

TUGAS AKHIR - TM184835

**OPTIMASI TEMPERATUR *BARREL* DAN TEMPERATUR
CETAKAN PADA PROSES *INJECTION MOLDING*
TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN
PROYEKTIL *STAINLESS STEEL 304L/PA-6***

M Fadel Alfayed
NRP 02111840000159

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

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

NIP 197906202006042001

Program Studi Sarjana Teknik Mesin
kultas 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 *STAINLESS STEEL 304L/PA-6***

M FADEL ALFAYED

NRP. 02111840000159

Dosen Pembimbing

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

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

NIP 197906202006042001

Program Studi Sarjana 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 STAINLESS STEEL
304L/PA6**

M FADEL ALFAYED

NRP. 02111840000159

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
Departement of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2022**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI TEMPERATUR *BARREL* DAN TEMPERATUR CETAKAN PADA PROSES *INJECTION MOLDING* TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL *STAINLESS STEEL 304L/PA-6*

TUGAS AKHIR

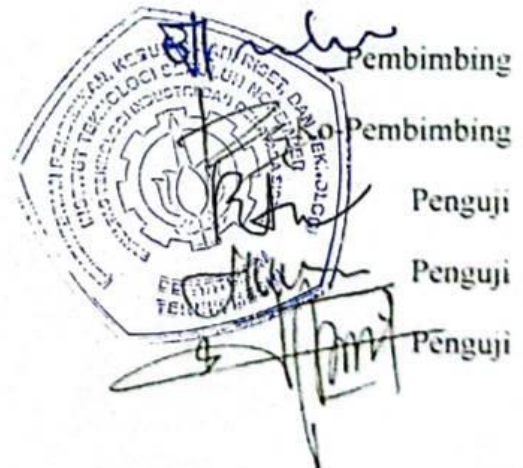
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar S.T. pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Insitut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **M FADEL ALFAYED**

NRP. 02111840000159

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 STAINLESS STEEL 304L/PA6

FINAL PROJECT

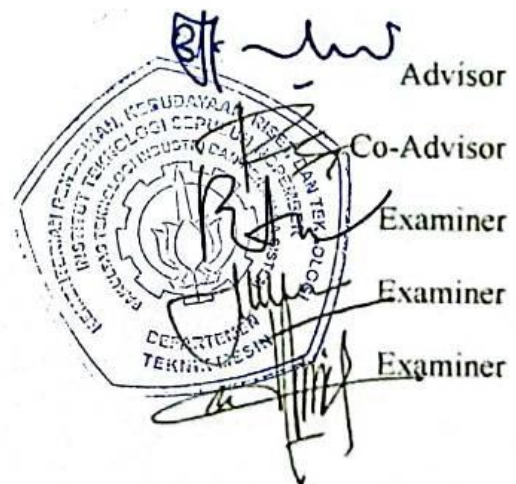
Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree S.T at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Insitut Teknologi Sepuluh Nopember

By : M Fadel Alfayed

NRP. 02111840000159

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.



SURABAYA

July, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : M Fadel Alfayed / 02111840000159

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 Proyektil *Stainless Steel 304L/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



M Fadel Alfayed
NRP. 02111840000159

Mengetahui

Dosen Pembimbing



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

Dosen Ko-Pembimbing



Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si.
NIP. 197906202006042001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : M Fadel Alfayed / 02111840000159
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 Stainless Steel 304L/PA6" 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 Juli 2022

Student



M Fadel Alfayed
NRP. 02111840000159

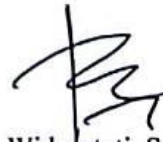
Acknowledged

Advisor



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

Co-Advisor



Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si.
NIP. 197906202006042001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMASI TEMPERATUR BARREL DAN TEMPERATUR CETAKAN PADA PROSES INJECTION MOLDING TERHADAP PERBEDAAN DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL *STAINLESS STEEL 304L/PA-6*

Nama Mahasiswa / NRP : M Fadel Alfayed / 02111840000159
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 merupakan salah satu jenis proyektil yang akan pecah jika mengenai objek yang keras. Proyektil berbahan Stainless Steel 304L/PA-6 ini dibuat dengan proses injection molding agar peluru tersebut dapat diproduksi dengan efektif. Material ini dipilih untuk menekan biaya produksi 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. Perubahan dimensi dan kebulatan proyektil adalah hal yang menjadi perhatian pada penelitian ini. Tahap awal dari penelitian ini dilakukan dengan membuat desain eksperimen dari parameter proses yang akan digunakan. Selanjutnya, dilakukan pemodelan proses injeksi dengan menggunakan software Autodesk Moldflow Adviser 2021. Pemodelan ini digunakan untuk mendapatkan perkiraan parameter yang akan berpengaruh dan mendapatkan nilai parameter yang akan digunakan pada proses injeksi. Setelah itu, dilakukan eksperimental untuk memvalidasi hasil simulasi. Perubahan dimensi dan penyimpangan pada kebulatan hasil eksperimen diukur agar selanjutnya dapat dilakukan perhitungan optimasi. Perhitungan optimasi dilakukan dengan menggunakan Taguchi-grey-fuzzy dengan keluaran nilai grey-fuzzy reasoning grade (GFRG). Setelah didapatkan nilai parameter optimal dan pengaruhnya, dilakukan eksperimen konfirmasi untuk membuktikan bahwa parameter tersebut akan menghasilkan nilai variabel respon yang terbaik. Dari penelitian ini, didapatkan nilai parameter optimal temperatur barrel sebesar 240°C dan tempratur cetakan sebesar 90°C. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa faktor temperatur barrel berkontribusi sebesar 10,01% sedangkan kontribusi dari temperatur cetakan sebesar 19,97% dengan hasil uji hipotesis bahwa kedua parameter tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan. Optimasi ini dikonfirmasi secara eksperimental dan hasil menghasilkan GFRG yang masih berada dalam nilai interval keyakinan. Dari hasil pengujian ini dapat diartikan bahwa hasil desain optimasi memenuhi hasil eksperimen.

Kata Kunci: *Injection molding, Perubahan Dimensi, Kebulatan, Taguchi-grey-fuzzy*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMIZATION OF BARREL AND MOLD TEMPERATURE ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL CHANGE AND ROUNDNESS OF STAINLESS STEEL 304L/PA6 COMPOSITE PROJECTILE

Student Name / NRP : M Fadel Alfayed / 02111840000159
Departement : Mechanical Engineering FT-IRS ITS
Advisor : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
Co-Adviser : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

ABSTRACT

Frangible projectile is a type of projectile that will break if it hits a hard object. This 304L/PA-6 Stainless Steel projectile is made by an injection molding process so that the bullet can be produced effectively. This material was chosen to reduce production costs. Projectiles require a small tolerance value in order 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 change and sphericity of the projectile are the concerns of this study. The initial stage of this research was carried out by making an experimental design of the process parameters to be used. Next, the injection process modeling was carried out using Autodesk Moldflow Adviser 2021 software. This modeling was used to get an estimate of the parameters that would have an effect and to get the parameter values that would be used in the injection process. After that, an experiment was carried out to validate the simulation results. Dimension change and deviations in the roundness of the experimental results are measured so that further optimization calculations can be carried out. The optimization calculation is done using Taguchi-grey-fuzzy with the output value of gray-fuzzy reasoning grade (GFRG). After obtaining the optimal parameter values and their effects, confirmation experiments were carried out to prove that these parameters would produce the best response variable values. From this research, the optimal parameter value of barrel temperature is 240 °C and mold temperature is 90 °C. The ANOVA results show that the barrel temperature factor contributes 10.01% while the contribution from the mold temperature is 19.97%. This optimization was confirmed experimentally and the results resulted in a GFRG that was still within the confidence interval value. From the results of this test, it can be interpreted that the results of the optimization design meet the experimental results

Keyword: Injection molding, Dimension Change, 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 Perbedaan Dimensi dan Kebulatan Proyektil *Stainless Steel* 304L/PA-6.**

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 **Arnold Edward**, Ibu **Netty Kesuma**, serta abang dan kakak penulis, **M Hadiyan Faza** dan **Ratu Farah Nabila** yang telah memberikan dukungan serta doa yang tiada henti-hentinya agar segala urusan penulis dimudahkan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Ibu **Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si**, dan Bapak **Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.** 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 **Agus Sigit Pramono, Ir. Dr. DEA** selaku dosen wali yang telah membantu dan membimbing Penulis selama masa perkuliahan.
5. Seluruh teman bimbingan Tugas Akhir (**Andi, Jono, dan Pewe**) atas segala motivasi, bantuan, dan ilmu yang telah diberikan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh teman Laboratorium Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS (**Anyun, Ugi, Adhy, Azhar, Ninik, Wafiq, Dwiki, Shafa, Tyo, Dariz, Frans, dan Sherly**) telah membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh keluarga besar Gunadya (**Ajis, Vicky, Ganes, Rafli, Ican, Mumud, Acid, Jono, Edo, Pray, 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 keluarga besar M61 yang telah menemani Penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS.
9. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS, atas segala bantuan dan kerjasamanya selama masa perkuliahan.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya dan dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang akan mengerjakan.

Surabaya, 13 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

COVER.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	xiv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xviii
DAFTAR GAMBAR	xx
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Projektil <i>Frangible</i>	5
2.2 Injection Molding	6
2.2.1 Injection Molding Machine	7
2.2.2 Parameter Injeksi	8
2.3 Shrinkage dan Warpage	9
2.4 Kebulatan.....	10
2.5 Komposit	11
2.5.1 Stainless Steel 304L.....	12
2.5.2 Poliamida 6	12
2.6 Autodesk Moldflow	13
2.7 Optimasi Taguchi-Grey-Fuzzy.....	14
2.7.1 Derajat Kebebasan	15
2.7.2 Matriks Ortogonal.....	15
2.7.3 Rasio Signal-to-Noise	15
2.7.4 Grey Relational Analysis.....	16
2.7.5 Grey-Fuzzy Reasoning Grade	17
2.7.6 Analysis of Variance (ANOVA)	18
2.7.7 Eksperimen Konfirmasi	18

2.8 Penelitian Terdahulu.....	19
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2 Tahapan Penelitian	22
3.2.1 Studi Literatur dan Lapangan.....	22
3.2.2 Simulasi Proses Injeksi dengan <i>Software Autodesk Moldflow</i>	23
3.2.3 Desain Eksperimen	25
3.2.4 Persiapan Mesin dan Bahan	28
3.2.5 Proses Injeksi Spesimen	30
3.2.6 Pengukuran Spesimen	30
3.2.7 Pengambilan Data Eksperimen	31
3.2.8 Optimasi Metode Taguchi-Grey-Fuzzy	32
3.2.9 ANOVA	35
3.2.10 Eksperimen Konfirmasi.....	35
3.2.11 Kesimpulan dan Saran.....	35
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Penentuan Variabel Eksperimen Dengan <i>Autodesk Moldflow Adviser 2021</i>	36
4.2 Pelaksanaan Eksperimen Injeksi.....	39
4.2.1 Data Respon Percobaan	40
4.2.2 Pengaruh Temperatur Barrel Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan.....	40
4.2.3 Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan.....	42
4.3 Optimasi Parameter Proses Injeksi Dengan <i>Taguchi-Grey-Fuzzy</i> dan ANOVA.....	43
4.3.1 Rasio S/N dan Normalisasi S/N.....	43
4.3.2 Deviation Sequence dan Grey Relational Coefficient (GRC)	44
4.3.3 Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)	45
4.3.4 Analisa Data dan Persen Kontribusi.....	46
4.4 Eksperimen Konfirmasi.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	1
Spesifikasi Mesin dan Material.....	1
Hasil Simulasi <i>Autodesk Moldflow Adviser 2021</i>	2
Hasil perhitungan <i>Taguchi-Grey-Fuzzy</i>	1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proyektil <i>Frangible</i> Kaliber 9 mm (J. Komenda, 2017)	5
Gambar 2.2 Siklus Dasar Proses <i>Injection Molding</i> (Rosato dkk, 200)	6
Gambar 2.3 <i>Vertical Injection Molding Machine</i> (Engel, 2010)	7
Gambar 2.4 Contoh Hasil Analisa <i>Molding Window</i> (Autodesk, 2018).....	14
Gambar 2.5 Ilustrasi Kurva Fungsi Keanggotaan (Das dkk, 2015).....	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Simulasi Autodesk Moldflow.....	23
Gambar 3.3 Pemberian Nama <i>File Project</i>	24
Gambar 3.4 Cetakan dan <i>Gating System</i> yang Digunakan untuk Simulasi	24
Gambar 3.5 Pemilihan Material pada Database dalam <i>Software</i>	25
Gambar 3.6 Mesin Kompaksi	29
Gambar 3.7 Mikrometer Sekrup yang Digunakan.....	29
Gambar 3.8 <i>V-block</i> dan <i>Dial Indicator</i> yang Digunakan	30
Gambar 3.9 Titik Pengukuran Perubahan Dimensi pada Spesimen	30
Gambar 3.10 Skema Pengukuran dengan Metode MZC (Sui & Zhang, 2012).....	31
Gambar 3.11 Diagram Alir Proses Optimasi	32
Gambar 3.12 Bentuk Fungsi Keanggotaan	33
Gambar 3.13 Pengelompokkan Logika Fuzzy	34
Gambar 3.14 Perhitungan GFRG Pada <i>Software</i> MATLAB.....	34
Gambar 4.1 Tahapan Utama Penelitian.....	36
Gambar 4.2 (a) Pembuatan Gate dan (b) Hasil Analisis pada <i>Molding Window</i> pada <i>Autodesk Moldflow 2021</i>	37
Gambar 4.3 Hasil <i>Quality Prediction</i> dengan Parameter Hasil Analisis <i>Molding Window</i>	37
Gambar 4.4 Hasil <i>Quality Prediction</i> dengan Menggunakan Paramter Rekomendasi Temperatur.	38
Gambar 4.5 (a) Temperatur Leleh 230 °C, Temperatur Cetakan 60 °C. (b) Temperatur Leleh 230 °C, Temperatur Cetakan 70 °C. (c) Temperatur Leleh 240 °C, Temperatur Cetakan 70 °C. (d) Temperatur Leleh 240 °C, Temperatur Cetakan 90 °C.....	39
Gambar 4.6 Proyektil <i>Frangible</i> Hasil Proses Injeksi (milimeter).....	40
Gambar 4.7 Pengaruh Temperatur Barrel dan Temperatur Cetakan terhadap Perubahan Dimensi.....	41
Gambar 4.8 Pengaruh Temperatur Barrel dan Temperatur Cetakan terhadap Kebulatan ...	42
Gambar 4.9 (a) Pengaruh Temperatur Barrel terhadap Respons GFRG (b) Pengaruh Temperatur Cetakan terhadap Respons GFRG	46
Gambar 4.10 Perhitungan <i>p-value</i> Menggunakan Minitab.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kategori Ukuran Pecahan Proyektil	6
Tabel 2.2 Spesifikasi dari Beberapa Jenis Proyektil <i>F-rangible</i>	6
Tabel 2.3 Metode Pengukuran Penyimpangan Kebulatan.....	10
Tabel 2.4 Sifat Fisik dan Mekanik Stainless Steel 304L	12
Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Mekanik Poliamida 6.....	13
Tabel 2.6 Penjelasan Hasil <i>Molding Window</i> (Autodesk, 2019)	14
Tabel 2.7 Pemilihan Matriks Ortogonal (Soejanto, 2009).....	15
Tabel 2.8 Perhitungan ANOVA.....	18
Tabel 2.9 Hasil Penelitian Lin, dkk (2021).....	19
Tabel 2.10 Hasil Penelitian Ryu, dkk (2020).....	20
Tabel 2.11 Parameter Optimal Injeksi pada Penelitian Kc dkk(2015)	20
Tabel 2.12 Parameter Optimal Injeksi pada penelitian Radhwan dkk(2015)	21
Tabel 3.1 Perbandingan Material BASF: Catamold 17-4PH dan 90% <i>Stainless Steel</i> 304L + 10% PA-6	26
Tabel 3.2 Perbandingan Komposisi <i>Stainless Steel</i> BASF: Catamold 17-4PH dan <i>Stainless Steel</i> 304L.....	26
Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen Penentuan Parameter Injeksi yang akan Digunakan	26
Tabel 3.4 Variabel Proses dan Level yang Digunakan	27
Tabel 3.5 Variabel Konstan	27
Tabel 3.6 Derajat Kebebasan Eksperimen	27
Tabel 3.7 Desain Eksperimen Berdasarkan Matriks Ortogonal.....	28
Tabel 3.8 Data Respons Eksperimen	31
Tabel 3.9 Nilai Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N.....	32
Tabel 3.10 Nilai <i>Deviation Sequence</i> dan GRC	33
Tabel 3.11 Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy	34
Tabel 3.12 Perhitungan ANOVA.....	35
Tabel 4.1 Hasil Analisis <i>Fill</i> Menggunakan Autodesk Moldflow Adviser 2021.....	38
Tabel 4.2 Hasil Penentuan Variabel Eksperimen.....	39
Tabel 4.3 Hasil Eksperimen.....	40
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N	44
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan <i>Deviation Sequence</i> dan GRC	45
Tabel 4.6 Hasil perhitungan GFRG.....	45
Tabel 4.7 Nilai Rata-rata Multi Respon GFRG pada Masing-masing Level Faktor.....	46
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan ANOVA	49
Tabel 4.9 Hasil Pengolahan Data	49
Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi	50
Tabel 4.11 Hasil Pengolahan Data Eksperimen Konfirmasi	50
Tabel 4.12 Hasil Eksperimen Konfirmasi	51

