 + (0,513 - 0,553)^2]$$

$$SS_{Tr} = 0,02075$$

Untuk perhitungan *sum of square* total penelitian ditunjukkan sebagai berikut.

$$SS_T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y})^2$$

$$SS_T = (0,435 - 0,553)^2 + (0,581 - 0,553)^2 + (0,559 - 0,553)^2$$

$$+ (0,750 - 0,553)^2 + (0,722 - 0,553)^2 + (0,389 - 0,553)^2$$

$$+ (0,426 - 0,553)^2 + (0,505 - 0,553)^2 + (0,608 - 0,553)^2$$

$$SS_T = 0,13047$$

Perhitungan *sum of square* dari *error* adalah dengan mengurangi *sum of square* total dengan total *sum of square* dari variabel proses.

$$SS_E = SS_T - SS_{Tr}$$

$$SS_E = 0,13047 - 0,03245$$

$$SS_E = 0,09801$$

3. Mean Square

Perhitungan *mean square* dilakukan dengan membagi *sum of square* dengan derajat kebebasan. Contoh perhitungan dari *mean square* dari variabel proses temperatur *barrel* adalah sebagai berikut.

$$MS_{Tr} = \frac{SS_{Tr}}{DF_{Tr}}$$

$$MS_{Tr} = \frac{0,02075}{2}$$

$$MS_{Tr} = 0,01038$$

Untuk perhitungan dari *mean square* dari *error* adalah sebagai berikut.

$$MS_E = \frac{SS_E}{DF_E}$$

$$MS_E = \frac{0,09801}{4}$$

$$MS_E = 0,02450$$

4. Nilai F

Nilai F statistik didapatkan dengan membagi *mean square* dari masing-masing variabel proses dengan *mean square* dari *error*. Contoh perhitungan dari nilai F untuk variabel proses temperatur *barrel* adalah sebagai berikut.

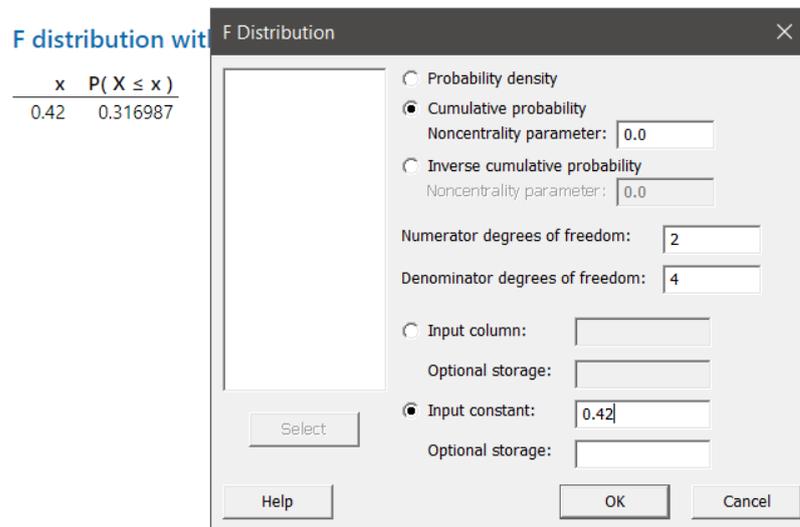
$$F = \frac{MS_{Tr}}{MS_E}$$

$$F = \frac{0,01038}{0,02450}$$

$$F = 0,42$$

5. P-value

Perhitungan P-value dilakukan dengan menggunakan *software* Minitab. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan fitur “Probability Distributions” pada tab “Calc”, lalu memilih “F”. Dengan menggunakan derajat kebebasan dari variabel, derajat kebebasan *error*, dan nilai F yang telah dihitung, maka dapat dihitung P-value dari variabel tersebut. Nilai P-value yang didapatkan adalah sebesar 1-P(x) dikarenakan perhitungan ini menggunakan *right-tail*. Perhitungan P-value pada Minitab ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perhitungan P-value dengan Menggunakan Minitab

6. Persen Kontribusi

Persen kontribusi didapatkan dengan membagi nilai *sum of square* dari parameter dengan *sum of square* total. Adapun contoh perhitungan dari persen kontribusi variabel proses temperatur *barrel* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Kontribusi} &= \frac{SS_{Tr}}{SS_T} \times 100\% \\ \text{Kontribusi} &= \frac{0,02075}{0,13047} \times 100\% \\ \text{Kontribusi} &= 15,9040\% \end{aligned}$$

Untuk perhitungan kontribusi *error* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Kontribusi} &= \frac{SS_E}{SS_T} \times 100\% \\ \text{Kontribusi} &= \frac{0,09801}{0,13047} \times 100\% \\ \text{Kontribusi} &= 75,1207\% \end{aligned}$$

Hasil analisis yang telah didapatkan ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Analisis Variansi (ANOVA)

Parameter	DF	SS	MS	F	P-value	Kontribusi
Temperatur <i>barrel</i> (°C)	2	0,01940	0,009698	0,57	0,607	15,79%
Temperatur cetakan (°C)	2	0,03499	0,017495	1,02	0,438	28,47%
Error	4	0,06850	0,017126			55,74%
Total	8	0,12289				100%

Dari hasil analisis variansi, diketahui pengaruh dari variabel proses terhadap variabel respons. Uji hipotesis dilakukan untuk menentukan apakah variabel proses yang teliti memiliki pengaruh pada variabel respons. Adapun hipotesis yang digunakan pada penelitian sebagai berikut:

H_0 : Variabel proses tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan

H_1 : Variabel proses berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan

dengan kriteria penolakan: Tolak H_0 jika $P\text{-value} < 0.05$

Dari uji hipotesis yang berdasarkan pada hasil analisis variansi yang telah dilakukan sebelumnya, maka dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut.

1. Variabel proses temperatur *barrel* memiliki $P\text{-value}$ sebesar 0,607, sehingga berdasarkan hipotesis dan kriteria penolakan dapat disimpulkan bahwa temperatur *barrel* tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan dengan nilai kontribusi sebesar 15,79%
2. Variabel proses temperatur cetakan memiliki $P\text{-value}$ sebesar 0,438, sehingga berdasarkan hipotesis dan kriteria penolakan dapat disimpulkan bahwa temperatur cetakan tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan dengan nilai kontribusi sebesar 28,47%

Adapun kesimpulan dari keseluruhan tahap pengolahan data disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Kesimpulan Tahap Pengolahan Data

Parameter	Level Optimal	Persen Kontribusi	P-value
Temperatur <i>Barrel</i>	250°C	15,79%	0,607
Temperatur Cetakan	120°C	28,47%	0,438

4.4 Uji Konfirmasi

Untuk mengetahui apakah proses optimasi yang dilakukan sudah benar, perlu dilakukan uji konfirmasi. Untuk melakukan uji konfirmasi, dihitung terlebih dahulu nilai GFRG prediksi yang didapatkan dengan menggunakan parameter optimal yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya. Persamaan 2.17 digunakan untuk mendapatkan nilai GFRG prediksi. Perhitungan nilai GFRG adalah sebagai berikut.

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^a \hat{\gamma}_i - \gamma_m$$

$$\hat{\gamma} = 0,539 + (0,648 - 0,539) + (0,718 - 0,539)$$

$$\hat{\gamma} = 0,827$$

Selanjutnya, dicari batas toleransi dari prediksi GFRG tersebut. Pencarian batas toleransi tersebut menggunakan *confidence interval* dengan Perumusan 2.18 dengan perhitungannya sebagai berikut.

$$CI = \sqrt{F_{(\alpha;v_1;v_2)} MS_E [1/\eta_{eff} + 1/r]}$$

$$CI = \sqrt{7,71 \times 0,017126 \times [1/5 + 1/3]}$$

$$CI = \pm 0,317$$

$$CI_{atas} = 1,144$$

$$CI_{bawah} = 0,510$$

Berdasarkan perhitungan sebelumnya, didapat bahwa *confidence interval* dari GFRG prediksi adalah $0,827 \pm 0,317$ ($0,510 < \hat{\gamma}GFRG_p < 1,144$). Setelah mendapatkan nilai prediksi GFRG dan *confidence interval*, dilakukan uji konfirmasi sebanyak 3 kali dengan hasil ditunjukkan oleh Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Uji Konfirmasi

Variabel Proses	Nomor	Variabel Respons	
		Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
Temperatur <i>barrel</i> 250°C	1	0,718	0,0867
Temperatur cetakan 120°C	2	0,696	0,0640
	3	0,788	0,0840

Setelah didapat nilai dari uji konfirmasi, proses optimasi dilakukan sebagaimana dilakukan pada proses sebelumnya sampai mendapatkan nilai GFRG. Hasil proses optimasi dari uji konfirmasi disajikan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Optimasi dari Uji Konfirmasi

	Rasio S/N	Normalisasi Rasio S/N	Deviation Sequence	GRC	GFRG
Perubahan Dimensi	2,676	0,965	0,035	0,935	0,790
Kebulatan	22,061	0,970	0,030	0,943	

Berdasarkan dari hasil optimasi, didapatkan nilai GFRG dari uji konfirmasi adalah 0,790. Karena rentang *confidence interval* adalah $0,510 < \hat{\gamma}GFRG_p < 1,144$ dan nilai GFRG dari uji konfirmasi berada di dalam rentang tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa perhitungan nilai optimasi dari kedua variabel proses adalah valid. Hasil dari tahapan uji konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Kesimpulan Tahap Uji Konfirmasi

Parameter	Nilai
<i>Confidence Interval</i>	$0,510 < \hat{\gamma}GFRG_p < 1,144$
Nilai GFRG Konfirmasi	0,790

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan metode ANOVA, didapat *p-value* untuk temperatur *barrel* sebesar 0,607. Uji hipotesis menyatakan bahwa jika nilai *p-value* > 0,05, maka temperatur *barrel* tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil berbahan Cu/PA6. Adapun nilai persen kontribusi dari temperatur *barrel* terhadap perubahan dimensi dan kebulatan adalah 15,79%. Perhitungan menggunakan Taguchi-*grey-fuzzy* menghasilkan nilai optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan terkecil adalah 250°C.
2. Berdasarkan metode ANOVA, didapat *p-value* untuk temperatur cetakan sebesar 0,438. Uji hipotesis menyatakan bahwa jika nilai *p-value* > 0,05, maka temperatur cetakan tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil berbahan Cu/PA6. Adapun nilai persen kontribusi dari temperatur cetakan terhadap perubahan dimensi dan kebulatan adalah 28,47%. Perhitungan menggunakan Taguchi-*grey-fuzzy* menghasilkan nilai optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan terkecil adalah 120°C.

2.1 Saran

Pemberian diberikan sebagai bentuk masukan agar penelitian ini dapat dikembangkan secara lebih lanjut dan referensi bagi peneliti selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan *feedstock* yang digunakan pada proses *injection molding* dapat dioptimasi sehingga didapat material yang homogen.
2. Penggunaan *feedstock* komersial dalam proses eksperimen diperlukan sebagai hasil pembandingan.
3. Pemanas yang digunakan pada mesin injeksi dapat ditingkatkan kualitasnya sehingga fluktuasi yang terjadi pada material di dalam *barrel* dan pada cetakan dapat berkurang.
4. Sistem produksi dalam pembuatan proyektil menggunakan metode *injection molding* dirancang agar memiliki proses yang lebih terkontrol dan memiliki *repeatability* baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Anders, H., Bevan, J., Berkol, I., Bourne, M., Dreyfus, P., Glatz, A.-K., Greene, O., Pézard, S., Weidacher, R., & Wilkinson, A. (2006). *Targeting Ammunition*. Small Arms Survey.
- Bélanger, G., Germain-De-Grantham, S., Potvin, M., & Bélair, V. (1993). *FRANGBLE PRACTICE AMMUNITION* (Patent No. 19). United States Patent.
- Bui, S. X., Komenda, J., & Vítek, R. (2021). Frangibility Quantification of Frangible Bullet upon Impact on a Hard Target. *Defence Science Journal*, *71*(2), 171–176. <https://doi.org/10.14429/dsj.71.16113>
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering* (7th ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1007/BF01184995>
- Das, B., Roy, S., Rai, R. N., & Saha, S. C. (2015). Application of grey fuzzy logic for the optimization of CNC milling parameters for Al–4.5%Cu–TiC MMCs with multi-performance characteristics. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *19*(2), 857–865. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.12.002>
- Drake, P. (1999). Dimensioning and Tolerancing Handbook. In *ANSI Stand*. McGraw-Hill.
- Engel GmbH. (2010). *Engel Insert*. Engel Austria GmbH.
- Fischer, J. M. (2003). *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage* (1st ed.). William Andrew, Inc.
- He, X., & Wu, W. (2021). A practical numerical approach to characterizing non-linear shrinkage and optimizing dimensional deviation of injection-molded small module plastic gears. *Polymers*, *13*(13). <https://doi.org/10.3390/polym13132092>
- Kościszko, A., Marciniak, D., & Sykutera, D. (2021). Post-processing time dependence of shrinkage and mechanical properties of injection-molded polypropylene. *Materials*, *14*(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma14010022>
- Kumar, B. P., Venkataramaiah, P., & Ganesh, J. S. (2019). Optimization of process parameters in injection moulding of a polymer composite product by using gra. *Materials Today: Proceedings*, *18*, 4637–4647. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.448>
- Lin, C.-M., & Chen, Y.-J. (2021). Taguchi Optimization of Roundness and Concentricity of a Plastic Injection Molded Barrel of a Telecentric Lens. *Polymers*, *13*(19), 3419. <https://doi.org/10.3390/polym13193419>
- Lin, C. L. (2004). Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics. *Materials and Manufacturing Processes*, *19*(September 2013), 209–220. <https://doi.org/10.1081/AMP-120029852>
- Mates, S. P., Rhorer, R., Banovic, S., Whitenton, E., & Fields, R. (2008). Tensile strength measurements of frangible bullets using the diametral compression test. *International Journal of Impact Engineering*, *35*(6), 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.04.005>
- Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2000). *Injection Molding Handbook Third edition* (Third Edit). Kluwer Academic Publishers.

- Ryu, Y., Sohn, J. S., Yun, C. S., & Cha, S. W. (2020). Shrinkage and warpage minimization of glass-fiber-reinforced polyamide 6 parts by microcellular foam injection molding. *Polymers*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/POLYM12040889>
- Senthilkumar, N., Sudha, J., & Muthukumar, V. (2015). A grey-fuzzy approach for optimizing machining parameters and the approach angle in turning AISI 1045 steel. *Advances in Production Engineering & Management*, 10(4), 195–208. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14743/apem2015.4.202>
- Soejanto, I. (2009). *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Graha Ilmu.
- Soepangkat, B. O. P., & Pramujati, B. (2013). Optimization of Surface Roughness and Recast Layer Thickness in the Wire-EDM Process of AISI D2 Tool Steel using Taguchi-Grey-Fuzzy. *Applied Mechanics and Materials*, 393, 21–28. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.393.21>
- Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute Inc. (2015). *Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Shotgun Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers: Vol. SAAMI Z299*. Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute, Inc. <https://saami.org/wp-content/uploads/2019/05/ANSI-SAAMI-Z299.2-Shotshell-Approved-2019-04-23.pdf>
- Sui, W., & Zhang, D. (2012). Four Methods for Roundness Evaluation. *Physics Procedia*, 24, 2159–2164. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.317>
- Tarng, Y. S., Yang, W. H., & Juang, S. C. (2000). The Use of Fuzzy Logic in the Taguchi Method for the Optimisation of the Submerged Arc Welding Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(9), 688–694. <https://doi.org/10.1007/s001700070040>
- Tremblay, T. (2012). *Injection Moulding Part Design for Dummies PROTO LABS SPECIAL EDITION*. John Wiley & Sons, Inc.
- Valero, L., & R., J. (2020). Key Parameters for Setting the Injection Molding Process. *Plastics Injection Molding*, 178–192. <https://doi.org/10.3139/9781569906903.014>

LAMPIRAN

1. Spesifikasi Material dan Mesin

Tabel 1 Spesifikasi Cu

No.	Sifat	Nilai
1.	Densitas (g/cm ³)	8,94
2.	Titik leleh (°C)	1085
3.	Tensile Strength (MPa)	200
4.	Konduktivitas Thermal (Wm/K)	391
5.	Modulus Elastisitas (GPa)	117
6.	Hardness (HRB)	37

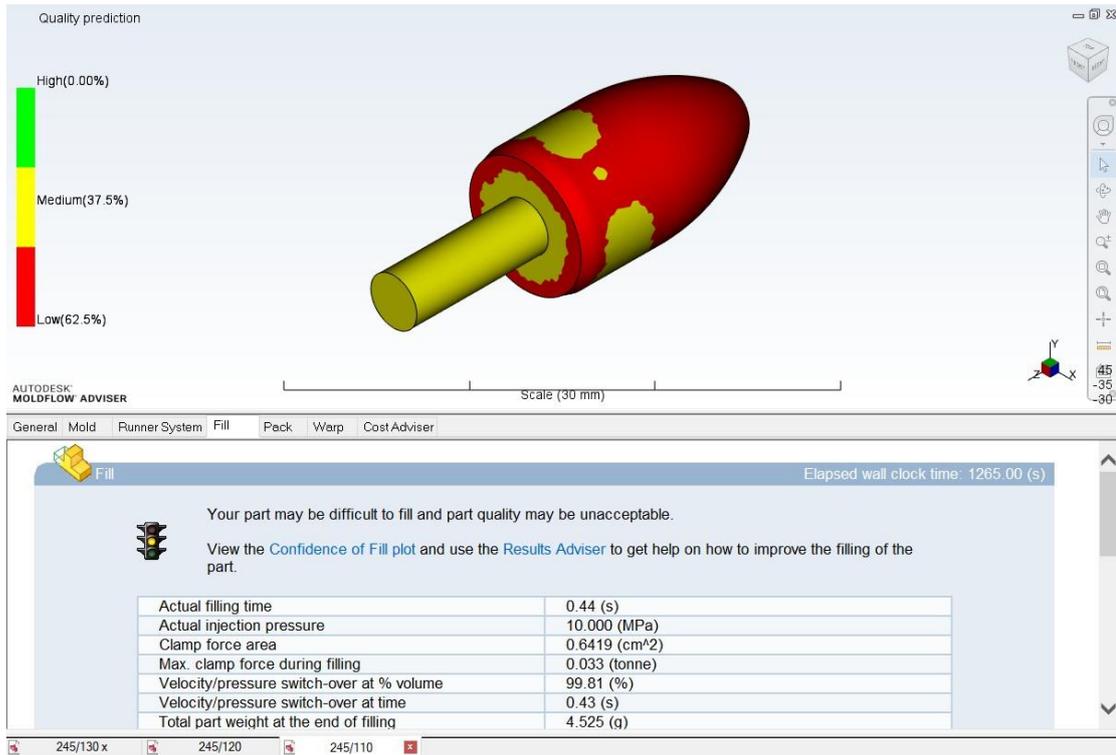
Tabel 2 Spesifikasi PA6

No.	Sifat	Nilai
1	Densitas (g/cm ³)	1.12-1.15
2	Kekuatan Tarik (Mpa)	48,3-82,7
3	Kekuatan Tekan (Mpa)	48,3-96,5
4	Temperatur Leleh (°C)	223
5	Kekerasan	R103-119

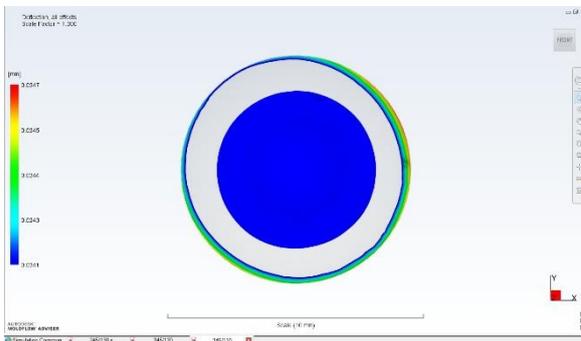
Tabel 3 Spesifikasi mesin injeksi

No.	Parameter	Nilai
1.	Tekanan Injeksi Maksimum (MPa)	10
2.	Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	300
3.	Temperatur Cetakan (°C)	300
4.	Kapasitas Injeksi (g)	60
5.	Tipe Mesin	4 Kolom
6.	Displacement Oil Pump (L/s)	2,04
7.	Daya (kW)	4,08
8.	Dimensi Mesin (mm)	900 x 400 x 1764,9

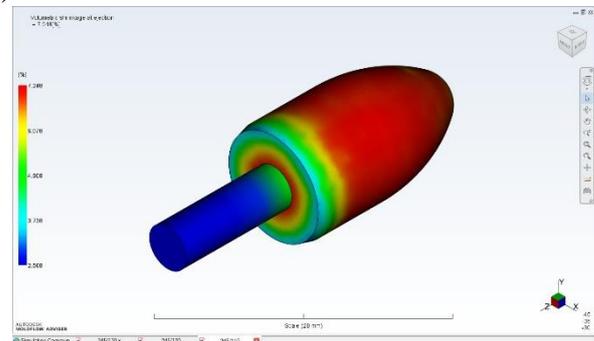
2. Hasil Simulasi Autodesk Moldflow Adviser 2019



(a)

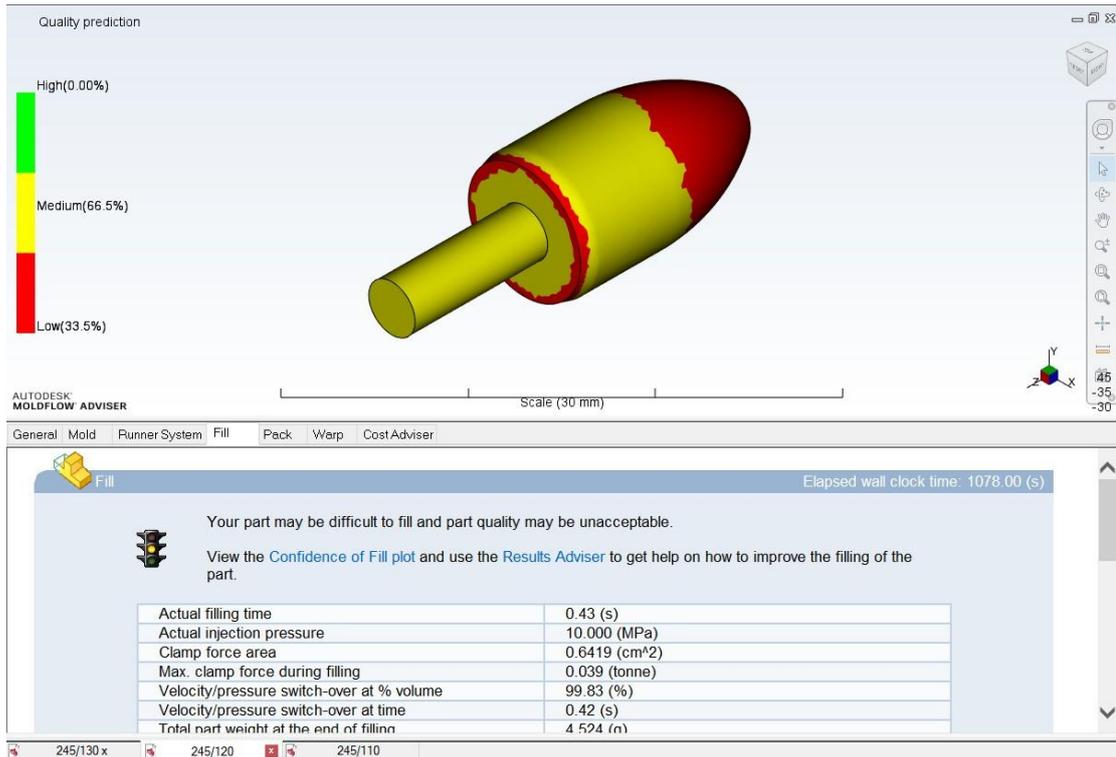


(b)