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi *injection molding* merupakan salah satu metode pencetakan yang kuat yang dapat membentuk produk plastik berbagai bentuk dan ukuran. *Injection Molding Machine (IMM)* digunakan untuk menambahkan bahan baku polimer bubuk menjadi polimer dengan fluiditas yang baik dengan pemanasan eksternal dan garis mekanis lelehan, diikuti oleh *screw* dan memasuki *cavity* dengan temperatur rendah dan didinginkan dan dipadatkan untuk membentuk produk plastik yang konsisten dengan bentuk dari cetakannya (Hongbo Fu dkk, 2000). Terdapat beberapa tantangan pada proses pembuatan produk dengan menggunakan *injection molding* yaitu terdapat kemungkinan terjadinya *shrinkage*. *Shrinkage* adalah perbedaan antara dimensi dari cetakan dengan produk hasil cetakan. Hal ini terjadi dikarenakan plastik yang diinjeksi akan mengalami kenaikan volume ketika temperatur dari plastik bertambah. Kecacatan tersebut dapat menghasilkan perubahan dimensi pada suatu produk sehingga kecacatan tersebut harus dapat diminimalisir jika ingin menghasilkan produk dengan toleransi yang kecil. Proyektil *frangible* merupakan salah satu jenis proyektil yang akan pecah jika mengenai objek yang keras. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Belanger & Potvin, 1993), Peluru *frangible* ini memiliki toleransi yang sangat kecil yaitu sebesar ± 0.0254 mm. Diameter yang lebih besar akan menyebabkan proyektil pecah terlebih dahulu pada saat ditembakkan, sedangkan diameter yang lebih kecil akan menyebabkan akurasi yang rendah. Selain itu, disebutkan juga pada standar manufaktur peluru dari SAAMI (2015) bahwa toleransi dari peluru mencapai ± 0.0005 mm. Oleh karena itu, diperlukan proses injeksi yang akurat sehingga mampu mencapai angka ketelitian tersebut. Penelitian ini juga menyebutkan bahwa nilai dari massa jenis relatif minimum pada proyektil *frangible* adalah 5,7. Kontrol massa pada proses injeksi harus dapat dilakukan agar didapatkan produk proyektil dengan massa seberat mungkin agar dapat memenuhi spesifikasi.

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 *holding*. 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*. Pada metode ini, material yang diinjeksikan ditambahkan dengan gas N_2 dengan harapan meningkatkan sifat material produknya. 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. Untuk meminimalisir terjadinya kecacatan *shrinkage*, KC dkk, (2015) melakukan penelitian pada material propilena-serat gelas-serat sisal. Didapatkan dari penelitian tersebut bahwa parameter yang paling berpengaruh dari yang tertinggi adalah tekanan injeksi, tekanan penahan, temperatur leleh, temperatur cetakan, waktu penahan, dan waktu pendinginan, dan Radhwan dkk (2015) melakukan penelitian untuk mendapatkan optimasi nilai *shrinkage* pada proses *injection molding* dengan menggunakan metode Taguchi dan ANOVA. Pendekatan metode Taguchi diterapkan untuk optimalisasi parameter proses yang dipilih yaitu, *mold temperature*, *melt temperature*, *packing pressure*, *packing time*, and *cooling time*.

Untuk mendapatkan tingkat presisi dan akurasi yang tinggi, proyektil *frangible* memerlukan dimensi dan geometri yang baik. Pada proses *injection molding*, dimensi dan geometri proyektil dipengaruhi oleh parameter proses injeksi. Temperatur leleh yang tinggi pada proses injeksi dapat memuaikan material yang diinjeksikan dan berdampak pada penyusutan setelah proses injeksi dilakukan ketika pendinginan. 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*

Pada penelitian ini, analisis dilakukan dengan tujuan memperoleh besaran parameter proses injeksi yang optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan terendah. 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. Pada penelitian ini menggunakan Autodesk Moldflow Adivser dilakukan untuk melakukan simulasi agar 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 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dapat dibuat perumusan masalah sebagai berikut:

1. Apakah temperatur *barrel* berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil Stainless Steel 304L/PA-6?
2. Apakah temperatur cetakan berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil Stainless Steel 304L/PA-6?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Analisis pengaruh dari temperatur *barrel* terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil Stainless Steel 304L/PA-6
2. Analisis pengaruh dari temperatur cetakan terhadap perubahan dimensi dan kebulatan pada proyektil Stainless Steel 304L/PA-6

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan pada penelitian adalah sebagai berikut:

1. Saat pengukuran dimensi menggunakan temperatur ruangan.
2. Spesimen disimpan pada proses pengondisian dengan temperatur 25°C.
3. Proses pendinginan cetakan setelah proses injeksi dianggap homogen.
4. Komposisi material yang digunakan yaitu 90% *Stainless steel 304L* dan 10%PA-6
5. Seluruh pengukuran dilakukan pada bagian *boat-tail* proyektil.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mendapatkan data parameter kontrol cetakan injeksi terbaik untuk pembuatan proyektil *frangible* menggunakan material *stainless steel* 304L/PA-6.
2. Mendapatkan material alternatif untuk pembuatan proyektil *frangible* yang sesuai dengan karakteristik.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proyektil *Frangible*

Kemampuan untuk terpisah menjadi fragmen-fragmen kecil setelah mengenai target yang keras disebut dengan frangibility. Frangibility factor atau sifat mudah pecah dari proyektil frangible yang dipengaruhi oleh bentuk proyektil, sifat mekanik dari material proyektil, desain proyektil, teknologi produksi dan kondisi impact dari proyektil contoh bentuknya pada **Gambar 2.1** (J. Komenda, 2017)



Gambar 2.1 Proyektil *Frangible* Kaliber 9 mm (J. Komenda, 2017)

Proyektil *frangible* adalah proyektil yang mudah pecah menjadi serpihan kecil ketika mengenai target yang lebih keras agar mencegah terjadinya *ricochet* dan *backsplash*. Proyektil biasanya terpental saat ditembakkan dan mengenai benda keras. Hal ini berbahaya bagi penembak karena pantulan proyektil dapat membuat proyektil menjadi rapuh (Belanger & Potvin, 1993). Proyektil jenis ini biasanya digunakan saat latihan, proyektil ini harus memiliki sifat yang mirip dengan proyektil (timbang) yang biasa digunakan. Bahan yang digunakan untuk membuat proyektil getas juga bermacam-macam.

Standarisasi dari proyektil *frangible* dinamakan *Frangibility Factor* (FF). *Frangibility factor* ditentukan dengan menguji proyektil tersebut dan mengukur ukuran pecahan proyektil tersebut. *Frangibility Factor* dapat dirumuskan sebagai :

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

dimana K_{mi} adalah koefisien kategori i , m_{ci} adalah massa pecahan proyektil pada kategori i , m_q adalah massa awal proyektil (Bui, et al., 2021).

Tabel 2.1 Kategori Ukuran Pecahan Proyektil

Kategori Ukuran i	Dimensi 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, <i>length of bullet</i>)	0.01

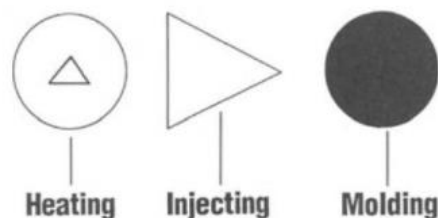
Diperlukan *frangibility factor* yang tinggi untuk mendapatkan *frangible bullet* yang baik. Oleh karena itu perlu spesifikasi untuk menentukan produk proyektil *frangible*. Beberapa spesifikasi untuk proyektil *frangible* sudah ada. Spesifikasi produk ini dapat dijadikan acuan dalam memproduksi proyektil *frangible*.

Tabel 2.2 Spesifikasi dari Beberapa Jenis Proyektil *F-rangible*

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

2.2 Injection Molding

Teknologi *injection molding* merupakan salah satu metode pencetakan yang kuat yang dapat membentuk produk plastik menjadi berbagai bentuk dan ukuran (Hongbo Fu, 2000). Setiap proses pencetakan injeksi melakukan fungsi-fungsi berikut: (1) *plasticizing*, yaitu proses pemanasan dan peleburan plastik (2) *injection*, yaitu proses menuangkan plastik cair ke dalam cetakan, (3) *after filling*, 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) Pendinginan adalah proses pendinginan suatu plastik sampai menjadi dingin dan siap dikeluarkan dari cetakan dan (5) Pelepasan bagian cetakan adalah proses mengeluarkan cetakan dengan cara membuka cetakan (Rosato dkk, 2000).



Gambar 2.2 Siklus Dasar Proses *Injection Molding* (Rosato dkk, 200)

Selama tahap *plasticizing* dari proses injeksi, *screw* membawa material plastis ke depan dengan kecepatan tertentu. Saat alur *screw* menjadi lebih dangkal, material dipadatkan dan terus menerus dibawa ke arah depan. Saat injeksi dimulai, sekrup bergerak maju, dan material terus mengisi ke dalam cetakan. Pada saat yang sama, sebagai tekanan dalam cetakan meningkat,

sekrup bergerak sementara menginjeksi. Ketika material diisi ke dalam cetakan, mesin injeksi menyuntikkan bahan ke dalam cetakan dengan tindakan tekanan balik. Suhu material terus berkurang, tekanan di rongga cetakan dimulai untuk mengurangi. Ketika bahan yang disuntikkan bisa aman dibentuk tanpa rusak, cetakan injeksi adalah dibuka, dan produk dikeluarkan melalui cetakan (Hongbo Fu, 2000).

2.2.1 Injection Molding Machine

Injection Molding Machine (IMM) digunakan untuk menambahkan bahan baku polimer bubuk menjadi polimer dengan fluiditas yang baik dengan pemanasan eksternal dan garis mekanis lelehan, diikuti oleh *screw* dan memasuki *cavity* dengan temperatur rendah dan didinginkan dan dipadatkan untuk membentuk produk plastik yang konsisten dengan bentuk dari cetakannya. Sistem injeksi terdiri dari 3 bagian utama, *plasticizing*, *injection part*, dan *pressure driving part* yang berfungsi sebagai berikut ; (1) *plasticizing* yaitu dibawah kinerja *screw* dan *heating ring*, material dilebur dan diplastisasi secara seragam, (2) *injection part*, dari kinerja *screw*, material diinjeksi ke dalam cetakan *cavity* pada tekanan dan kecepatan yang ditentukan, (3) *pressure driving part*, ketika material diinjeksi ke dalam *cavity*, *screw* akan tetap diam untuk menginjeksi kembali sebagian material ke dalam *cavity* untuk meminimalisir *shrinkage* yang disebabkan oleh pendinginan, memastikan kualitas produk, dan mencegah material mengalir kembali (Hongbo Fu, 2000). Contoh mesin *injection molding* ditunjukkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 *Vertical Injection Molding Machine* (Engel, 2010)

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. *Single-stage* adalah jenis IMM konvensional dimana plastik dilelehkan menggunakan kombinasi elemen pemanas pada *barrel* dan panas dari hasil gesekan *screw* di dalam *barrel*. Kelebihan dari IMM berjenis *single-stage* adalah waktu pemanasan yang lebih singkat, mampu untuk membersihkan sendiri akibat dari gerakan

screw, dan kontrol yang lebih responsif karena mekanisme yang relatif sederhana (Rosato dkk, 2000).

Mesin injeksi berjenis *twin stage* menggunakan 2 bagian yang terpisah untuk melakukan proses pelelehan plastik dan proses penginjeksian plastik. Bagian *screw* pada mesin ini hanya berputar di tempat tanpa bergerak maju dan mundur. Plastik yang dilelehkan pada bagian *screw* disalurkan ke bagian selanjutnya untuk siap diinjeksikan. Mekanisme penginjeksian plastik tidak dilakukan oleh *screw* melainkan dengan menggunakan mekanisme pendorong yang berbeda. Ketika plastik yang dilelehkan oleh bagian *screw* sudah siap diinjeksikan, terdapat *diverter valve* yang berfungsi untuk menutup arah aliran menuju bagian *screw* dan membuka arah aliran dari mekanisme pendorong. Setelah melakukan injeksi, *diverter valve* menutup arah aliran menuju mekanisme pendorong dan arah aliran menuju *screw*. Posisi ini berfungsi untuk menyiapkan plastik agar meleleh secara sempurna dan homogen (Rosato dkk, 2000).

2.2.2 Parameter Injeksi

Untuk mendapatkan hasil produk cetakan yang baik, perlu memperhatikan beberapa parameter proses yang penting seperti *injection speed*, *melt temperature*, *screw speed*, *back pressure*, *injection pressure*, *holding pressure*, *holding time*, dan *mold temperature* (Valero, 2020).

Parameter pertama yaitu, *melt temperature* atau temperatur leleh merupakan suhu di mana plastik meleleh dalam mesin. Saat *melt temperature* naik, *shrinkage*, waktu pendinginan dan aliran lelehan meningkat, dan *internal stress*, *pressure drop*, dan kekuatan *weld line* berkurang. 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 (Valero & R., 2020).