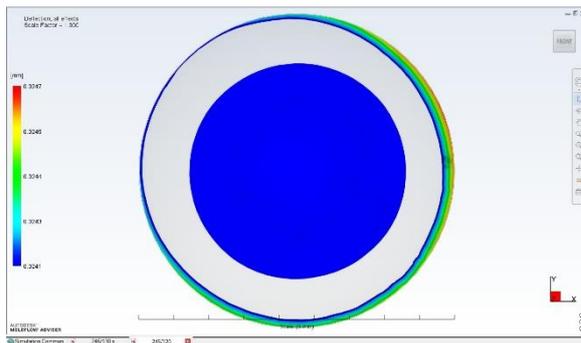


(c)

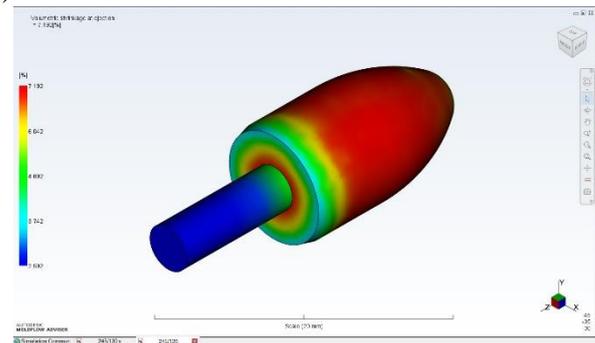
Gambar 1 Hasil simulasi temperatur leleh 245°C dan temperatur cetakan 110°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



(a)

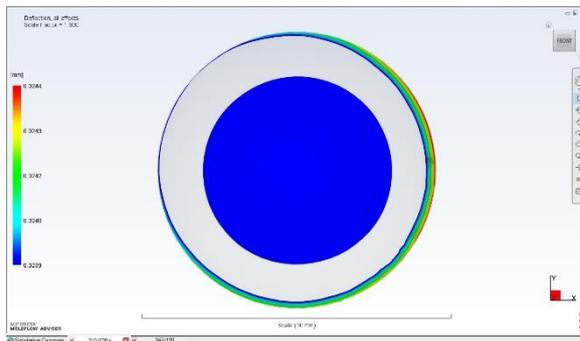
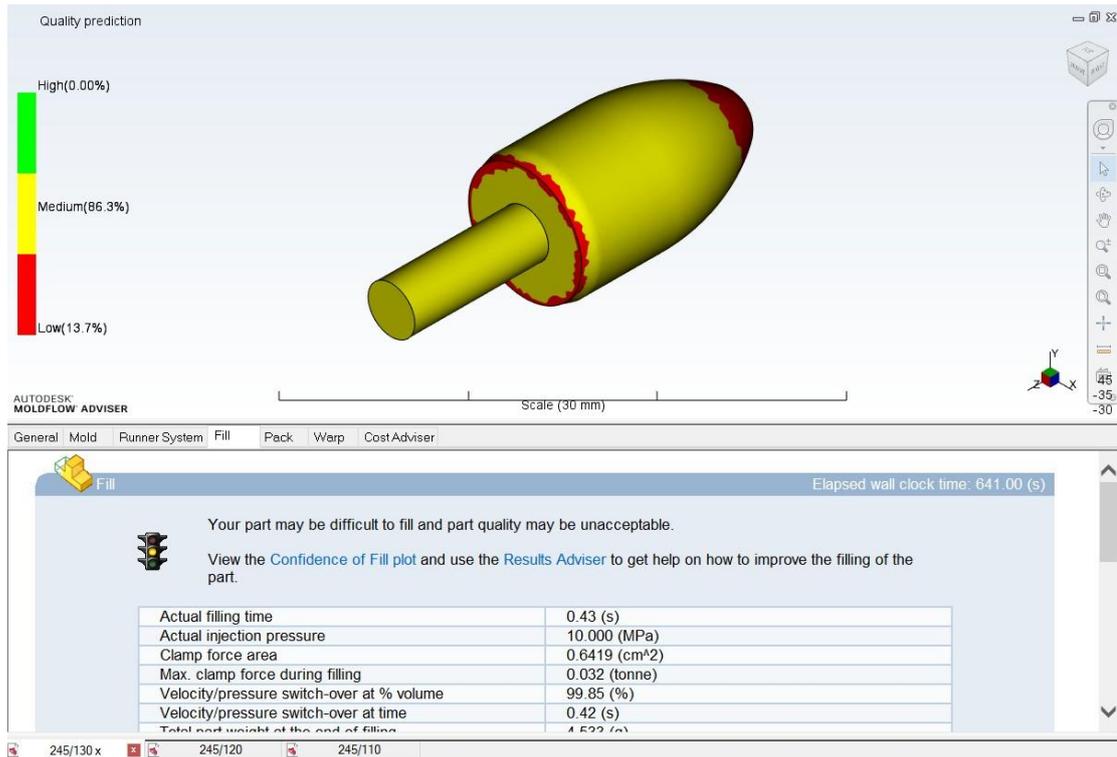


(b)



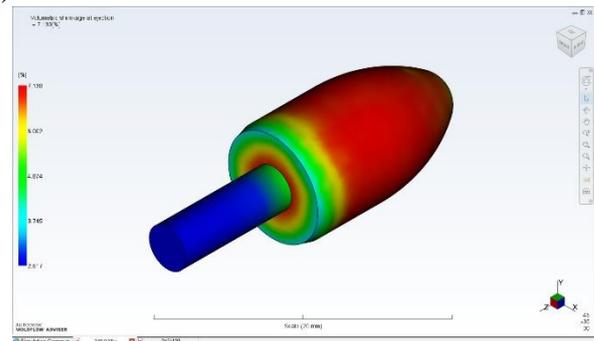
(c)

Gambar 2 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 245°C dan Temperatur Cetakan 120°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



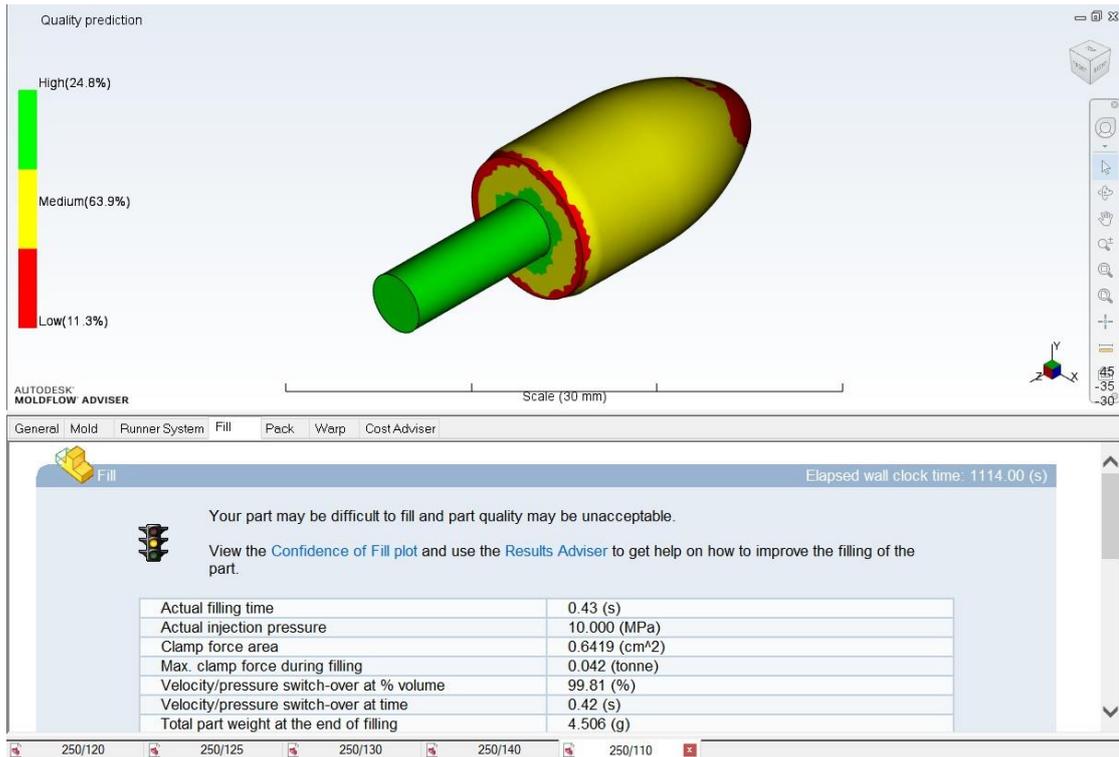
(b)

(a)

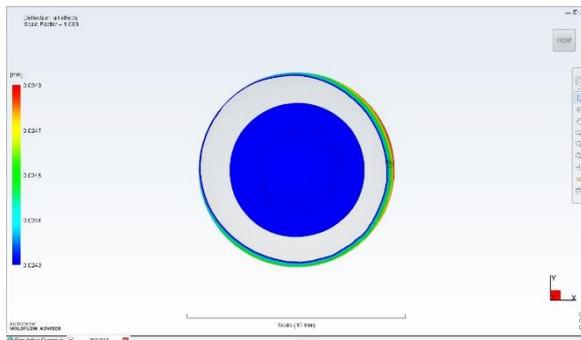


(c)

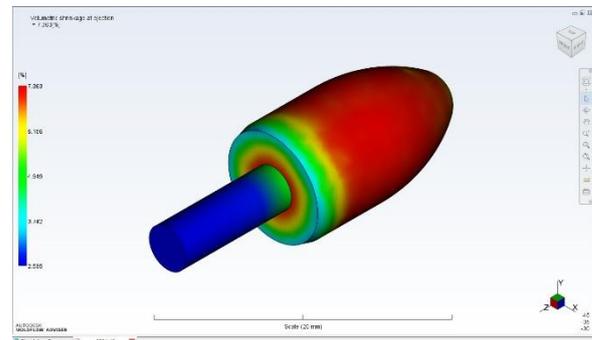
Gambar 3 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 245°C dan Temperatur Cetakan 130°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



(a)

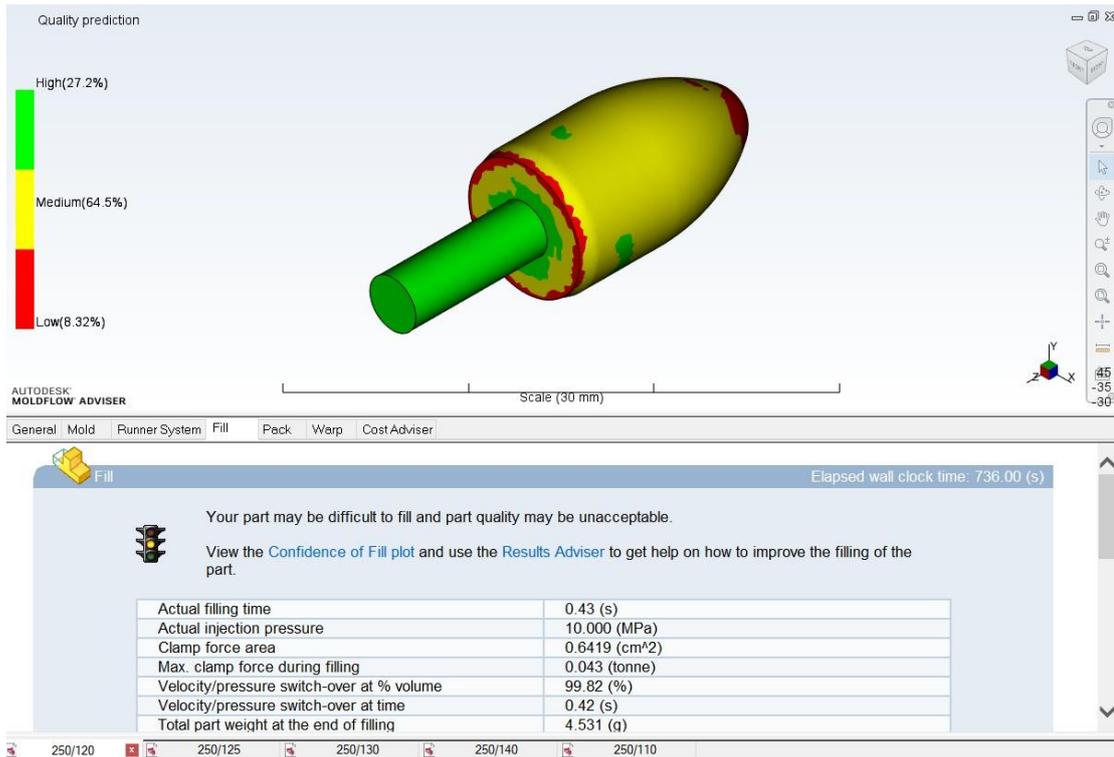


(b)

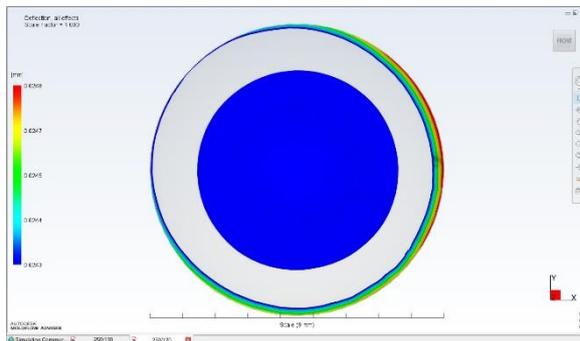


(c)

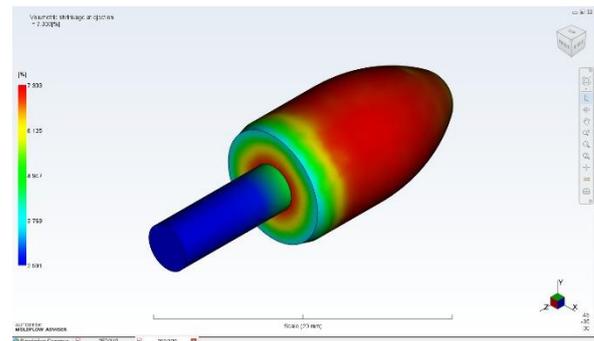
Gambar 4 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 250°C dan Temperatur Cetakan 110°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



(a)

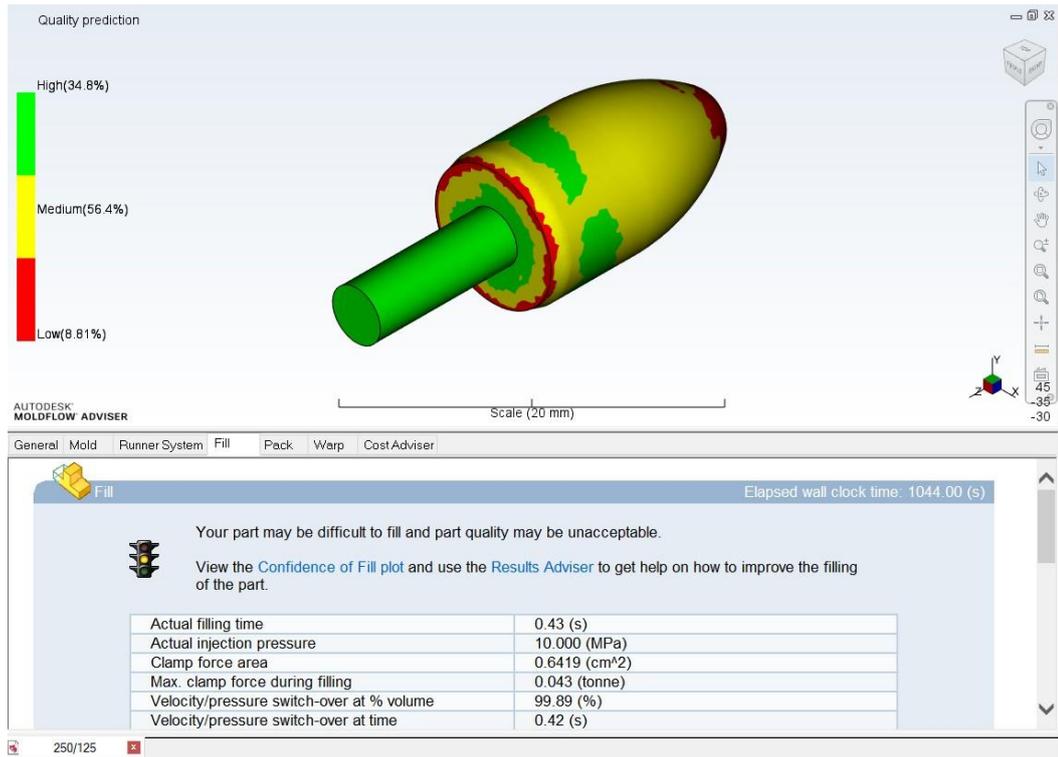


(b)

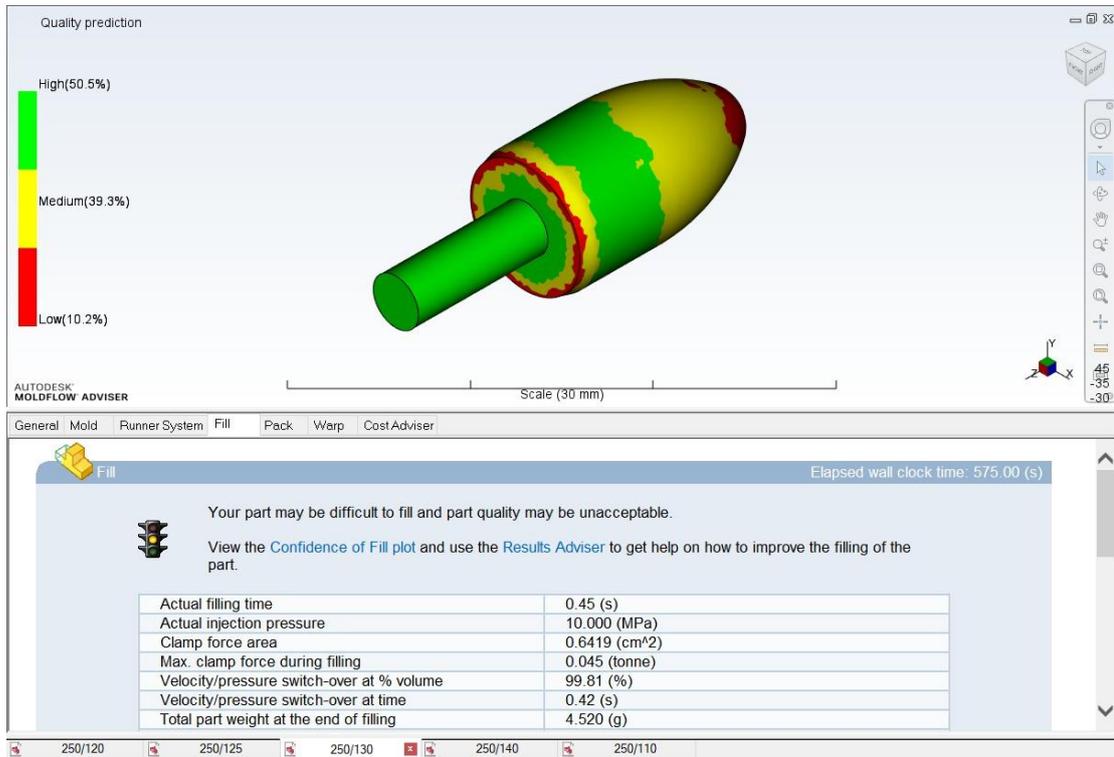


(c)

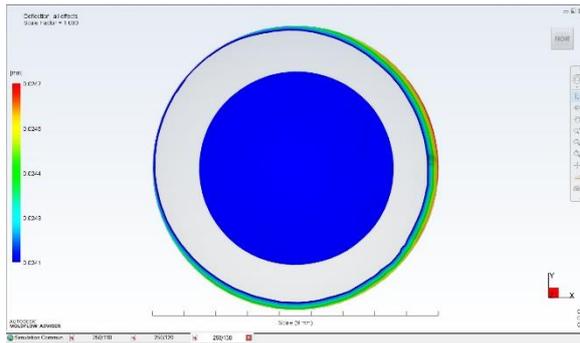
Gambar 5 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 250°C dan Temperatur Cetakan 120°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



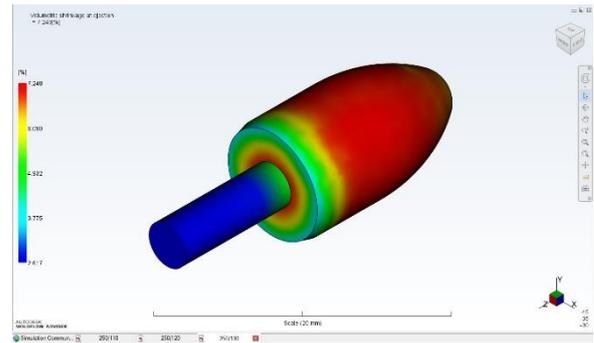
Gambar 6 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 250°C dan Temperatur Cetakan 125°C



(a)