Parameter selanjutnya yaitu, *mold temperature* atau 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). Ketika suhu cetakan tinggi dan ukurannya perbandingan bagiannya sama, untuk bagian yang lebih kecil ketebalan, tekanan maksimum yang diperlukan untuk injeksi tidak berubah secara signifikan, tetapi waktu injeksi yang lebih lama diperlukan. Tekanan maksimum yang diperlukan untuk injeksi cetakan juga tidak berubah secara signifikan, dan tekanan maksimum lebih kecil ketika waktu injeksi pendek. (Hongbo Fu, 2000).

Parameter selanjutnya adalah tekanan balik. Besarnya tekanan balik sama dengan tekanan bahan cair yang disebabkan oleh gerakan rotasi sekrup dan desain sekrup di area depan ketika material dipaksa masuk ke area depan sekrup, dan tekanan itu dikembalikan oleh sekrup. Parameter ini dapat dikontrol dan diatur pada mesin. Tekanan balik yang lebih tinggi membuat bahan lebih seragam dan gesekan menghasilkan panas dan dapat menjebak udara di depan auger. Namun, tekanan balik yang terlalu tinggi dapat menurunkan material dan meningkatkan waktu siklus.

Berikutnya adalah tekanan injeksi, tekanan yang diberikan saat plastik disuntikkan ke dalam cetakan. Tekanan injeksi tergantung pada hambatan aliran

material, laju pengisian, suhu material dan suhu cetakan. Konsistensi tekanan injeksi dalam rongga sangat penting untuk mendapatkan produk yang baik (Rosato et al, 2000).

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 *holding pressure* dan *holding time*. Tekanan *holding* adalah tekanan yang diterapkan untuk mencegah plastik masuk kembali ke mesin, juga dikenal sebagai aliran balik. *Holding time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk memberikan tekanan *holding*. Waktu yang dibutuhkan tergantung pada tekanan dalam rongga atau massa bahan yang disuntikkan.

2.3 Shrinkage dan Warpage

Shrinkage adalah perbedaan ukuran antara cetakan dan produk yang disuntikkan. Fenomena ini terjadi karena penurunan densitas material serta penurunan suhu dan tekanan yang diberikan pada material. *Shrinkage* terjadi selama injeksi, selama pendinginan dalam cetakan, dan sampai produk dikeluarkan dari cetakan selama 48 jam. Disarankan agar prosedur pengukuran dilakukan setelah 48 jam injeksi untuk mendapatkan nilai yang lebih stabil (Fischer, 2003). Nilai *shrinkage* dapat dihitung sesuai dengan rumus 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 berikut.

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

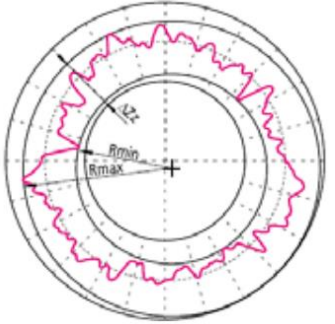
Semakin tinggi temperatur yang diberikan pada material, maka penyusutan volume yang terjadi juga semakin besar. Untuk mengkompensasi hal tersebut, maka material yang dimasukkan ke dalam *cavity* harus ditambahkan untuk menjaga agar volume yang diinginkan tercapai. Hal ini dapat dilakukan dengan menambahkan 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.

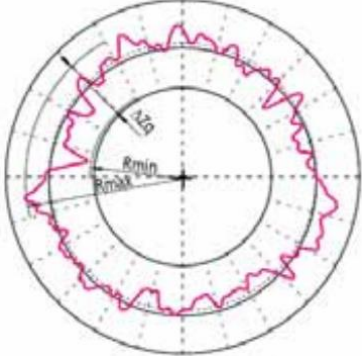
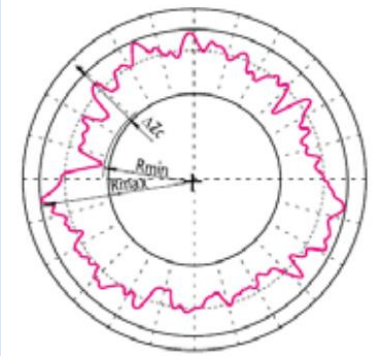
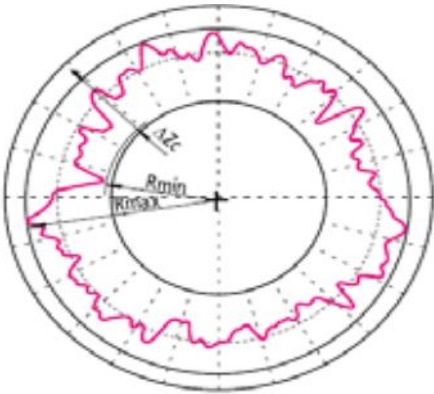
Warpage adalah perubahan bentuk dari produk yang dihasilkan dari proses injeksi akibat perbedaan *shrinkage* pada bagian-bagian tertentu produk. Hal ini mengakibatkan produk menjadi melengkung atau memutar sehingga bentuk dan ukuran dari produk tidak sesuai dengan yang diinginkan. Tentu fenomena ini 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*.

2.4 Kebulatan

Toleransi geometri dapat berfungsi sebagai bahasa komunikasi untuk mendapatkan spesifikasi dari suatu produk tertentu. Toleransi geometri dapat digunakan untuk mendeskripsikan bentuk dari suatu produk, dan juga toleransi yang diperlukan untuk produk tersebut. Beberapa standar untuk toleransi geometri yang sering digunakan adalah American Society of Mechanical Engineers (ASME), American National Standards Institute (ANSI), dan United States Department of Defense (DoD) (Drake, 1999). Penyimpangan dari toleransi geometri dapat terjadi dengan adanya *non-uniform shrinkage* pada produk. *Non-uniform shrinkage* dapat terjadi dikarenakan adanya *residual stress* pada produk hasil injeksi. *Non-uniform shrinkage* dapat dihindari dengan menggunakan parameter proses yang tepat. Kebulatan merupakan salah satu jenis toleransi geometri untuk mengukur penyimpangan dari bentuk lingkaran pada bidang dengan bentuk lingkaran. Alat ukur yang biasa digunakan untuk mengukur kebulatan adalah jam ukur dan mikrometer 3 kaki. Berdasarkan Sui & Zhang (2012), terdapat 4 metode pengukuran dalam kebulatan seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Metode Pengukuran Penyimpangan Kebulatan

Metode	Deskripsi
<p data-bbox="261 1290 820 1323">Minimum Zone Reference Circle (MZC)</p> 	<p data-bbox="868 1290 1410 1435">Pengukuran dilakukan dengan menggambar lingkaran 2 lingkaran untuk menunjukkan penyimpangan terbesar dan terkecil.</p> <p data-bbox="868 1469 1426 1581">Selisih dari penyimpangan maksimum dan minimum merupakan hasil penyimpangan kebulatan.</p>

<p>Least Square Circle (LSC)</p> 	<p>Lingkaran dibuat dengan kriteria luas di dalam lingkaran sama dengan luas di luar lingkaran.</p> <p>Pengukuran dilakukan dengan selisih antara jarak defleksi maksimum dan minimum terhadap referensi lingkaran</p>
<p>Maximum Inscribed Circle (MIC)</p> 	<p>Dibuat lingkaran sebesar mungkin yang bisa dimuat pada bagian dalam profil penyimpangan.</p> <p>Selisih antara jarak maksimum profil penyimpangan dengan lingkaran referensi merupakan nilai penyimpangan kebulatan</p>
<p>Maximum Circumscribed Circle (MCC)</p> 	<p>Lingkaran sebesar mungkin yang bisa dimuat pada bagian luar profil penyimpangan dibuat.</p> <p>Selisih antara jarak maksimum profil penyimpangan dengan lingkaran referensi merupakan nilai penyimpangan kebulatan</p>

Terdapat banyak faktor yang wajib diperhitungkan untuk melakukan proses cetakan injeksi dengan nilai toleransi yang tinggi, seperti desain produk, desain cetakan, spesifikasi mesin cetakan injeksi, dan siklus dari mesin cetakan injeksi. Hal ini dikarenakan nilai *shrinkage* dari tiap material yang ingin diinjeksi berbeda-beda sehingga perlu penyesuaian dalam pengaturan proses injeksi (Rosato et al., 2000). Kesalahan yang terjadi dari toleransi geometri dapat diakibatkan oleh *non-uniform shrinkage* pada hasil produk yang muncul karena terdapat tegangan sisa (*residual stress*) pada hasil produk. Hal ini dapat dihindari dengan menggunakan parameter proses injeksi yang optimal.

2.5 Komposit

Komposit merupakan sejumlah sistem multi fasa sifat gabungan, yaitu gabungan antara bahan matriks atau pengikat dengan penguat. Dari penggabungan tersebut akan menghasilkan material komposit yang mempunyai sifat mekanis dan karakteristik yang berbeda dari material

pembentuknya, sehingga dapat direncanakan suatu material komposit yang diinginkan. Pemakaian komposit memiliki keuntungan seperti memiliki sifat mekanik yang baik, tidak mudah korosif, dan menjadi bahan baku yg mudah diperoleh dengan harga murah (Widodo, 2008).

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 (*matriks*) 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, (PMC) *Polymer Matrix Composite*, (MMC) *Metal Matrix Composite*, dan (CMC) *Ceramic Matrix Composites* (Callister, 2007).

Material yang digunakan untuk membuat proyektil *frangible* pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

2.5.1 Stainless Steel 304L

Stainless steel (baja tahan karat) merupakan baja paduan yang mengandung unsur kromium sebesar 11% atau lebih. Sifat tahan karat pada baja ini diperoleh dari pembentukan lapisan tipis *chromium oxide* pada permukaan baja. Lapisan tipis oksida ini terbentuk karena adanya oksigen pada udara bebas. Elemen paduan lain yang ditambahkan pada baja tahan karat meliputi molibdenum, tembaga, titanium, aluminium, silikon, niobium, nitrogen, dan selenium. Komposisi karbon pada baja tahan karat berkisar antara 0.03% hingga lebih dari 1.0%. Komposisi karbon yang rendah pada baja tahan karat bertujuan untuk mengoptimalkan ketahanan korosi.

Stainless steel 304L merupakan baja tahan karat yang termasuk dalam *austenitic stainless steel*. Pada temperatur ruangan, SS 304L terdiri atas fasa *austenite* yang memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC).

Tabel 2.4 Sifat Fisik dan Mekanik Stainless Steel 304L

Sifat	Keterangan
Struktur Kristal	FCC
Densitas (g/cm ³)	8,0
Titik Leleh (°C)	1.535
Kekakuan (GPa)	200
Kekuatan Tarik (MPa)	540 - 750
<i>Yield Strength</i> (MPa)	230
Kekerasan (HRB)	80
Koefisien muai (10 ⁻⁶ m/K)	16,5

2.5.2 Poliamida 6

Poliamida merupakan polimer sintesis yang mengandung ikatan amida pada rantai karbonnya. Poliamida 6 merupakan polimer yang diperoleh dari *ring opening polymerization* dari *caprolactam* yang terdiri dari 6 atom karbon pada struktur sikliknya. Struktur ini disebut sebagai *poly(hexano-6-lactam)* atau poliamida 6. Polaritas pada grup amida dan tarikan (*attraction*) yang kuat antara rantai karbon menyebabkan poliamida 6 memiliki ketangguhan, kekuatan impak, ketahanan abrasi, dan ketahanan terhadap pelarut yang sangat baik. Poliamida 6 merupakan polimer berjenis thermoplastik dan memiliki struktur *semi crystalline*. Pada struktur *semi crystalline* ini, sebagian atom penyusun poliamida 6 tidak tersusun dalam struktur yang teratur. Dengan struktur semi kristalin, poliamida 6 memiliki ketahanan korosi dan pelarut

yang baik. Sifat lain yang diperoleh pada struktur semi kristalin adalah kemampuan untuk mempertahankan sifat mekanik pada temperatur yang melebihi temperatur transisi gelas (T_g).

Poliamida 6 memiliki *shrinkage* yang cukup tinggi (0,7 – 1,5%). *Shrinkage* yang cukup tinggi ini diakibatkan oleh struktur atom *semi kristalin* pada poliamida 6. Selain itu, poliamida 6 dapat menyerap air (*water absorption*) sebesar 1,6-1,9%. Hal lain yang menjadi kekurangan dari poliamida adalah ketahanan terhadap api (*fire resistance*). Berdasarkan sifat yang dimiliki, poliamida 6 banyak digunakan sebagai *bearing*, roda gigi, poros, *bushing*, *handle*, dan pelapis (*jacketing*) untuk kawat dan kabel. Adapun sifat poliamida 6 adalah sebagai berikut

Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Mekanik Poliamida 6

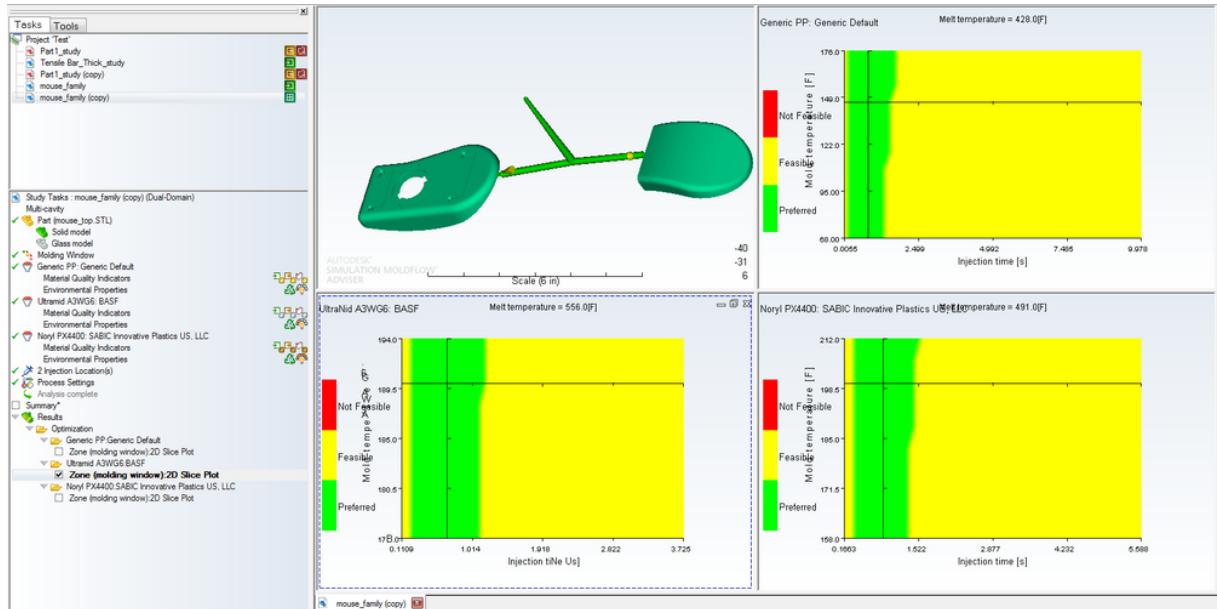
Sifat	Keterangan
Densitas (cm ³)	1,14
Kekakuan (GPa)	0,8-2,9
Kekuatan Tarik (MPa)	50-95
<i>Yield Strength</i> (MPa)	50-90
Pertambahan Panjang Saat Patah (%)	200-300
Temperatur Transisi Gelas (°C)	41
Temperatur Leleh (°C)	228

2.6 Autodesk Moldflow

Untuk memudahkan proses *injection molding*, software dapat digunakan untuk mensimulasikan proses *injection molding* yang sebenarnya. Software simulasi memungkinkan kita melihat cacat saat menjalankan simulasi, yang mempercepat proses pembuatan prototipe dengan lebih sedikit percobaan dan kesalahan, sehingga meningkatkan produktivitas produksi produk. Simulasi ini juga memungkinkan untuk secara akurat menentukan parameter yang tepat dari proses injeksi (Rosato dkk, 2000).

Salah satu software yang dapat digunakan untuk melakukan proses simulasi adalah *Autodesk Moldflow Adviser 2021*. Hasil dari software ini adalah parameter proses injeksi yang optimal untuk digunakan langsung pada mesin. Geometri produk, desain cetakan, dan jenis material digunakan sebagai input ke perangkat lunak sebelum proses pemodelan. Jenis material yang digunakan dapat dipilih dari database yang dimiliki oleh perangkat lunak atau dengan membuat database baru dengan data properti material sebagai input.

Setelah menentukan material injeksi, dapat dilakukan proses injeksi dengan melakukan beberapa simulasi yang dapat dilakukan pada *software* Autodesk Moldflow. “Molding Window” adalah salah satu simulasi yang dapat dilakukan Autodesk Moldflow untuk mendapatkan parameter proses injeksi optimal yang dapat digunakan. Simulasi lain yang dapat dilakukan menggunakan Autodesk Moldflow adalah “Fill”, “Pack”. 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 produk, *pressure drop* ketika proses injeksi, dan *weld lines* pada hasil produk. Berikut adalah salah satu contoh hasil analisa *molding window* pada *Autodesk Moldflow Adviser 2021*:



Gambar 2.4 Contoh Hasil Analisa *Molding Window* (Autodesk, 2018)

Hasil dari analisa ini akan menunjukkan 3 jenis kondisi ditampilkan dalam warna hijau, kuning, dan merah dengan kondisi yang paling baik adalah warna hijau. Penjelasan dari hasil yang didapatkan pada “Molding Window” dijelaskan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.6 Penjelasan Hasil *Molding Window* (Autodesk, 2019)

Hasil	Pengertian
Hijau	<ul style="list-style-type: none"> • Produk hasil injeksi tidak mengalami <i>short shot</i> • Tekanan injeksi yang dibutuhkan lebih besar dibanding 80% dari tekanan injeksi maksimum dari mesin • Temperatur material ketika mencapai titik tertentu 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 stress</i> di luar batas maksimum rekomendasi • Nilai <i>shear rate</i> di luar batas maksimum rekomendasi
Merah	<ul style="list-style-type: none"> • Produk hasil injeksi mengalami <i>short shot</i>, atau • Tekanan injeksi yang dibutuhkan lebih besar dibandingkan tekanan injeksi maksimum dari mesin

2.7 Optimasi Taguchi-Grey-Fuzzy

Metode *Taguchi-Grey-Fuzzy* adalah metode desain eksperimental untuk mendapatkan produk berkualitas tinggi dengan biaya rendah. Metode *Taguchi-Grey-Fuzzy* digunakan untuk meningkatkan kualitas produk dengan mengatur parameter proses yang dapat disebabkan oleh beberapa variasi parameter (Senthilkumar dkk, 2015). Namun, metode *Taguchi-Grey-Fuzzy* hanya tersedia untuk menyelesaikan desain eksperimental dalam satu respons. Metode relatif analisis abu-abu digunakan untuk menyelesaikan beberapa tanggapan secara bersamaan.

Berdasarkan menggunakan metode ini, koefisien abu-abu relatif dapat dirancang untuk menganalisis hubungan antara berbagai tanggapan. Logika fuzzy dapat digunakan untuk mengurangi kerancuan perhitungan untuk mendapatkan nilai keluaran yang lebih optimal. Ada beberapa langkah yang mengikuti metode *Taguchi-Grey-Fuzzy* (Sentilkumar dkk, 2015) :

2.7.1 Derajat Kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk memperoleh jumlah minimum percobaan yang harus dilakukan dalam menyelidiki faktor yang diamati, sehingga dapat membantu menentukan dan mendesain matriks ortogonal. Bentuk persamaan umum derajat kebebasan adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

- 1) Derajat kebebasan orthogonal array (VOA) untuk menentukan jumlah eksperimen yang diamati adalah:

$$VOA = \text{banyaknya eksperimen} - 1 \quad (2.4)$$

- 2) Derajat kebebasan faktor dan level (Vfl) untuk menghitung jumlah level yang harus diuji atau diadakan pengamatan pada sebuah faktor adalah sebagai berikut:

$$Vfl = \text{banyaknya level} - 1 \quad (2.5)$$

- 3) Untuk mengetahui derajat kebebasan dari sebuah matriks eksperimen atau total derajat kebebasan adalah:

$$\text{Total Vfl} = (\text{banyaknya faktor}) \cdot (Vfl) \quad (2.6)$$

2.7.2 Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal digunakan untuk menentukan jumlah minimum yang harus disimpan dalam percobaan. Ukuran matriks ortogonal ditentukan dengan membandingkan jumlah derajat kebebasan dengan percobaan. Ukuran matriks ortogonal harus lebih besar atau sama dengan jumlah derajat kebebasan eksperimental. Eksperimen yang menggunakan dua tingkat variabel proses yang sama memberikan satu derajat kebebasan. Jika eksperimen memiliki beberapa parameter proses, derajat kebebasan untuk setiap parameter proses harus dijumlahkan. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah variabel dengan jumlah eksperimen yang minimum yang dilambangkan dengan bentuk persamaan sebagai berikut $L_a(b^c)$ dengan L adalah rancangan bujur sangkar latin, a adalah jumlah baris eksperimen, b adalah jumlah level pada tiap faktor, dan c adalah jumlah faktor (Soejanto, 2009).

Tabel 2.7 Pemilihan Matriks Ortogonal (Soejanto, 2009).

2 Level	3 Level	4 Level	5 Level	Mixed Level
$L_{-4}(2^3)$	$L_{-9}(3^4)$	$L_{-16}(4^5)$	$L_{-25}(5^6)$	$L_{-18}(2^1 \times 3^7)$
$L_{-8}(2^7)$	$L_{-27}(3^{13})$	$L_{-64}(4^{21})$	-	$L_{-32}(2^1 \times 4^9)$
$L_{-12}(2^{11})$	$L_{-81}(3^{40})$	-	-	$L_{-36}(2^{11} \times 3^{12})$
$L_{-16}(2^{15})$	-	-	-	$L_{-36}(2^3 \times 3^{13})$
$L_{-32}(2^{31})$	-	-	-	$L_{-54}(2^1 \times 3^{25})$

2.7.3 Rasio Signal-to-Noise

Rasio signal-to-noise digunakan untuk menentukan penyimpangan kinerja dari nilai yang diinginkan. Sebelum menghitung rasio signal-to-noise, kita perlu menghitung fungsi loss. *Loss Function* adalah penyimpangan antara nilai eksperimental dan yang diinginkan.

Perhitungan fungsi kerugian jatuh ke dalam tiga kategori: Dengan kata lain, lebih sedikit lebih baik, lebih banyak lebih baik, dan bertujuan untuk nilai tertentu. Nilai loss function dipengaruhi oleh jumlah eksperimen (n) dan nilai setiap parameter proses (y) (Tarng dkk, 2000). Perumusan *loss function* dari kategori semakin kecil semakin baik adalah :

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

sedangkan untuk kategori semakin besar semakin baik adalah

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

dan untuk kategori tertuju pada nilai tertentu adalah

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

Perhitungan nilai rasio *signal to noise* dari nilai *loss function* dapat diperhitungkan dengan menggunakan rumus:

$$S/N = -10 \log L \quad (2.10)$$

Sebelum melakukan perhitungan *grey relational coefficient*, nilai *signal to ratio* yang telah didapatkan perlu dinormalisasi terlebih dahulu. Perhitungan untuk menormalisasi data bergantung kepada kategori respon tersebut yaitu semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik, dan tertuju pada nilai tertentu (Kumar, et al., 2019).

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). Adapapun 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
- $x_i^\circ(k)$ = nilai terbesar dari keseluruhan rasio S/N
- $x_i^\circ(k)$ = 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 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

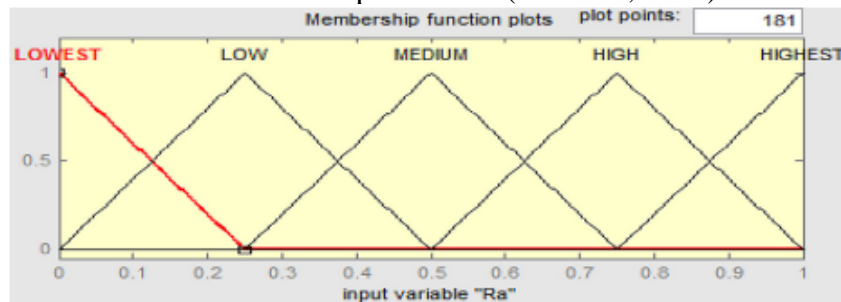
$$\Delta_{0,i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (2.15)$$

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

Ketidakpastian muncul pada hasil perhitungan yang diperoleh dengan menggunakan GRC. Untuk mengurangi ketidakpastian ini, perlu menguji dengan logika fuzzy yang disebut dengan *Gray Fuzzy Reasoning Grade*(GRFG). Optimasi logika fuzzy dibagi menjadi tiga bagian: fungsi keanggotaan, logika fuzzy, dan defugersasi. Pada langkah pertama, kita fudge nilai GRC yang diperoleh pada langkah sebelumnya menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan digunakan untuk menentukan bagaimana nilai input (GRC) dan output (GRFG) memetakan ke nilai antara 0 dan 1 pada kurva (Das et al, 2015).



Gambar 2.5 Ilustrasi Kurva Fungsi Keanggotaan (Das dkk, 2015)

Langkah selanjutnya adalah menentukan logika fuzzy yang digunakan. Logika fuzzy didefinisikan berdasarkan masukan dari fungsi keanggotaan terhadap keluaran keluaran. Logika fuzzy adalah urutan logika ifthen yang memiliki input

dan output sebanyak yang dibutuhkan. Misalnya, Anda memiliki logika fuzzy dengan 2 input dan 1 output.

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).

2.7.6 Analysis of Variance (ANOVA)

Analisis varians (ANOVA) dapat digunakan dalam eksperimen untuk menentukan kontribusi setiap parameter terhadap respon yang diteliti (Soepangkat & Pramujati, 2013). Perhitungan ANOVA didasarkan pada nilai GFRG yang diperoleh pada langkah sebelumnya. Perhitungan ANOVA terdiri dari derajat kebebasan (DF), jumlah kuadrat (SS), jumlah kuadrat rata-rata (MS), jumlah kuadrat sejati (SS'), dan persentase nilai kontribusi. Dari ANOVA, akan didapatkan nilai *p-value* dan persen kontribusi. Berdasarkan hasil dari *p-value*, dapat dilakukan uji hipotesis berdasarkan nilai *Confidence Interval* yang digunakan dengan melihat apabila nilai *p-value* yang didapatkan memiliki nilai lebih kecil dari nilai *confidence interval*, maka dapat dikatakan bahwa parameter yang diteliti berpengaruh terhadap respons percobaan. Persen kontribusi menyatakan besarnya pengaruh dari parameter yang diteliti terhadap respons percobaan.

Tabel 2.8 Perhitungan ANOVA

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

2.7.7 Eksperimen Konfirmasi

Setelah semua langkah selesai, selanjutnya harus memeriksa hasil perhitungan yang diperoleh. Untuk melakukan eksperimen konfirmasi, perlu menghitung rata-rata GFRG menggunakan nilai GFRG optimal yang diperoleh pada langkah sebelumnya (Soepangkat & Pramujati, 2013). Rumus untuk menghitung GFRG rata-rata adalah:

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

dimana γ_m = total rata-rata GFRG, $\hat{\gamma}_i$ = rata-rata GFRG optimal, dan i = banyaknya parameter proses pada eksperimen.

Untuk menentukan apakah eksperimen yang dilakukan valid, interval kepercayaan ditentukan untuk menentukan apakah eksperimen validasi berada dalam interval kepercayaan. Nilai interval kepercayaan dihitung menurut rumus (Blank, 1982) :

$$CI_C = \sqrt{F_{(\alpha;v_1;v_2)} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.17)$$

Dimana:

- $F_{(\alpha,1,df_E)}$ = Nilai F-ratio dari tabel
- α = Resiko, level kepercayaan = 0.05
- v_1 = 1
- v_2 = *Degrees of freedom error*
- MS_E = *Mean square error*
- n_{eff} = Banyaknya pengamatan efektif
- r = Jumlah sampel dalam percobaan konfirmasi

2.8 Penelitian Terdahulu

Lin, dkk (2021) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh dari parameter proses terhadap kebulatan dan konsentrisitas dari teleskop yang dibuat dengan proses injeksi. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* Moldflow dari Moldex3D. Material yang digunakan yaitu PA66. Untuk mengoptimasi parameter proses tersebut, digunakan desain eksperimen Taguchi. Hasil penelitian tersebut dituliskan pada **Tabel 2.9**

Tabel 2.9 Hasil Penelitian Lin, dkk (2021)

	Tekanan injeksi (MPa)	Tekanan penahan (MPa)	Temperatur leleh (°C)	Temperatur cetakan (°C)	Waktu pendinginan (s)
Level 1	180	180	275	70	11
Level 2	200	200	280	80	13
Level 3	220	220	285	90	15
Level 4	240	240	290	100	17
Urutan kontribusi terbesar	4	2	1	5	3

Ryu, dkk (2020) melakukan penelitian untuk meminimalisir *shrinkage* dan *warpage* pada material poliamida-6 dengan penguat serat gelas pada mesin injeksi dengan metode *microcellular foam*. Desain eksperimen pada penelitian tersebut dibuat dengan menggunakan metode ANOVA, Taguchi, dan RSM. Parameter yang dioptimasi pada penelitian tersebut adalah temperatur leleh, temperatur cetakan, waktu *packing*, waktu pendinginan, dan kandungan gas pada mesin injeksi. Hasil penelitian tersebut dituliskan pada **Tabel 2.10**.