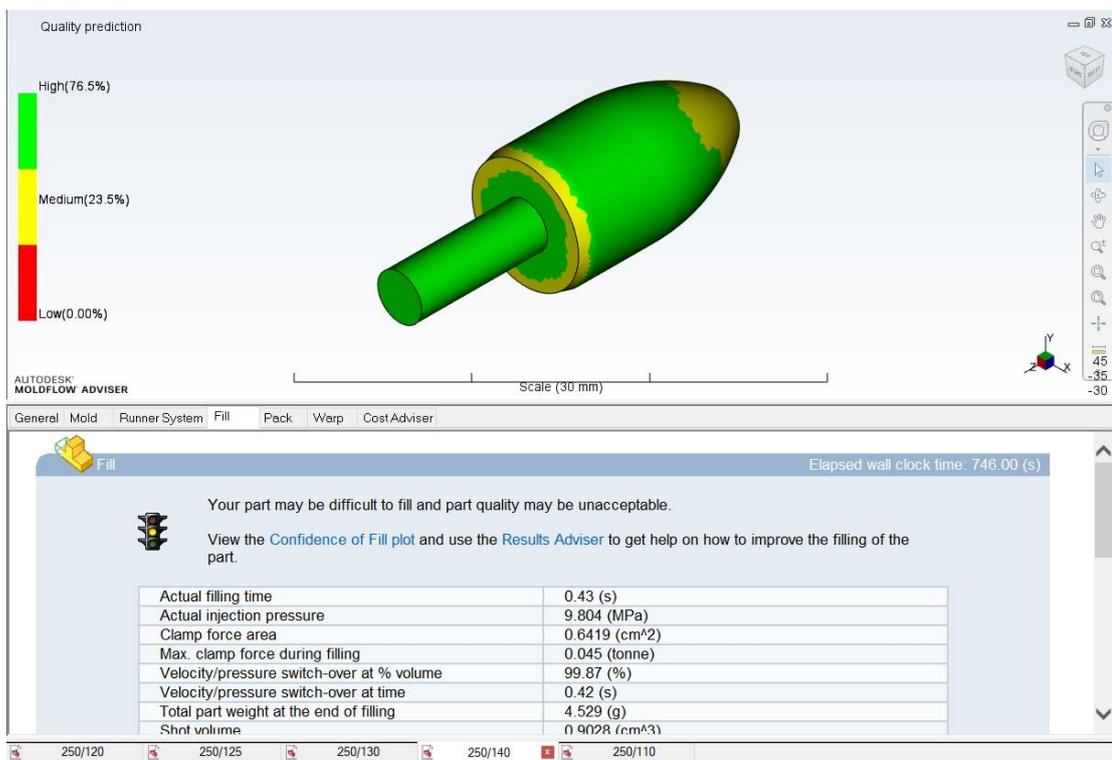


(b)

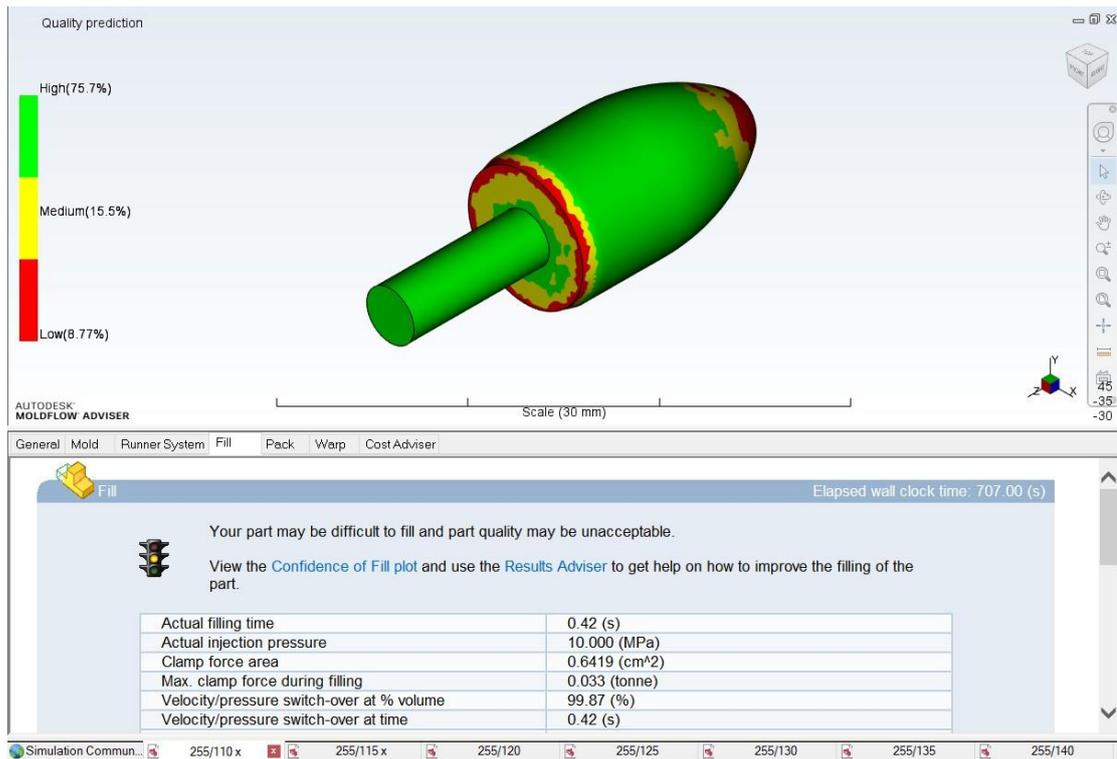


(c)

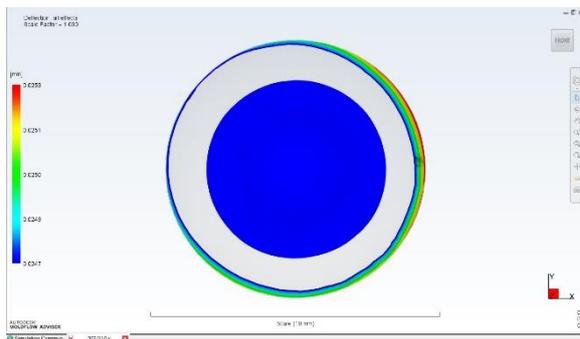
Gambar 7 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 250°C dan Temperatur Cetakan 130°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



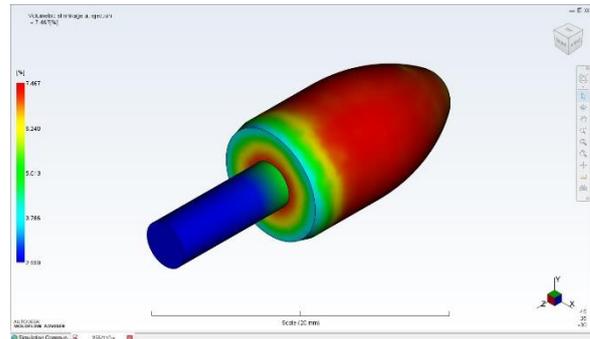
Gambar 8 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 250°C dan Temperatur Cetakan 140°C



(a)

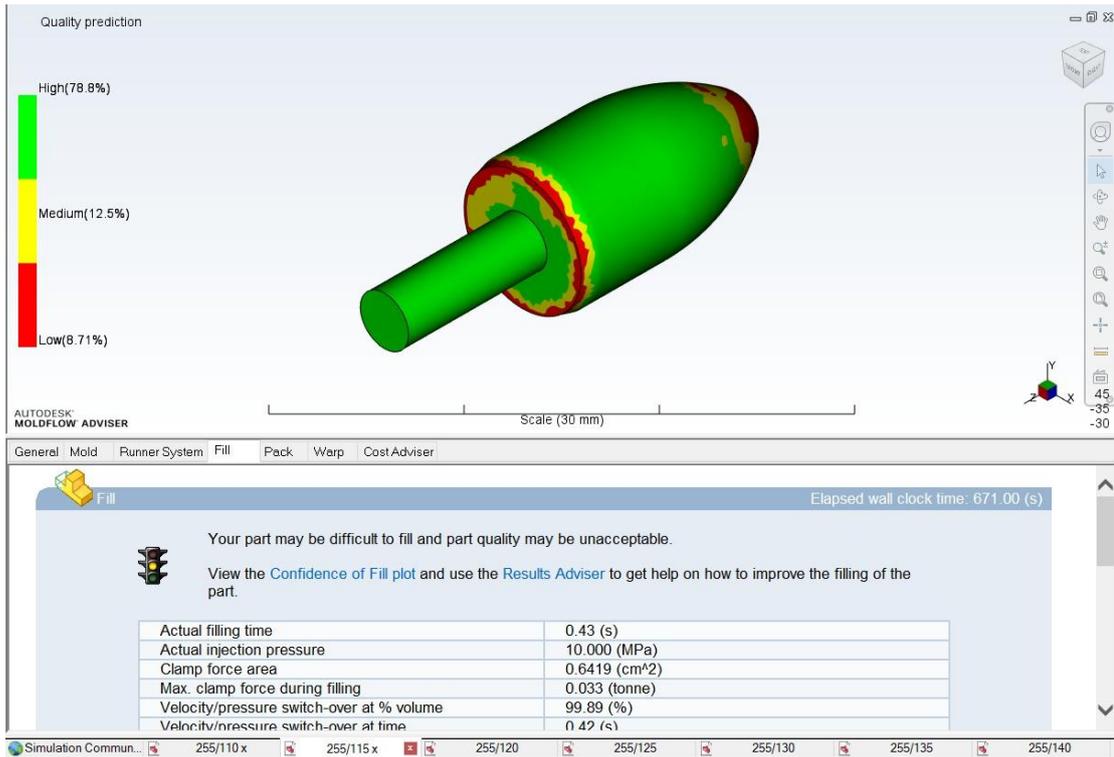


(b)

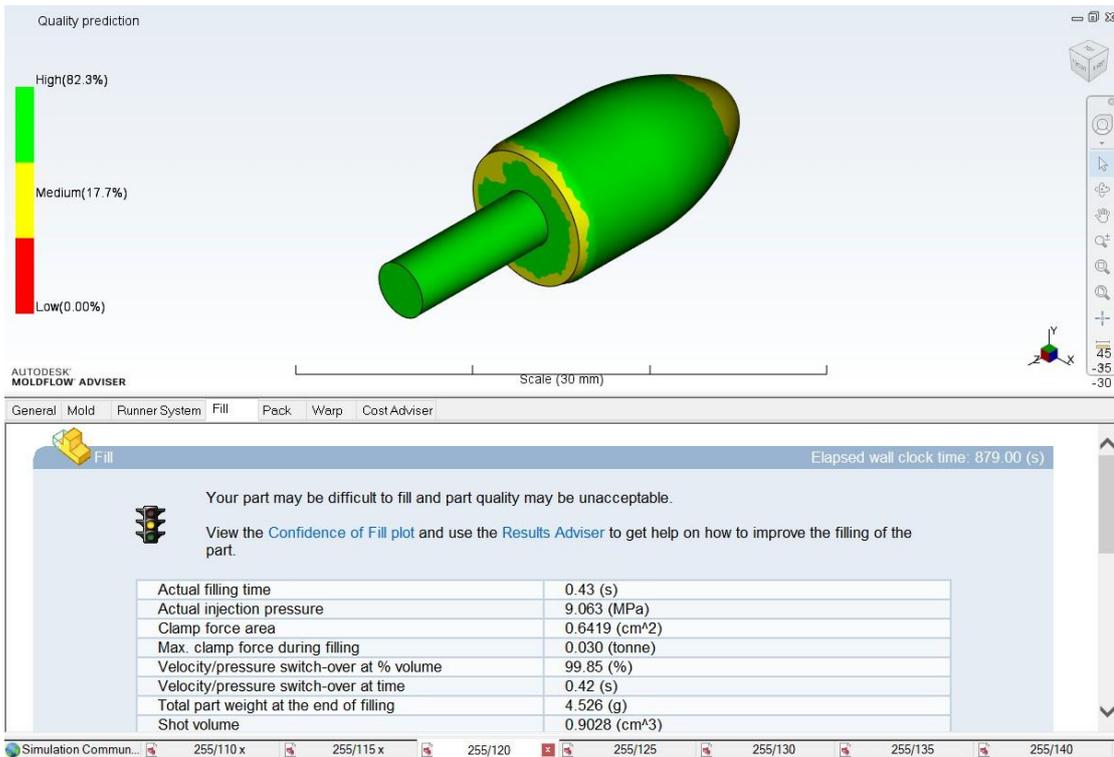


(c)