Tabel 2.10 Hasil Penelitian Ryu, dkk (2020)

	Temperatur leleh (°C)	Temperatur cetakan (°C)	Waktu penahan (s)	Waktu pendinginan (s)	Kandungan Gas (%)
Level 1	240	60	0	20	0.2
Level 2	250	70	1	30	0.6
Level 3	260	80	2	40	1.0
Urutan kontribusi terbesar	2	1	5	4	3

Kc dkk, (2015) meneliti optimasi parameter proses cetak sistem injeksi dengan metode Taguchi untuk material 70% polipropilena dengan penguat 10% *glass fiber* dan 20% serat sisal. Parameter proses dari faktor (level) yang divariasikan adalah *injection pressure* (80 dan 90 bar), *melt temperature* (190, 200 dan 210 °C), *cetakan temperature* (40, 50 dan 60 °C), *holding pressure* (50, 60 dan 70 bar), *cooling time* (35, 40 dan 45 s) serta *hold time* (4, 6 dan 8 s). Rancangan eksperimen menggunakan *orthogonal array* L18, dengan respon yang diambil adalah *shrinkage*. Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk mengurangi terjadinya *shrinkage* dari produk yang dicetak. Hasil penelitian tersebut dapat diaplikasikan sebagai bahan pengganti untuk *interior* dan *eksterior* di bidang otomotif. Dari penelitian tersebut, didapatkan parameter tekanan injeksi dan temperatur cetakan merupakan parameter paling berpengaruh terhadap *shrinkage* pada produk. (Kc dkk, 2015)

Tabel 2.11 Parameter Optimal Injeksi pada Penelitian Kc dkk(2015)

Parameter	Level			Urutan Kontribusi
	1	2	3	
Tekanan injeksi (bar)	80	90	-	1
Temperatur leleh material (°C)	190	200	210	3
Temperatur cetakan (°C)	40	50	60	4
Tekanan holding (bar)	50	60	70	2
Waktu pendinginan (s)	35	40	45	6
Waktu holding (s)	4	6	8	5

Radhwan dkk, (2015) melakukan penelitian untuk mendapatkan optimasi nilai *shrinkage* pada proses *injection molding* dengan menggunakan metode *Taguchi* dan ANOVA. Pendekatan metode *Taguchi* diterapkan untuk optimalisasi parameter proses yang dipilih yaitu, *mold temperature*, *melt temperature*, *packing pressure*, *packing time*, and *cooling time*. Pada penelitian ini menggunakan aplikasi *Moldflow Plastic Insight (MPI)* untuk proses simulasi.

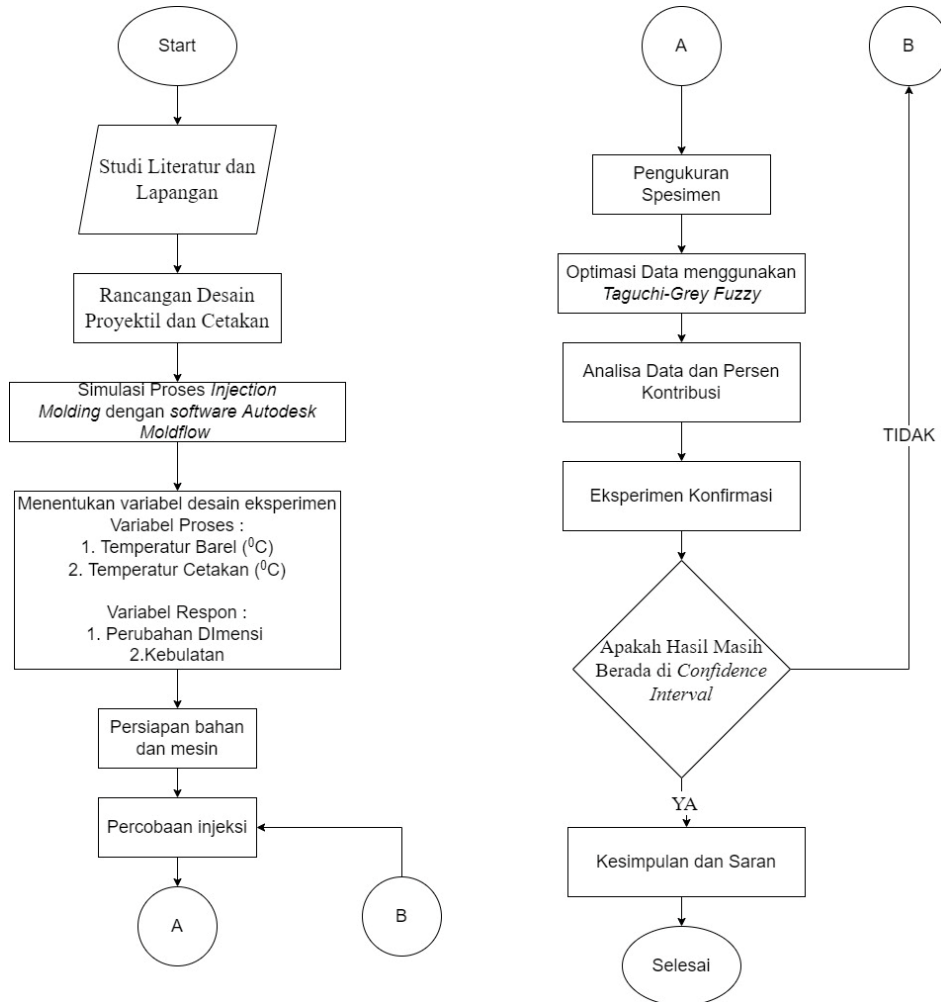
Tabel 2.12 Parameter Optimal Injeksi pada penelitian Radhwan dkk(2015)

Parameter	Level			Urutan Kontribusi
	1	2	3	
Melt Temperature (°C)	220	240	260	1
Mold Temperature (°C)	50	60	70	2
Tekanan <i>packing</i> (bar)	45	70	85	4
Waktu pendinginan (s)	50	55	60	3
Waktu <i>packing</i> (s)	2	2.5	2.8	5

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian dibuat untuk menggambarkan langkah kerja yang akan dilakukan pada penelitian ini. Tahap pengerjaan yang akan dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

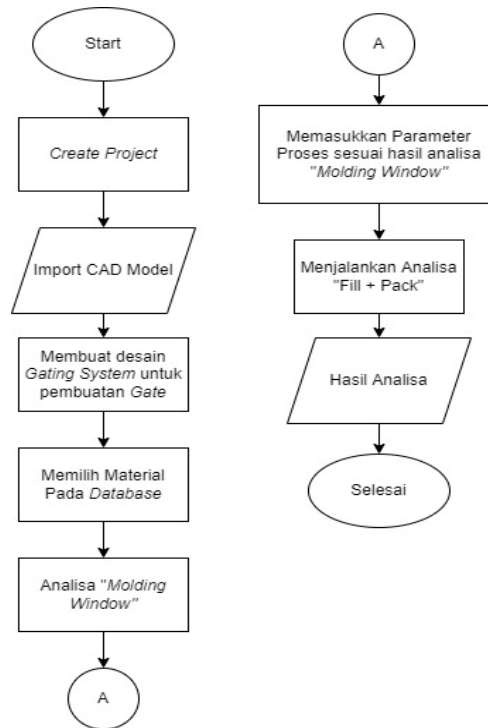
Tahapan pada penelitian kali ini dilakukan berdasarkan diagram alir sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.1. Adapun tahapan penelitiannya sebagai berikut :

3.2.1 Studi Literatur dan Lapangan

Studi literatur diperoleh dari beberapa sumber buku dan jurnal para peneliti terdahulu sebagai referensi penelitian yang akan dikembangkan. Sumber tersebut tentang spesifikasi projektil *frangible*, proses dari *injection molding*, pemahaman mengenai komposit, simulasi proses *injection molding* dengan Autodesk Moldflow, dan proses optimasi menggunakan Taguchi-Grey-Fuzzy. Studi lapangan dilakukan untuk memahami kondisi empiris dari proses eksperimen yang harus dilakukan sehingga dapat meminimalisir permasalahan yang muncul selama berlangsungnya penelitian. Contoh studi lapangan adalah studi tentang alur kerja mesin injeksi.

3.2.2 Simulasi Proses Injeksi dengan *Software* Autodesk Moldflow

Proses simulasi dilakukan untuk mendapatkan parameter proses awal yang akan dimasukkan ke dalam mesin injeksi serta nilai parameter konstan yang akan digunakan pada mesin injeksi, dan juga sebagai referensi pembuatan variasi pada desain eksperimen. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter optimal dengan nilai *quality predicition* sebagai referensi utama. Proses simulasi dilakukan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.2 :

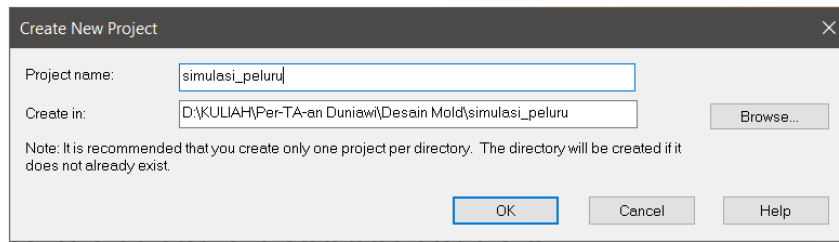


Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Simulasi Autodesk Moldflow

Berikut merupakan alur pengerjaan dalam menggunakan *software Autodesk Moldflow Adviser 2021*:

1. *Create Project*

Langkah awal untuk menggunakan *software* ini adalah dengan membuat file *project* dari simulasi ini. *Project* tersebut nantinya akan berisi berbagai analisa yang dilakukan dalam *project* tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.3.



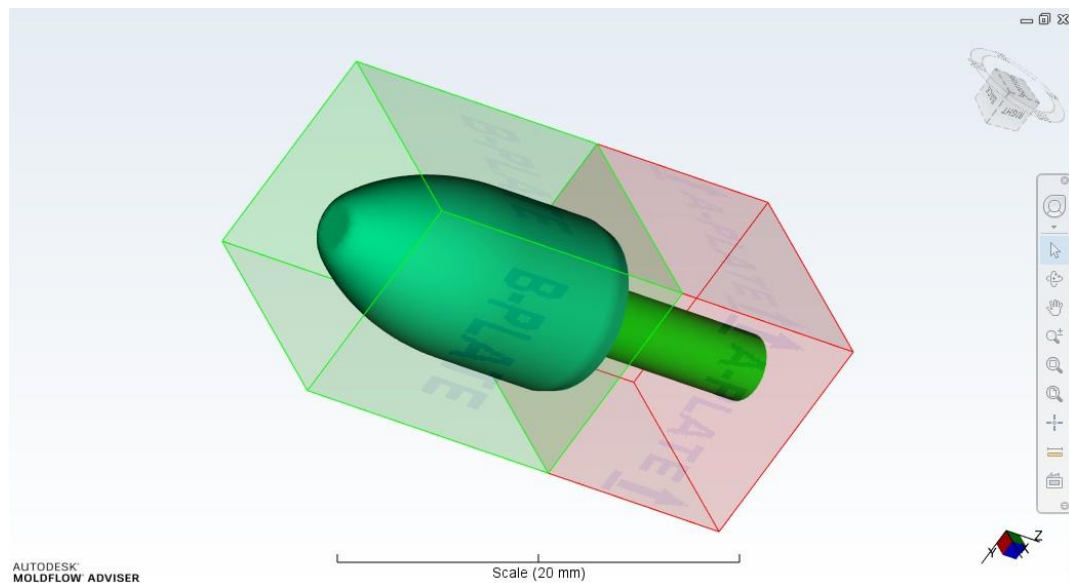
Gambar 3.3 Pemberian Nama *File Project*

2. *Import CAD Model*

Pada tahapan ini desain proyektil menggunakan desain proyektil kaliber 9mm. Setelah dimasukkan kedalam *software*, *software* tersebut akan melakukan *meshing* secara otomatis dan melakukan perbaikan jika terdapat kesalahan pada model desain proyektil.

3. *Pembuatan Desain Gate*

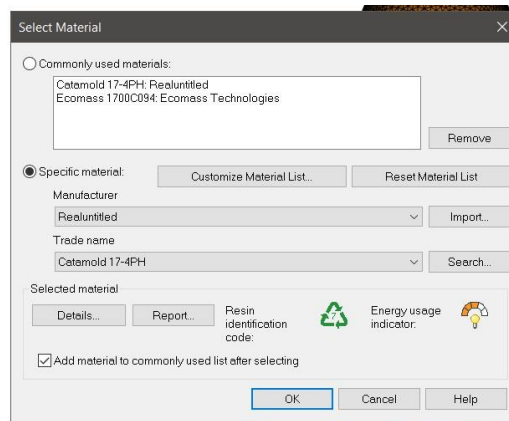
Pada tahap awal pembuatan *Gate*, Pilihan untuk mengatur *Gating System* dapat ditemukan pada menu “Geometry”. Ukuran cetakan harus ditentukan terlebih dahulu beserta posisi dari *parting line*. Dimensi dari cetakan beserta *gating system* dapat dibuat sesuai dengan cetakan yang akan digunakan. Berikut adalah pembuatan *gating system* ditunjukkan pada Gambar 3.4:



Gambar 3.4 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” untuk membuka database material yang dimiliki oleh *software*. Pada *database* tersebut, material “BASF: *Catamold 17-4 PH*” dipilih.



Gambar 3.5 Pemilihan Material pada Database dalam *Software*

5. Analisa Molding Window

Analisa *molding window* dilakukan untuk mendapatkan parameter proses injeksi yang baik untuk digunakan. Hasil analisa yang didapatkan dari analisa ini adalah parameter proses temperatur cetakan, temperatur leleh, dan waktu injeksi. Nilai yang didapatkan dari hasil analisa dapat digunakan untuk analisa selanjutnya.

6. Analisa “Fill+Pack”

Nilai parameter yang di *input* pada analisa “Fill+Pack” adalah temperatur cetakan, temperatur leleh, dan waktu injeksi yang telah didapatkan dari analisa “Molding Window”. Analisis “Fill + Pack” dilakukan untuk mendapatkan parameter proses seperti tekanan injeksi, gaya tekan, volume material yang diinjeksikan, waktu pendinginan, dan waktu *holding*. Untuk tekanan maksimum injeksi didapatkan dari kapasitas tekanan maksimum mesin yang akan digunakan. Nilai-nilai yang telah didapatkan dari analisis ini dapat dijadikan referensi untuk nilai-nilai variabel proses dan konstan dari eksperimen.

3.2.3 Desain Eksperimen

Untuk menentukan jumlah eksperimen dan variasi yang perlu dilakukan untuk mengoptimasi parameter proses injeksi, perlu dilakukan desain eksperimen dengan harapan mendapatkan nilai variabel respons yang baik. Ada pun desain eksperimen dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Ekperimen Penentuan Parameter Proses untuk Eksperimen Data

Hasil simulasi pada tahap sebelumnya, terdapat perbedaan spesifikasi dan komposisi material berbeda dengan material yang akan digunakan pada eksperimen ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Perbandingan Material BASF: Catamold 17-4PH dan 90% *Stainless Steel* 304L + 10% PA-6

	BASF: Catamold 17-4PH (Moldflow)	90% <i>Stainless Steel</i> 304L + 10% PA-6 (Studi Literatur)
Titik leleh material (°C) (Setup Temperature Barrel)	201,1	220 (BASF, 2021)
Rekomendasi temperatur cetakan (°C)	115	65 – 93 (Rosato et al., 2000)

Tabel 3.2 Perbandingan Komposisi *Stainless Steel* BASF: Catamold 17-4PH dan *Stainless Steel* 304L

Komponen (%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Nb	Fe
BASF: Catamold 17-4PH	≤ 0,07	≤ 1	≤ 1	15 – 17,5	3 – 5	-	-	0,15 – 0,45	<i>Bal.</i>
<i>Stainless Steel</i> 304L	≤ 0,03	≤ 1,0	≤ 2,0	18,0 – 20,0	9,0 - 12,0	≤ 0,03	≤ 0,045	-	<i>Bal.</i>

Berdasarkan perbedaan dari *properties* material pada *database software* dengan material yang digunakan pada eksperimen, sehingga diperlukan eksperimen tambahan untuk mendapatkan nilai parameter proses injeksi proyektile. Pada Tabel 3.3 dapat dilihat rancangan eksperimen untuk mendapatkan parameter proses injeksi.

Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen Penentuan Parameter Injeksi yang akan Digunakan

Tekanan Injeksi (MPa)	Tekanan Holding (MPa)	Temperatur Leleh (°C)	Temperatur Cetakan (°C)
9	8	230	60
9	8	230	70
9	8	230	80
9	8	230	90
9	8	240	60
9	8	240	70
9	8	240	80
9	8	240	90

Rancangan eksperimen diatas mempertimbangkan spesifikasi maksimal mesin injeksi. Tekanan maksimal pada mesin injeksi yaitu 10 MPa dengan tekanan transisi maksimal ke proses *holding* sebesar 2 MPa. Maka tekanan injeksi sebesar 10 MPa digunakan sebagai tekanan injeksi terbesar dan tekanan *holding* sebesar 8 MPa digunakan sebagai tekanan *holding* terendah. Tekanan pada eksperimen penentuan parameter injeksi menggunakan tekanan terendah atau mengambil batas bawah spesifikasi mesin sesuai rancangan eksperimen pengambilan data penelitian, yaitu tekanan injeksi sebesar 9 MPa dan tekanan *holding* sebesar 8 MPa.

Temperatur leleh material dinaikkan sebesar 10 °C dari titik leleh material yaitu sebesar 230 °C agar material meleleh secara keseluruhan sehingga proses injeksi dapat dilakukan dengan lancar. Temperatur cetakan terendah yang digunakan sebesar 60 °C dan naik bertahap sebesar 10 °C sampai 90 °C berdasarkan rekomendasi temperatur.

2. Menentukan Variabel Penelitian

Tabel 3.4 Variabel Proses dan Level yang Digunakan

No.	Variabel Proses	Level 1	Level 2	Level 3
1.	Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	230	240	250
2.	Temperatur Cetakan (°C)	80	90	100

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 3.5:

Tabel 3.5 Variabel Konstan

Variabel Konstan	Nilai
Tekanan Injeksi (MPa)	9
Tekanan <i> Holding</i> (MPa)	9
Waktu Holding (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 .

3. Menentukan Derajat Kebebasan

Penentuan derajat kebebasan dilakukan untuk mendapatkan ukuran matriks ortogonal eksperimen yang digunakan. Berikut adalah derajat kebebasan eksperimen ditampilkan pada **Tabel 3.6**.

Tabel 3.6 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 3.7 berikut :

Tabel 3.7 Desain Eksperimen Berdasarkan Matriks Ortogonal

Variabel Proses		Variabel Respons	
Temperatur Barrel (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
230	80		
	90		
	100		
240	80		
	90		
	100		
250	80		
	90		
	100		

3.2.4 Persiapan Mesin dan Bahan

Dalam melakukan eksperimen, mesin dan bahan yang diperlukan harus dipersiapkan terlebih dahulu. Bahan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *feedstock* dengan komposisi 90% Stainless Steel 304L dan 10% PA-6 yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya. *Feedstock* digunakan sebagai material yang diinjeksikan pada mesin.

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.



Gambar 3.6 Mesin Kompaksi

2. Mikrometer Sekrup

Untuk mengetahui perubahan dimensi pada spesimen diperlukan alat untuk mengukur dimensi. Digunakan mikrometer sekrup untuk mendapatkan nilai pengurangan 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.



Gambar 3.7 Mikrometer Sekrup yang Digunakan

3. Alat Ukur Kebulatan

Untuk mengukur kebulatan dari spesimen, perlu menggunakan alat yang sesuai. *V-block* dan *dial indicator* yang digunakan pada eksperimen ini terdapat di *workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS. Cara menggunakan alat tersebut yaitu pertama, spesimen diletakan pada *v-block* Kemudian, ujung dari *dial indicator* diletakan pada badan proyektil. Spesimen diputar secara perlahan sehingga *dial indicator* akan mendeteksi jika ada perubahan dimensi pada spesimen.



Gambar 3.8 V-block dan Dial Indicator yang Digunakan

3.2.5 Proses Injeksi Spesimen

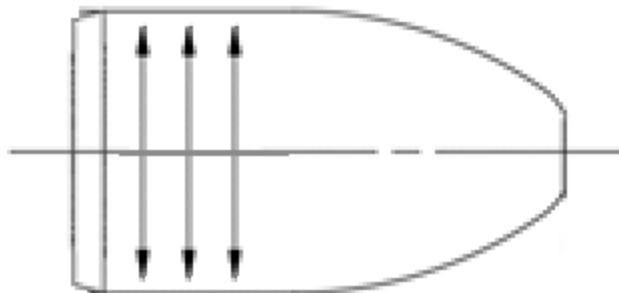
Proses injeksi dilakukan setelah proses persiapan mesin dan bahan telah selesai. Bahan baku yang disiapkan dimasukkan ke dalam mesin injeksi dan temperatur barrel dan cetakan telah disetel sebelumnya sesuai dengan nilai parameter yang telah ditentukan. Setelah membaca nilai suhu yang diinginkan dengan termokopel yang disertakan dalam mesin, injeksi dapat dilakukan. Jumlah total injeksi adalah 27 kali sesuai dengan desain eksperimen yang dilakukan sebelumnya. Bentuk cetakan yang digunakan sesuai dengan bentuk proyektil kaliber 9mm.

3.2.6 Pengukuran Spesimen

Spesimen 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 kebulatan.

1. Perubahan Dimensi

Sebelum semua spesimen diukur, spesimen didiamkan terlebih dahulu selama 7 hari pada suhu ruangan. Hal ini dilakukan agar *stress* yang terjadi pada spesimen berkurang sehingga tidak lagi mempengaruhi dimensi spesimen. Pengukuran dilakukan menggunakan mikrometer sekrup.

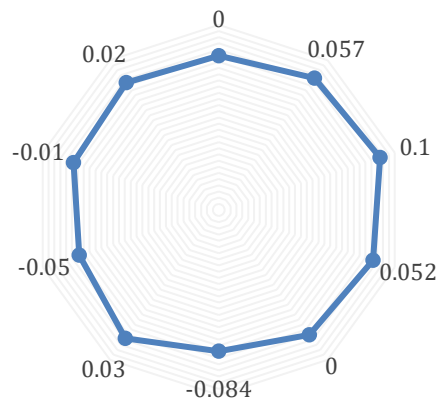


Gambar 3.9 Titik Pengukuran Perubahan Dimensi pada Spesimen

Nilai perubahan dimensi didapatkan dengan melakukan perbandingan antara dimensi cetakan dengan dimensi hasil pengukuran. Adapun rumus yang digunakan adalah rumus (2.2). Pada penelitian ini, perbandingan dilakukan pada diameter badan proyektil (L) seperti pada Gambar 3.9 sehingga nilai diameter badan proyektil pada cetakan dibandingkan dengan diameter badan proyektil pada spesimen.

2. Kebulatan

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. Pengukuran kebulatan dilakukan pada titik yang sama dengan letak pengukuran perubahan dimensi. Pengukuran kebulatan akan dilakukan di titik yang sama dengan letak pengukuran perubahan dimensi yaitu pada badan peluru. Pengukuran pada kebulatan produk juga akan dilakukan di 3 titik di sepanjang badan peluru seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.9. Nilai defleksi kebulatan akan diukur pada setiap 36° sehingga akan menghasilkan 10 titik defleksi kebulatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Skema Pengukuran dengan Metode MZC (Sui & Zhang, 2012)

3.2.7 Pengambilan Data Eksperimen

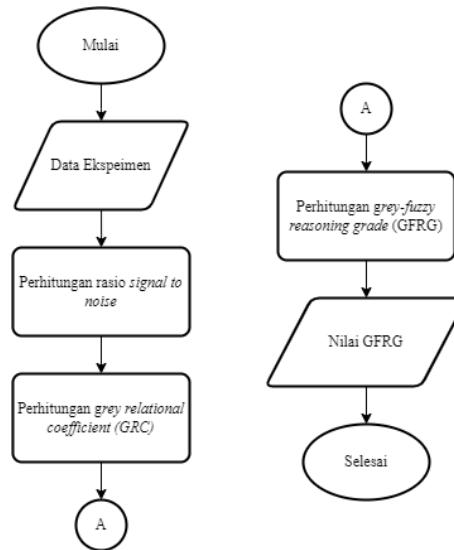
Data perubahan dimensi dan kebulatan yang didapatkan dari hasil pengujian merupakan data variabel respons pada eksperimen. Pada penelitian ini terdapat 2 kali replikasi, maka terdapat 3 nilai dari masing-masing respons. Penyajian data respons disajikan sebagaimana **Tabel 3.8** berikut.

Tabel 3.8 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 adalah sebagai berikut.



Gambar 3.11 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-the-better* yaitu semakin kecil nilai semakin baik sehingga digunakan perumusan (2.7). Setelah perhitungan *loss function*, dapat menghitung rasio *signal to noise* dengan perumusan (2.10).

Tabel 3.9 Nilai Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N

Eksperimen	Rasio S/N		Normalisasi Rasio S/N	
	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
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 perumusan (2.15). Perhitungan GRC dilakukan menggunakan perumusan (2.14).

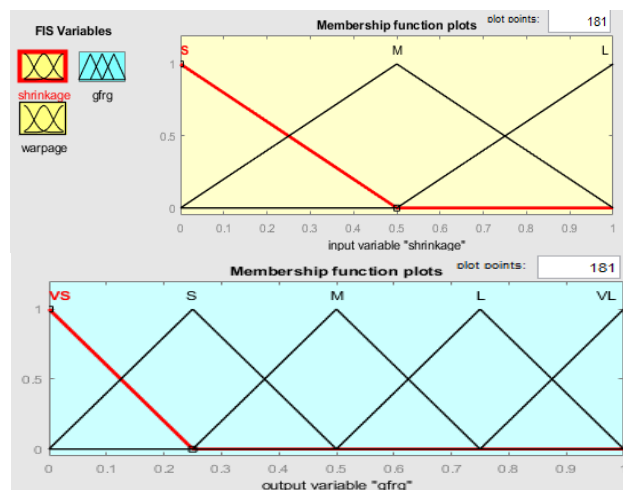
Tabel 3.10 Nilai *Deviation Sequence* dan GRC

Eksperimen	<i>Deviation Sequence</i>		GRC	
	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
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.

Untuk menggabungkan kedua hasil GRC dari perubahan dimensi dan kebulatan, digunakan metode Fuzzy agar didapatkan hasil yang lebih akurat. Perhitungan Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG) dilakukan dengan bantuan *software* MATLAB menggunakan Fuzzy Logic Toolbox. Tahap awal GFRG adalah melakukan fungsi keanggotaan dengan mengelompokkan fungsi keanggotaan dari GRC yang akan dimasukkan dan GFRG yang akan dihasilkan dari logika fuzzy. Fungsi keanggotaan dari GRC yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *small* (S), *medium* (M), dan *large* (L). Sedangkan untuk fungsi keanggotaan GFRG pada penelitian ini adalah *very small* (VS), *small* (S), *medium* (M), *large* (L), dan *very large* (VL). Fungsi keanggotaan pada penelitian ini menggunakan bentuk segitiga seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.12



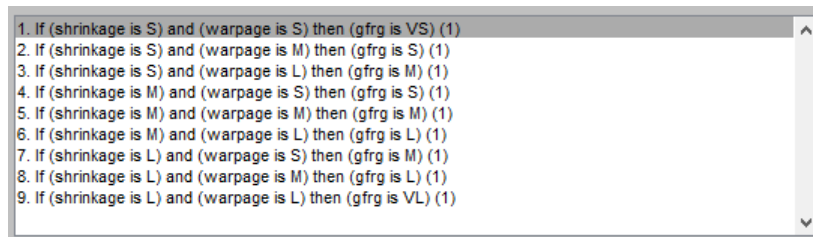
Gambar 3.12 Bentuk Fungsi Keanggotaan

Penggambaran fungsi keanggotaan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 3.11 Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy

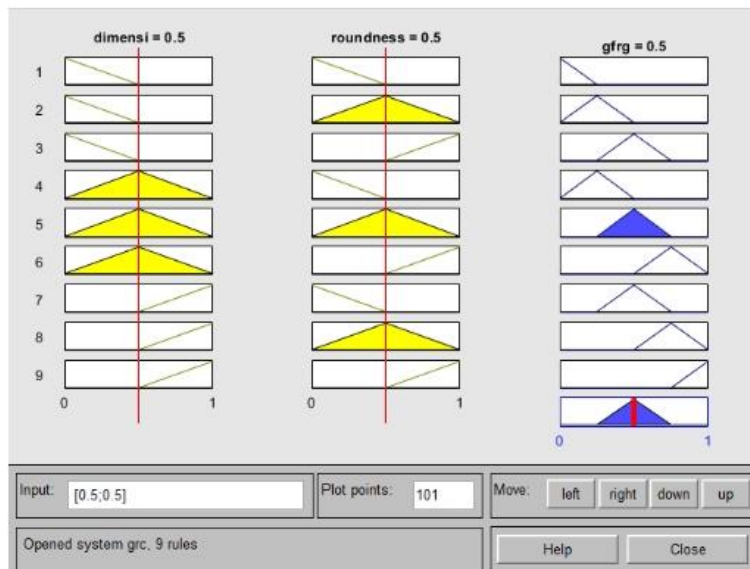
		GRC Perubahan Dimensi		
		S	M	L
GRC kebulatan	S	VS	S	M
	M	S	M	L
	L	M	L	M

Selanjutnya dibuat logika fuzzy setelah menentukan fungsi keanggotaan dan sesuai dengan fungsi keanggotaan yang telah dibuat. Logika fuzzy akan digunakan pada perhitungan GFRG sesuai nilai input yang telah didapatkan dari perhitungan GRC. Contoh logika fuzzy yang akan digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.13:



Gambar 3.13 Pengelompokkan Logika Fuzzy

Setelah mengelompokkan logika fuzzy, dapat dilakukan perhitungan GFRG dengan menggunakan *software* MATLAB. Nilai GRC dari kedua variabel respon dimasukkan kedalam logika fuzzy sehingga menghasilkan nilai GFRG, seperti contoh perhitungan GFRG pada *software* MATLAB menggunakan data eksperimen ke-1 ditunjukkan pada Gambar 3.14:



Gambar 3.14 Perhitungan GFRG Pada *Software* MATLAB

3.2.9 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 2.7. Hasil perhitungan ANOVA ditunjukkan pada Tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.12 Perhitungan ANOVA

Parameter	DF	SS	MS	SS'	Kontribusi (%)
Temperatur <i>barrel</i> (°C)
Temperatur cetakan (°C)
Error
Total	...				100%

3.2.10 Eksperimen Konfirmasi

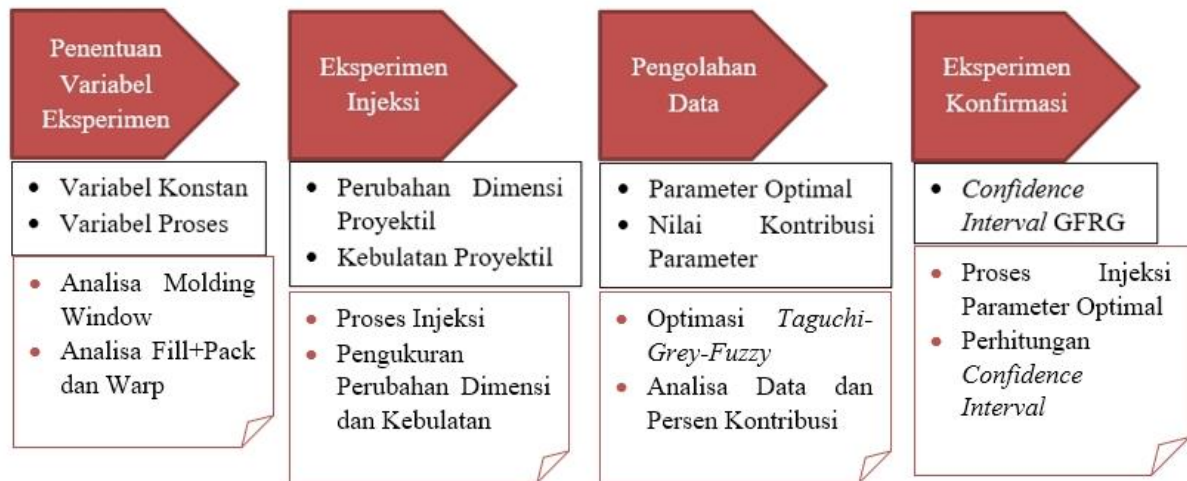
Setelah mendapatkan nilai parameter proses optimal, perlu dilakukan konfirmasi untuk mengetahui apakah perhitungan sudah dilakukan dengan tepat. Dilakukan sebanyak 4 kali eksperimen konfirmasi. Hasil dari eksperimen konfirmasi dibandingkan nilai rata-rata GFRG dengan interval keyakinan GFRG prediksi.