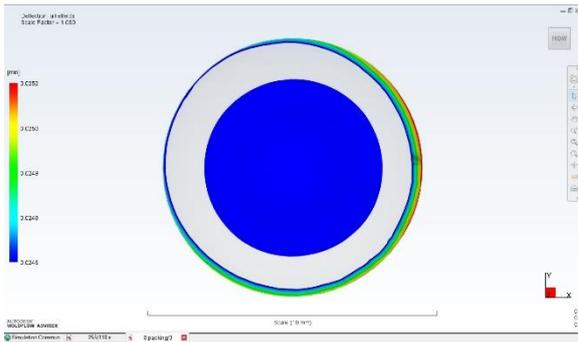
Gambar 9 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 110°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



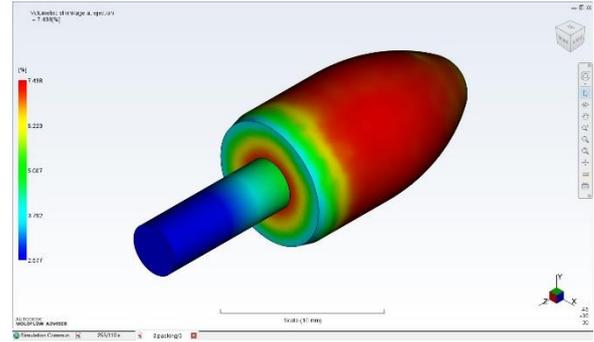
Gambar 10 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 115°C



(a)

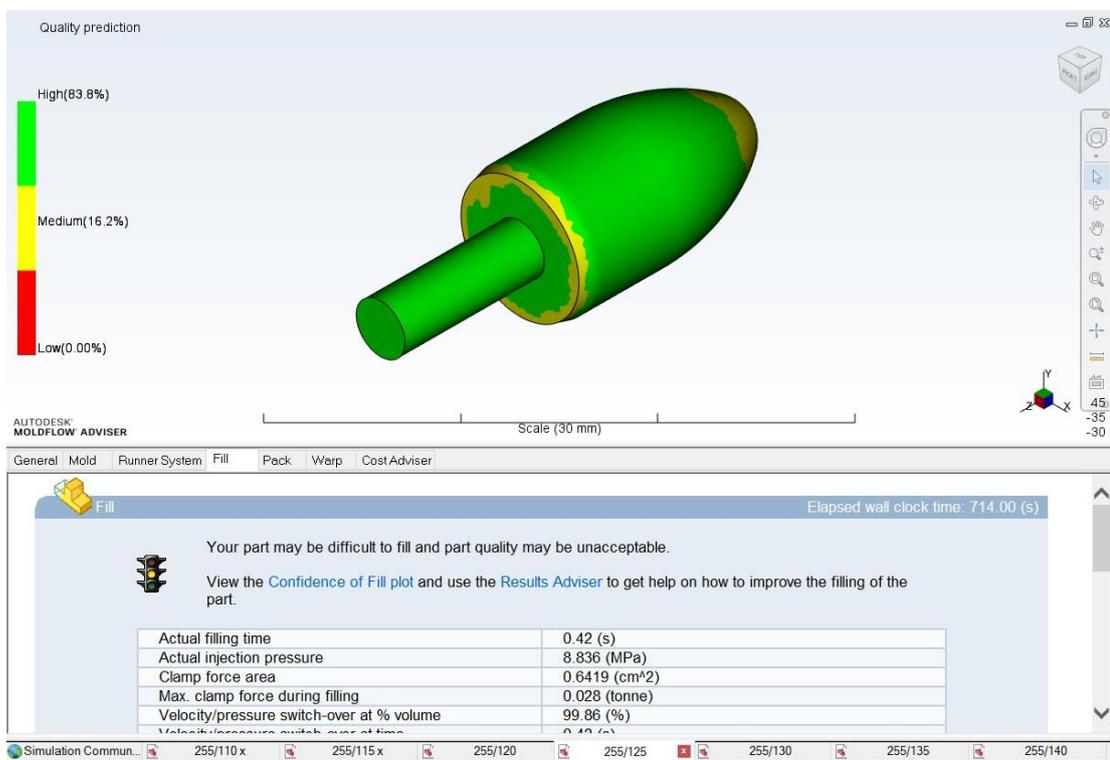


(b)

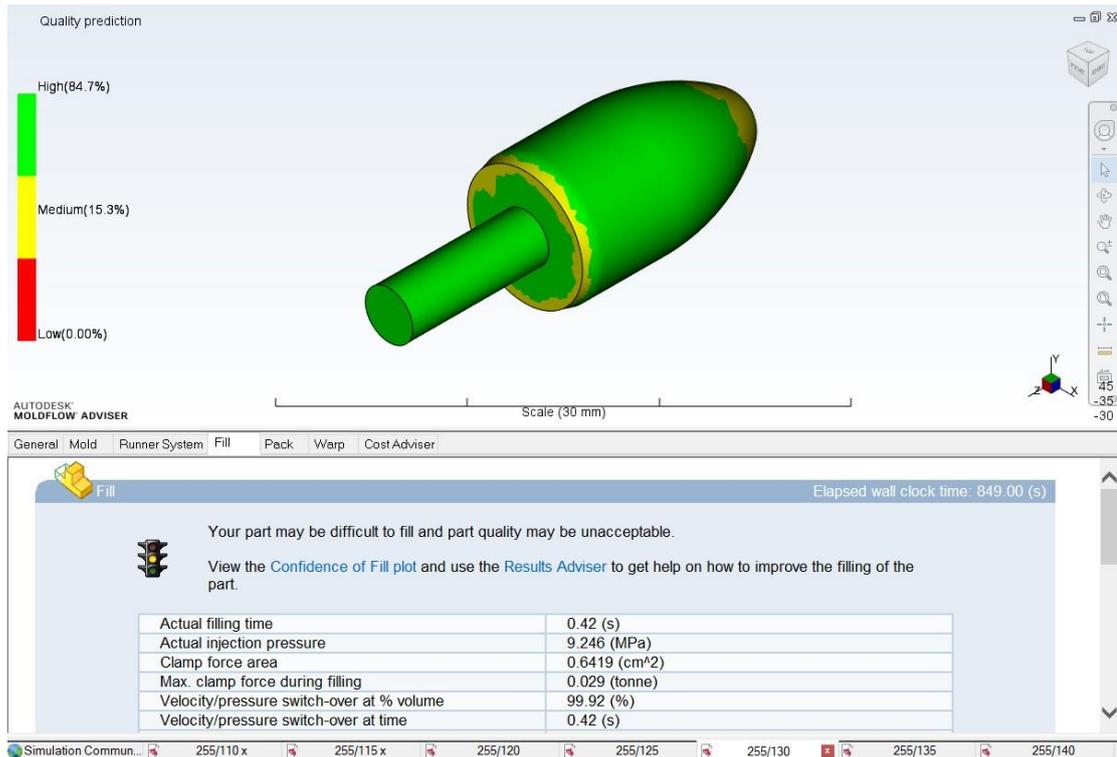


(c)

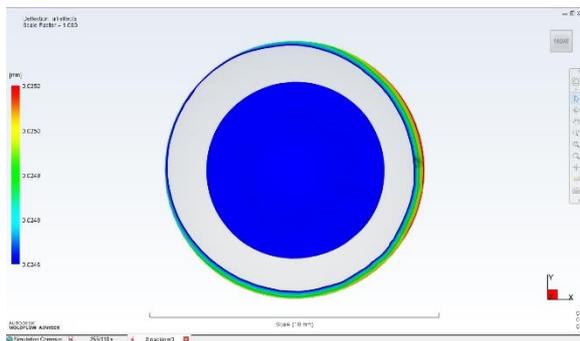
Gambar 11 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 120°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



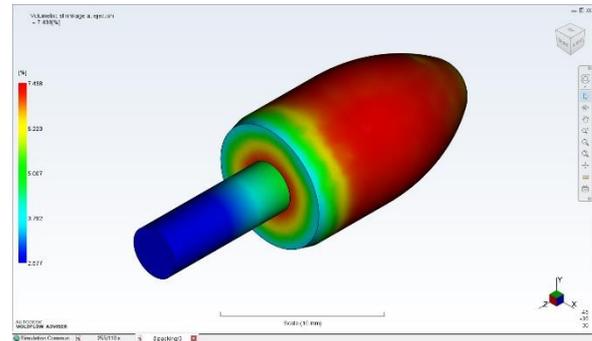
Gambar 12 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 125°C



(a)

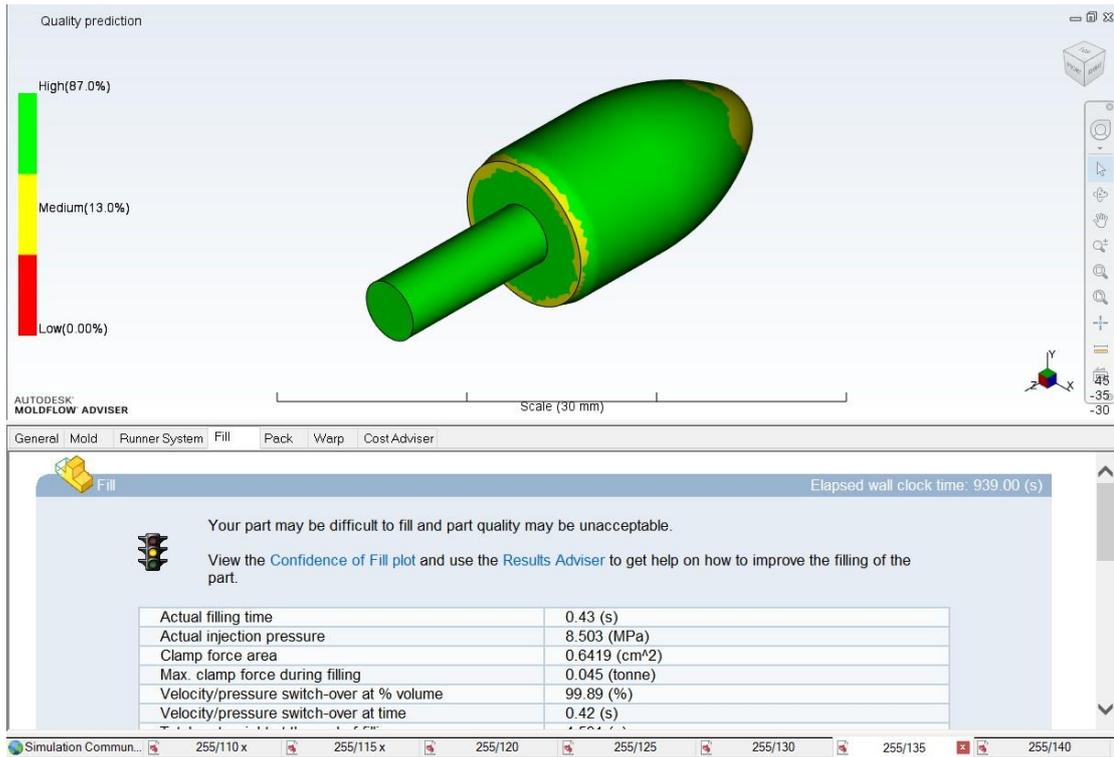


(b)