3.2.11 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 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

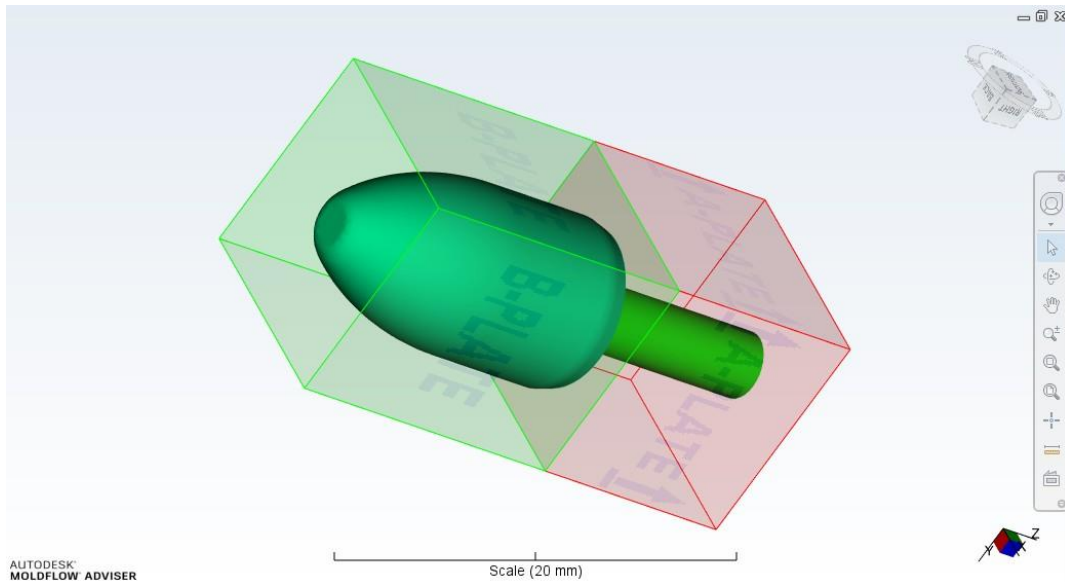
Penelitian ini memiliki 4 tahapan utama untuk mengoptimasi parameter temperatur cetakan dan temperatur barrel. Tahapan pertama adalah penentuan variabel eksperimen yang dilakukan dengan simulasi menggunakan *Autodesk Moldflow Adviser 2021*. Tahapan kedua adalah eksperimen injeksi, eksperimen ini menggunakan variabel eksperimen yang didapatkan dari hasil simulasi pada tahap sebelumnya. Pada tahap ini akan didapatkan nilai variabel respons yaitu nilai perubahan dimensi dan kebulatan dari proyektil. Tahapan ketiga adalah pengolahan data dari variabel respons yang telah didapatkan dengan menggunakan metode *Taguchi-Grey-Fuzzy*, pada tahapan ini akan didapatkan nilai parameter optimal dari temperatur cetakan dan temperatur barrel. Data eksperimen juga diolah dengan menggunakan ANOVA untuk diketahui kontribusi dari masing-masing parameter proses terhadap kedua variabel proses. Tahapan terakhir adalah eksperimen konfirmasi yang berfungsi untuk membuktikan bahwa nilai parameter yang telah dioptimasi adalah benar. Berikut adalah tahapan utama pada penelitian ini:



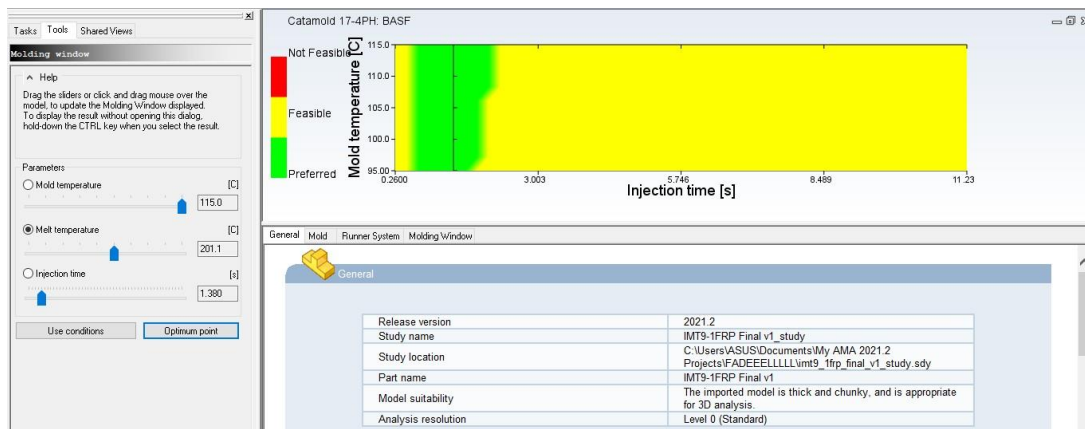
Gambar 4.1 Tahapan Utama Penelitian

4.1 Penentuan Variabel Eksperimen dengan *Autodesk Moldflow Adviser 2021*

Penentuan variabel eksperimen pada penelitian ini akan ditentukan dengan menggunakan simulasi *Autodesk Moldflow Adviser 2021* dengan mengambil referensi pada *quality prediction* dengan keterangan *high*. Langkah awal untuk melakukan simulasi yaitu membuat *gate* cetakan yang ditunjukkan pada gambar 4.2 (a). Selanjutnya melakukan analisis “*Molding Window*” untuk mendapatkan parameter proses injeksi optimal dengan memilih material “BASF: *Catamold 17-4 PH*”. Hasil analisis “*Molding Window*” dapat dilihat pada gambar 4.2 (b).



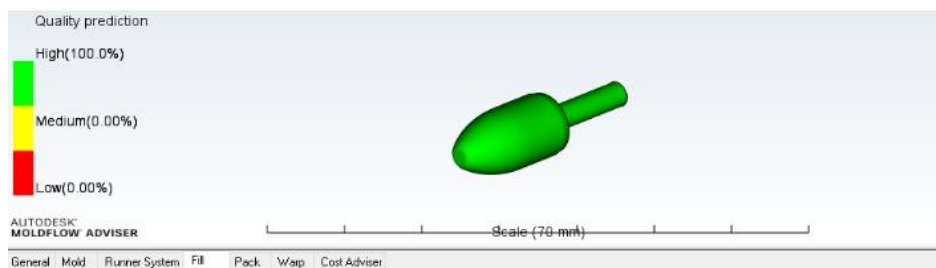
(a)



(b)

Gambar 4.2 (a) Pembuatan Gate dan (b) Hasil Analisis pada *Molding Window* pada *Autodesk Moldflow 2021*

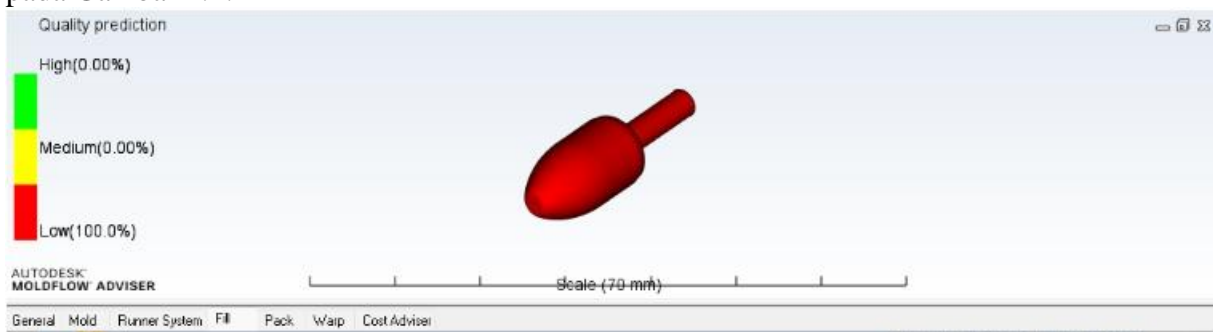
Hasil parameter dari analisis *molding window* pada *optimum point* didapatkan temperatur cetakan 115°C , temperatur leleh $201,1^{\circ}\text{C}$, dan waktu injeksi 1,380 detik. Selanjutnya parameter yang telah didapatkan akan digunakan pada analisa *Fill* untuk mendapatkan *quality prediction* hasil injeksi. Berikut merupakan hasil analisis *Fill* pada Gambar 4.3:



Gambar 4.3 Hasil *Quality Prediction* dengan Parameter Hasil Analisis *Molding Window*

Hasil analisis “Fill” menunjukkan nilai *high quality prediction* sebesar 100%. Nilai parameter yang didapatkan dari hasil simulasi akan digunakan pada eksperimen penelitian. Namun parameter yang didapatkan dari simulasi menggunakan material yang berbeda dengan material yang akan digunakan pada eksperimen, sehingga temperatur leleh dan temperatur cetakan material berbeda. Material yang digunakan pada eksperimen merupakan campuran 90% *stainless steel* 304L dengan 10% PA-6, sedangkan material pada simulasi merupakan 90% serbuk *stainless steel* dengan sisa 10% yang tidak diketahui materialnya. Perlu dilakukan simulasi lebih lanjut untuk mencari parameter optimal baru dengan mempertimbangkan sifat material yang digunakan pada eksperimen. Perbandingan material pada simulasi dengan material yang digunakan pada eksperimen dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Berdasarkan Tabel 3.1, simulasi lanjutan dilakukan dengan nilai temperatur leleh material sebesar 220 °C dan temperatur cetakan sebesar 65 °C berdasarkan rekomendasi temperatur yang didapatkan dari beberapa sumber literatur. Hasil analisis “Fill” dapat dilihat pada Gambar 4.4:



Gambar 4.4 Hasil *Quality Prediction* dengan Menggunakan Paramter Rekomendasi Temperatur.

Hasil *quality prediction* pada analisis diatas menunjukkan *low quality prediction* sebesar 100% sehingga eksperimen menggunakan parameter rekomendasi tersebut tidak dapat digunakan. Hasil analisis *fill* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Analisis *Fill* Menggunakan Autodesk Moldflow Adviser 2021

Temperatur Leleh (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Quality Prediction	Tekanan Injeksi Aktual	Analisis
201,1	115	High 100%	4,811 MPa	Temperatur leleh dan cetakan tidak dapat diaplikasikan pada material eksperimen
220	60	Low 100%	4,688 MPa	Nilai <i>quality prediction</i> yang sangat rendah.

Berdasarkan rancangan eksperimen pada Tabel 3.3, eksperimen penentuan parameter injeksi didapatkan parameter dengan temperatur leleh material sebesar 240 °C dan temperatur cetakan sebesar 90°C yang menghasilkan proyektil terbaik. Pada eksperimen menggunakan temperatur leleh material sebesar 230 °C, proyektil yang dihasilkan mengalami kecacatan pada bagian *nose*. Pada saat menggunakan temperatur cetakan sebesar 60 °C – 70 °C, proyektil yang

dihasilkan juga tidak sempurna. Terdapat kecacatan pada bagian *nose* proyektil dan *flash* yang berlebih. Beberapa proyektil yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 (a) Temperatur Leleh 230 °C, Temperatur Cetakan 60 °C. (b) Temperatur Leleh 230 °C, Temperatur Cetakan 70 °C. (c) Temperatur Leleh 240 °C, Temperatur Cetakan 70 °C. (d) Temperatur Leleh 240 °C, Temperatur Cetakan 90 °C.