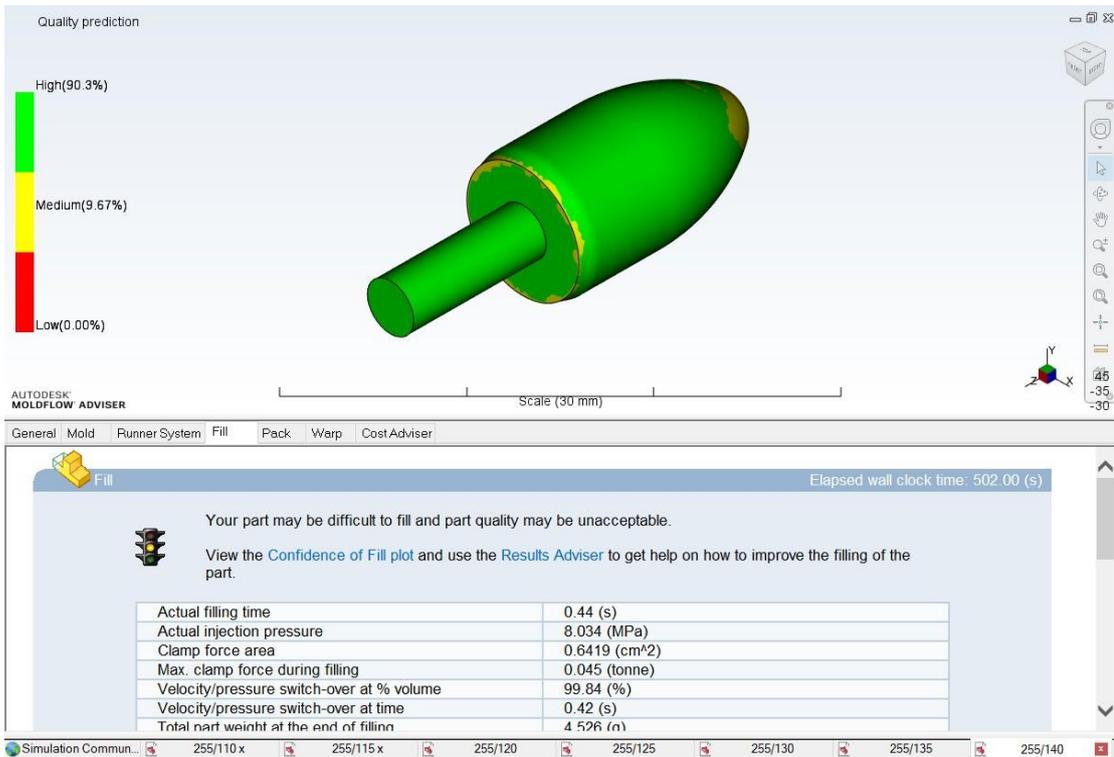


(c)

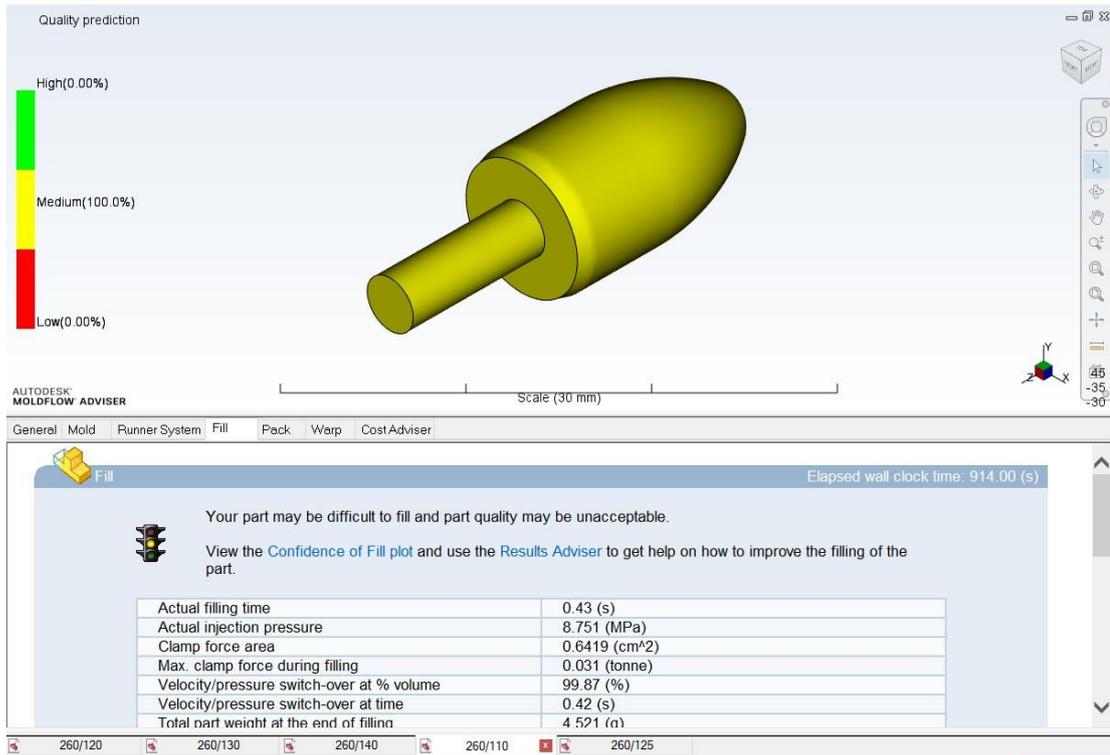
Gambar 13 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 130°C (a) *quality prediction*, (b) *deflection*, dan (c) *volumetric shrinkage*



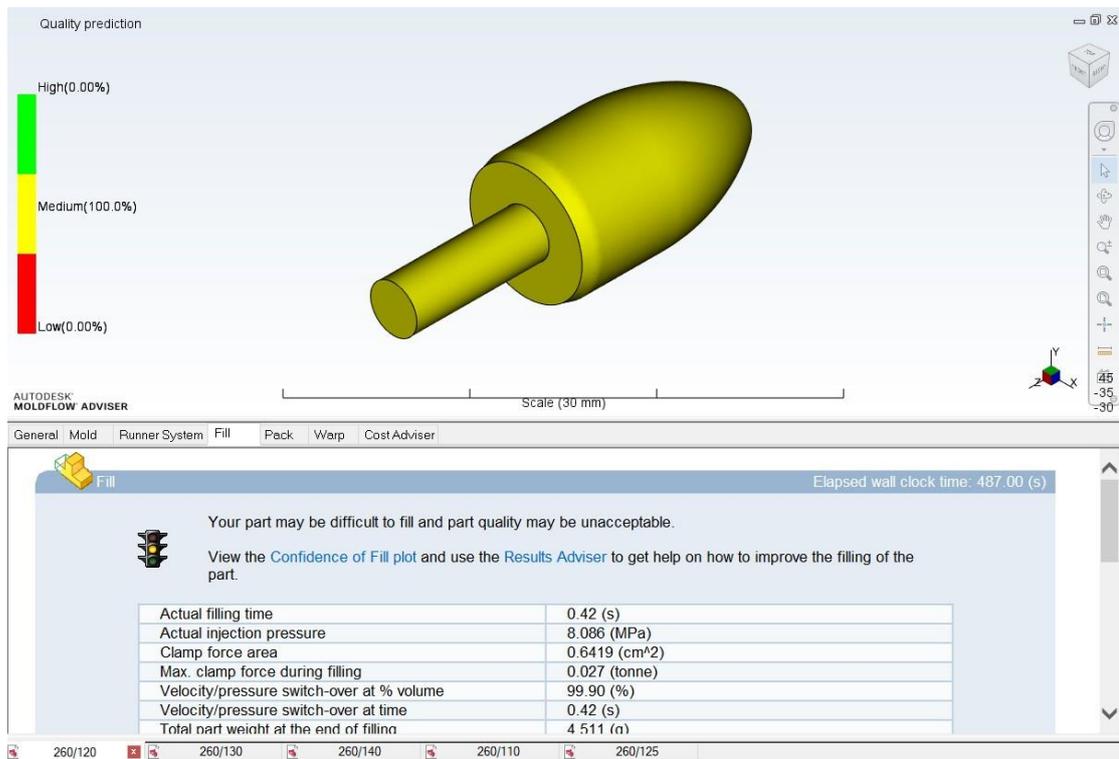
Gambar 14 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 135°C



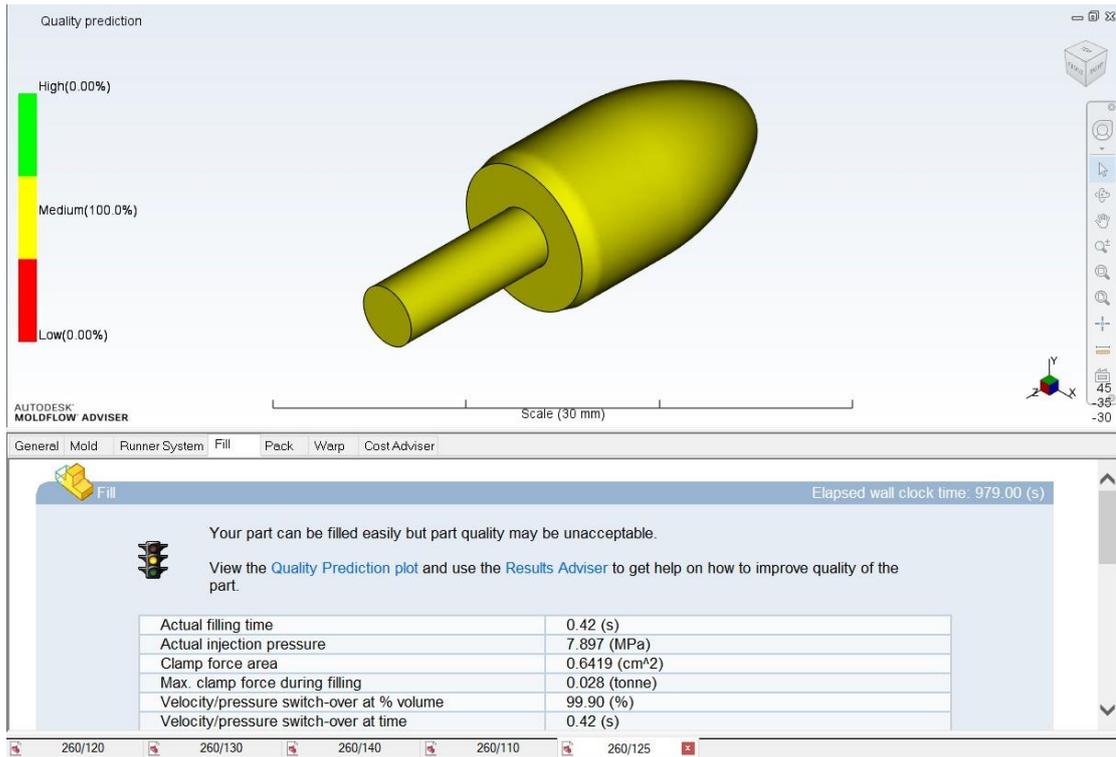
Gambar 15 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 255°C dan Temperatur Cetakan 140°C



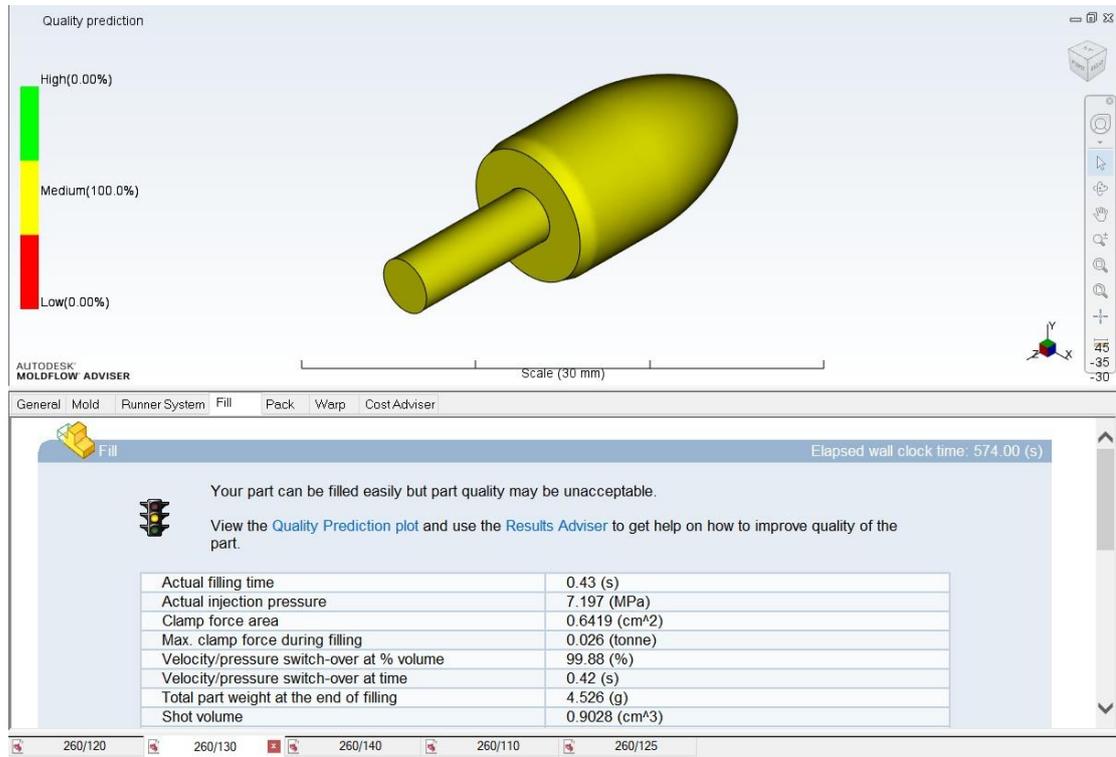
Gambar 16 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 260°C dan Temperatur Cetakan 110°C



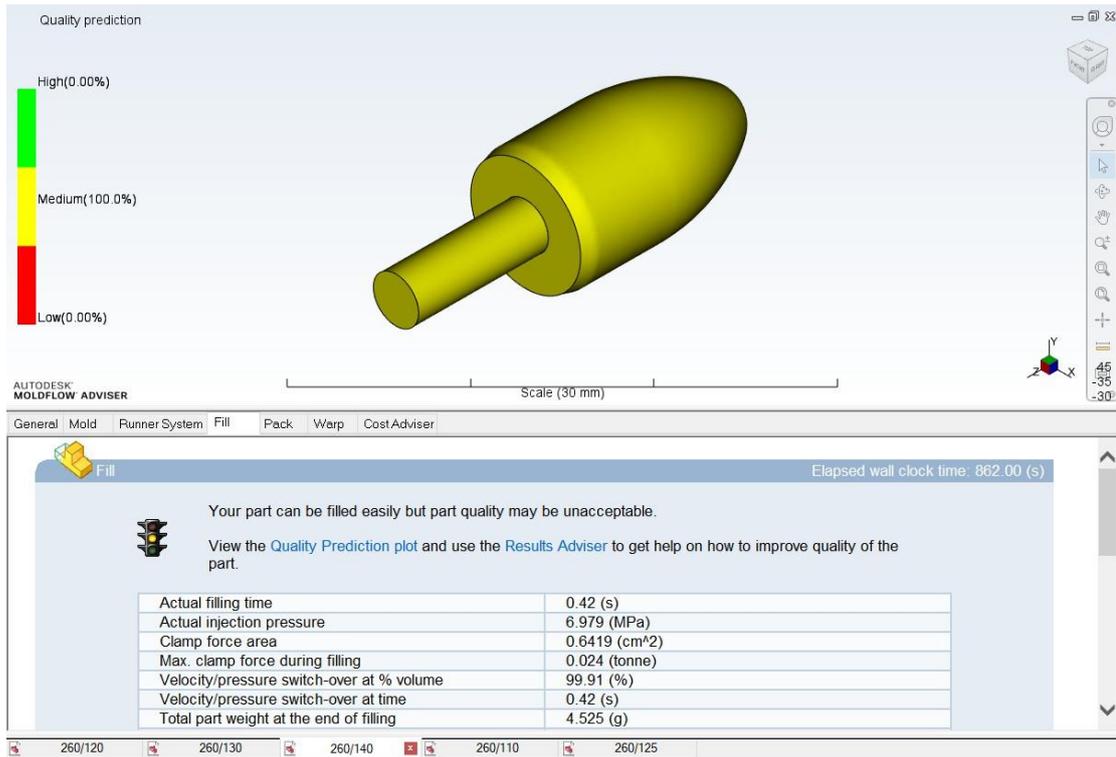
Gambar 17 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 260°C dan Temperatur Cetakan 120°C



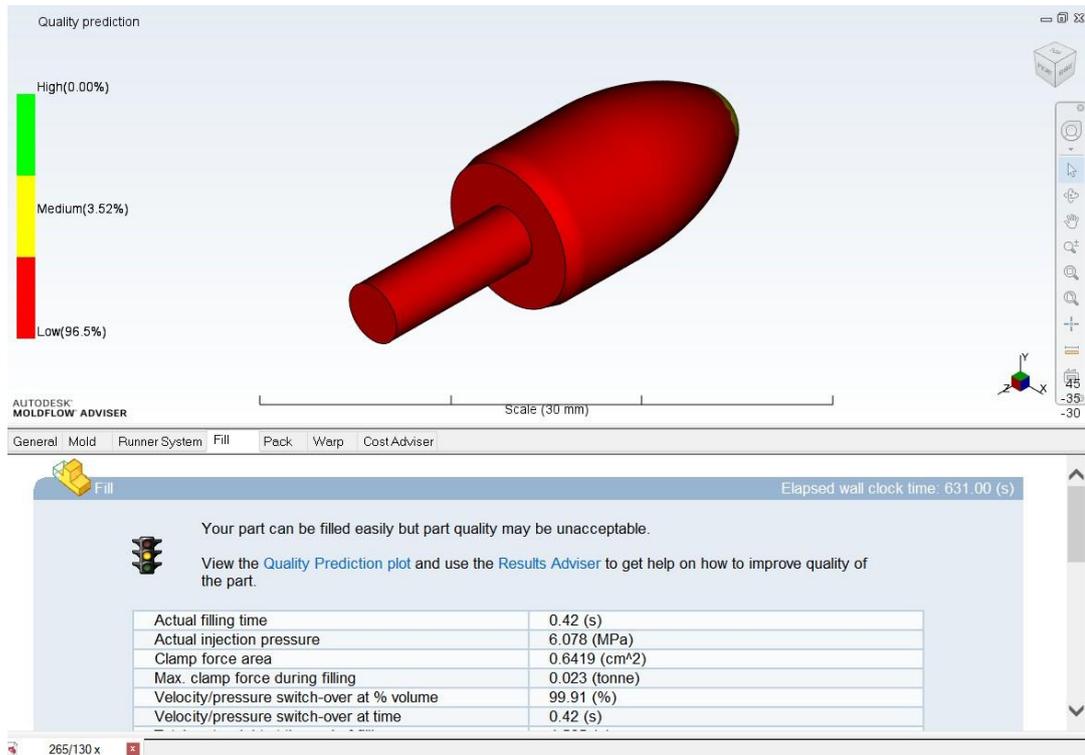
Gambar 18 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 260°C dan Temperatur Cetakan 125°C



Gambar 19 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 260°C dan Temperatur Cetakan 130°C



Gambar 20 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 260°C dan Temperatur Cetakan 140°C



Gambar 21 Hasil Simulasi Temperatur Leleh 265°C dan Temperatur Cetakan 130°C

3. Hasil Perhitungan Taguchi-Grey-Fuzzy

Tabel 4 Hasil perhitungan Taguchi-grey-fuzzy

No	Loss Function		Rasio S/N		Normalisasi S/N		Deviation Sequence		GRC		GFRG
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	
1	0.853	0.015	0.689	18.372	0.410	0.000	0.590	1.000	0.459	0.333	0.407
2	0.682	0.008	1.664	21.058	0.682	0.706	0.318	0.294	0.612	0.630	0.585
3	1.008	0.010	-0.035	19.929	0.208	0.409	0.792	0.591	0.387	0.458	0.431
4	0.741	0.010	1.300	19.887	0.581	0.398	0.419	0.602	0.544	0.454	0.499
5	0.525	0.006	2.801	22.176	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.920
6	0.865	0.008	0.632	20.871	0.394	0.657	0.606	0.343	0.452	0.593	0.525
7	1.105	0.012	-0.433	19.117	0.097	0.196	0.903	0.804	0.356	0.383	0.409
8	0.750	0.007	1.249	21.721	0.567	0.880	0.433	0.120	0.536	0.807	0.649
9	1.197	0.009	-0.779	20.443	0.000	0.545	1.000	0.455	0.333	0.523	0.426

4. Hasil Perhitungan Taguchi-Grey-Fuzzy Setelah Konfirmasi

Tabel 5 Hasil Perhitungan Taguchi-Grey-Fuzzy Setelah Konfirmasi

No	Loss Function		Rasio S/N		Normalisasi S/N		Deviation Sequence		GRC		GFRG
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	
1	0.853	0.015	0.689	18.372	0.410	0.000	0.590	1.000	0.459	0.333	0.407
2	0.682	0.008	1.664	21.058	0.682	0.706	0.318	0.294	0.612	0.630	0.585
3	1.008	0.010	-0.035	19.929	0.208	0.409	0.792	0.591	0.387	0.458	0.431
4	0.741	0.010	1.300	19.887	0.581	0.398	0.419	0.602	0.544	0.454	0.499
5	0.525	0.006	2.801	22.176	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.920
6	0.865	0.008	0.632	20.871	0.394	0.657	0.606	0.343	0.452	0.593	0.525
7	1.105	0.012	-0.433	19.117	0.097	0.196	0.903	0.804	0.356	0.383	0.409
8	0.750	0.007	1.249	21.721	0.567	0.880	0.433	0.120	0.536	0.807	0.649
9	1.197	0.009	-0.779	20.443	0.000	0.545	1.000	0.455	0.333	0.523	0.426
10	0.540	0.006	2.676	22.061	0.965	0.970	0.035	0.030	0.935	0.943	0.790

BIODATA PENULIS



Satriyo Wibisono Aspar dilahirkan di Jakarta, 14 Juni 2000, merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri 03 Pondok Labu Jakarta (2006-2012), SMP Negeri 85 Jakarta (2012-2015), dan SMA Negeri 34 Jakarta (2015-2018). Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Mesin FTIRS Institut Teknologi Sepuluh Nopember sebagai mahasiswa S1 (2018-2022).

Selama berkuliah, penulis aktif dalam berbagai kegiatan non akademik seperti organisasi dan kepanitiaan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis terdaftar sebagai Staf Pengurus Departemen Dalam Negeri Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) 2019/2020 dan dilanjutkan menjadi Wakil Ketua Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) Bidang Internal 2020/2021. Dalam kepanitiaan, penulis tergabung sebagai Staf *Physical Marketing* ITS EXPO 2021. Penulis juga pernah berkesempatan untuk melakukan kerja praktik di Pusat Teknologi Industri Permesinan (PTIP) - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis dapat dihubungi melalui email satriyo14@gmail.com