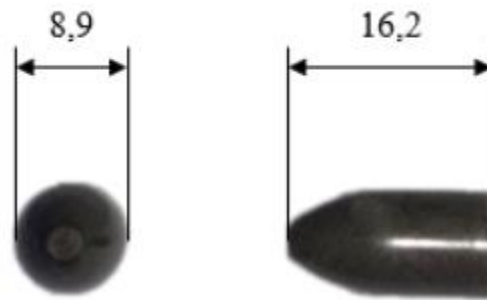
Berdasarkan eksperimen penentuan parameter injeksi, temperatur leleh material yang didapatkan sebesar 240 °C dan temperatur cetakan sebesar 90 °C yang akan digunakan sebagai titik tengah variasi pada eksperimen penelitian ini. Berdasarkan penelitian yang berjalan paralel didapatkan parameter tekanan injeksi dan tekanan penahan optimal dengan material 90% *Stainless Steel* 304L + 10% PA-6 yaitu 9 MPa dan 9 MPa dan keseluruhan variabel yang akan digunakan pada eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil Penentuan Variabel Eksperimen

Parameter Injeksi				
	Temperatur Barrel (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Tekanan Injeksi (MPa)	Tekanan <i> Holding</i> (MPa)
Level 1	230	80	9	9
Level 2	240	90		
Level 3	250	100		

4.2 Pelaksanaan Eksperimen Injeksi

Proses injeksi dilakukan dengan mesin *injection molding* yang terdapat pada *workshop* rekayasa material dan teknologi pertahanan. Material yang digunakan adalah *feedstock* dengan komposisi 90wt% *Stainless Steel* 304L/PA-6. Contoh dari hasil proses injeksi yang dihasilkan pada eksperimen ini ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Proyektil *Frangible* Hasil Proses Injeksi (milimeter)

4.2.1 Data Respon Percobaan

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen sebanyak 9 kali eksperimen dengan jumlah replikasi sebanyak 2 kali dari masing-masing eksperimen sehingga total eksperimen yang akan dilakukan sebanyak 27 kali proses injeksi. Setelah melakukan semua eksperimen tersebut, didapatkan hasil seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.2

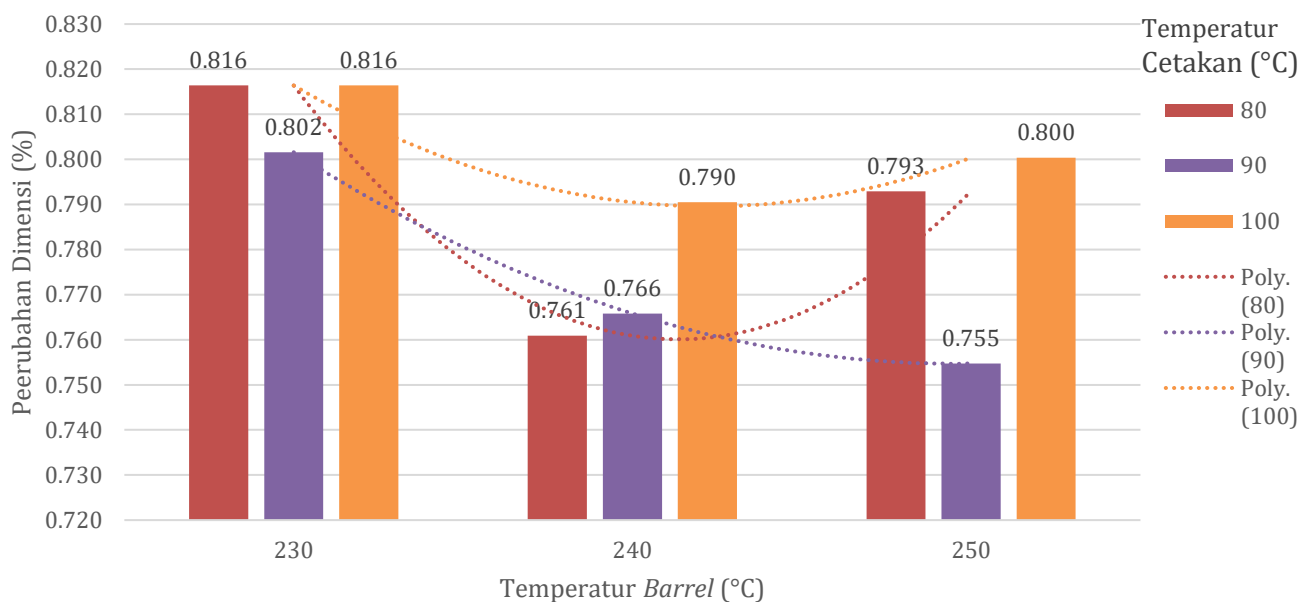
Tabel 4.3 Hasil Eksperimen

Variabel Proses		Variabel Respons					
Temperatur Barrel (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	Perubahan Dimensi (%)			Kebulatan (mm)		
230	80	0.8470	0.8180	0.7840	0.0973	0.0720	0.1093
	90	0.7880	0.7360	0.8810	0.1000	0.0840	0.0960
	100	0.8510	0.7580	0.8400	0.0653	0.0813	0.0706
240	80	0.7400	0.7580	0.7840	0.1093	0.1320	0.0933
	90	0.7840	0.6990	0.8140	0.0813	0.0986	0.1013
	100	0.7100	0.8100	0.8510	0.0840	0.0853	0.0706
250	80	0.8210	0.7920	0.7660	0.0853	0.1440	0.1106
	90	0.7290	0.7360	0.7990	0.0986	0.1200	0.0746
	100	0.8320	0.7210	0.8470	0.1000	0.1080	0.1386

4.2.2 Pengaruh Temperatur Barrel Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan

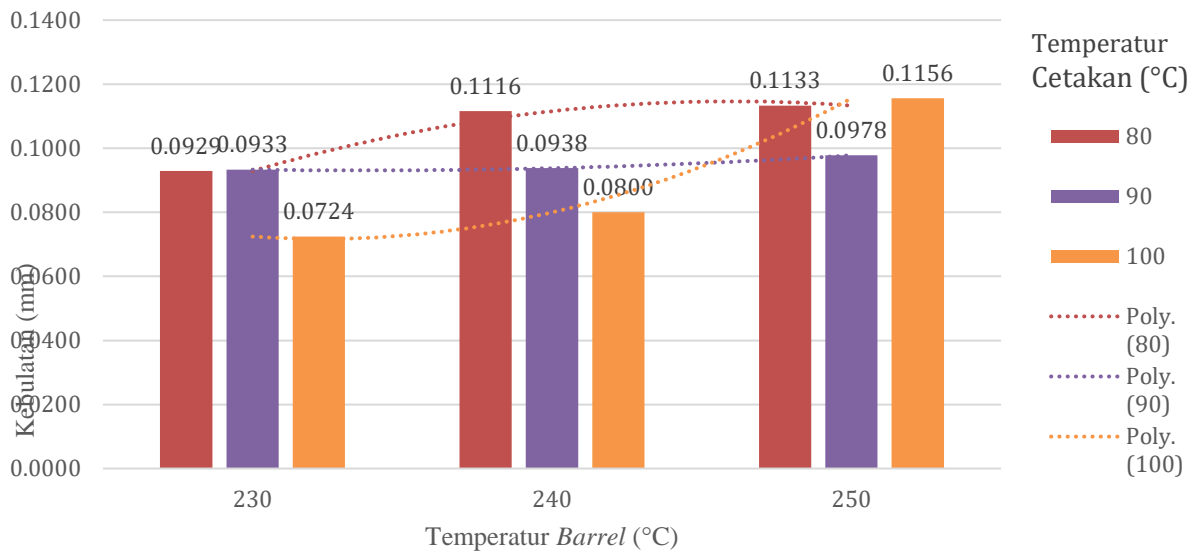
Grafik pengaruh temperatur barrel terhadap perubahan dimensi dapat dilihat pada Gambar 4.7. Secara keseluruhan perubahan dimensi memiliki variabel respon yang tidak konsisten. Pada temperatur cetakan 80°C, nilai perubahan dimensi ada pada 0.816% dengan temperatur barrel 230°C dan mengalami penurunan pada temperatur barrel 240°C dengan nilai 0.761% dan naik kembali pada temperatur barrel 250°C dengan nilai 0.793%. Hal yang sama terjadi pada temperatur cetakan 100°C dengan temperatur barrel 230°C, 240°C, dan 250°C. Namun hal ini tidak terjadi pada temperatur barrel 250°C dan temperatur

cetakan 90°C dengan nilai perubahan dimensi mengalami penurunan, pada temperatur barrel 240°C dan temperatur cetakan 90°C, perubahan dimensi bernilai 0,766% dan temperatur barrel 250°C dan temperatur cetakan 90°C, perubahan dimensi bernilai 0,755%, dimana hal ini diakibatkan oleh fluktuasi temperatur pada *heater* barrel yang tidak stabil yang ada kemungkinan pada saat proses injeksi temperatur mengalami penurunan yang mengakibatkan nilai perubahan dimensi juga menurun. Pada temperatur barrel 230°C memiliki nilai perubahan dimensi yang tinggi dikarenakan temperatur tersebut terlalu rendah sehingga material lebih sulit untuk diinjeksikan dikarenakan viskositas material yang tinggi.



Gambar 4.7 Pengaruh Temperatur Barrel dan Temperatur Cetakan terhadap Perubahan Dimensi

Grafik pengaruh temperatur barrel terhadap kebulatan dapat dilihat pada Gambar 4.8. Berdasarkan grafik secara keseluruhan, nilai kebulatan mengalami kenaikan seiring dengan naiknya nilai temperatur barrel. Pada temperatur cetakan 80°C, nilai kebulatan naik mulai dari 0.0929 mm pada temperatur barrel 230°C hingga nilai kebulatan 0.1133 mm pada temperatur barrel 0.1133 mm. Pada temperatur cetakan 90°C, nilai kebulatan mengalami kenaikan mulai dari 0.0933 mm pada temperatur barrel 230°C hingga 0.0978 mm pada temperatur barrel 250°C. Sedangkan pada temperatur cetakan 100°C, nilai kebulatan naik secara signifikan mulai dari 0.0724 mm pada temperatur barrel 230°C hingga 0.1156 mm pada temperatur 250°C. Hal ini sebabkan karena temperatur yang semakin naik akan menyebabkan *thermal stress* pada material akan meningkat. *Thermal stress* sendiri menyebabkan adanya *non-uniform shrinkage* yang akan menyebabkan meningkatnya nilai error kebulatan.



Gambar 4.8 Pengaruh Temperatur Barrel dan Temperatur Cetakan terhadap Kebulatan

4.2.3 Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan

Grafik pengaruh temperatur cetakan terhadap perubahan dimensi dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada temperatur barrel 230°C, memiliki nilai perubahan dimensi yang naik turun dengan nilai 0,802% pada temperatur cetakan 90°C, dan temperatur cetakan 100°C kembali naik dengan nilai 0,816%. Hal ini juga terjadi pada temperatur barrel 250°C dengan nilai 0,755% pada temperatur cetakan 90°C dan kembali naik dengan nilai 0,800% pada temperatur cetakan 100°C. Namun hal ini tidak terjadi pada temperatur barrel 240°C dan temperatur cetakan 80°C memiliki nilai perubahan dimensi sebesar 0.761%, hal ini dapat diakibatkan oleh *error* pada proses injeksi dimana tutup *gate* pada cetakan tidak tertutup dengan baik yang menyebabkan material yang masuk ke dalam cetakan lebih banyak, maka nilai perubahan dimensinya pun kecil.

Grafik pengaruh temperatur cetakan terhadap kebulatan dapat dilihat pada Gambar 4.8. Pada grafik menunjukkan bahwa pada temperatur barrel 240°C dengan temperatur cetakan 80°C, 90°C, dan 100°C nilai kebulatan mengalami penurunan seiring naiknya temperatur dengan nilai 0.116 mm, 0.0938 mm, dan 0.0800 mm secara berurutan, hal tersebut terjadi karena adanya relaksasi stress pada material yang dimana temperatur pada proses injeksi tidak mengalami penurunan secara langsung karena adanya temperatur cetakan yang membantu material untuk membentuk molekulnya kembali ke keadaan semula. Namun pada temperatur barrel 230°C dan temperatur cetakan 90°C, serta temperatur barrel 250°C dan temperatur cetakan 100°C, trend grafik menunjukkan *error* yang kemungkinan diakibatkan oleh fluktuasi temperatur pada *heater* barrel yang tidak stabil yang ada kemungkinan pada saat proses injeksi temperatur mengalami penurunan yang mengakibatkan nilai kebulatan juga meningkat.

4.3 Optimasi Parameter Proses Injeksi dengan *Taguchi-Grey-Fuzzy* dan ANOVA

Berdasarkan data pengukuran hasil injeksi, dilakukan tahapan kedua yaitu pengolahan data dengan metode *Taguchi-Grey-Fuzzy* dan metode ANOVA. Metode *Taguchi-Grey-Fuzzy* dilakukan untuk mendapatkan parameter optimal untuk injeksi sedangkan metode ANOVA dilakukan untuk mendapatkan nilai kontribusi dari masing-masing parameter

4.3.1 Rasio S/N dan Normalisasi S/N

Setelah mendapatkan data hasil penelitian, selanjutnya dilakukan perhitungan masing-masing rasio S/N dan normalisasi rasio S/N untuk mendapatkan nilai dari variabel respons pada penelitian ini. Untuk menghitung rasio S/N, dibutuhkan perhitungan *loss function* terlebih dahulu sebagaimana yang ditunjukkan pada persamaan 2.7 yang dimana menggunakan rumus semakin besar semakin baik, sedangkan untuk perumusan nilai rasio S/N ditunjukkan pada Persamaan 2.10. Contoh perhitungan rasio S/N dengan data eksperimen ke-1 adalah sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log L$$

$$S/N = -10 \log L = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k^2$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{0.847^2 + 0.818^2 + 0.784^2}{3}$$

$$\frac{S}{N} = 1.758$$

Perhitungan normalisasi rasio S/N dilakukan dengan menggunakan rumus semakin kecil semakin baik, sehingga menggunakan persamaan 2.12. Contoh perhitungan dari normalisasi rasio S/N menggunakan data dari eksperimen ke-1 sebagai berikut:

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

$$x_i^*(k) = \frac{1.758 - 1.751}{2.437 - 1.751}$$

$$x_i^*(k) = 0.010$$

Setelah melakukan perhitungan rasio S/N dan normalisasi rasio S/N seperti contoh kedua perhitungan diatas, maka dapat dilakukan perhitungan untuk eksperimen yang lain dan didapatkan hasil perhitungan pada Tabel 4.4 sebagai berikut:

Tabel 4.4 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.	1.758	20.521	0.010	0.454
2.	1.897	20.576	0.213	0.468
3.	1.751	22.763	0.000	1.000
4.	2.371	18.963	0.904	0.075
5.	2.300	20.519	0.801	0.454
6.	2.018	21.909	0.389	0.792
7.	2.012	18.722	0.380	0.016
8.	2.437	20.042	1.000	0.338
9.	1.913	18.655	0.236	0.000

4.3.2 Deviation Sequence dan Grey Relational Coefficient (GRC)

Selanjutnya menggunakan metode Grey untuk menggabungkan kedua respon optimum, dapat digunakan nilai dari normalisasi rasio S/N. Sebelum perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dilakukan, perlu dilakukan perhitungan *deviation sequence*. Rumus *deviation sequence* dapat dilihat pada Perumusan 2.15 dan rumus GRC dapat dilihat pada Perumusan 2.14. Contoh perhitungan *deviation sequence* dengan data eksperimen ke-1 dapat dilihat sebagai berikut:

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

$$\Delta_{0,i}(k) = |1 - 0.010|$$

$$\Delta_{0,i}(k) = 0.990$$

Sedangkan untuk perhitungan GRC dengan data eksperimen ke-1 dapat dilihat sebagai berikut:

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

$$\xi_i(k) = \frac{0+0.5 \cdot 1}{0.990+0.5 \cdot 1}$$

$$\xi_i(k) = 0.336$$

Dengan melakukan kedua perhitungan diatas yaitu GRC dan *deviation sequence*, maka dapat dilakukan perhitungan untuk data eksperimen lainnya, sehingga didapatkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.5:

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan *Deviation Sequence* dan GRC

Deviation Sequence		GRC	
Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan
0.990	0.546	0.336	0.478
0.787	0.532	0.388	0.484
1.000	0.000	0.333	1.000
0.096	0.925	0.839	0.351
0.199	0.546	0.715	0.478
0.611	0.208	0.450	0.706
0.620	0.984	0.446	0.337
0.000	0.662	1.000	0.430
0.764	1.000	0.396	0.333

4.3.3 Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)

Setelah melakukan semua perhitungan GFRG, maka didapatkan hasil perhitungan tersebut pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan GFRG

Nomor	GRC		GFRG
	Perubahan dimensi	Kebulatan	
1	0.336	0.478	0.41
2	0.388	0.484	0.433
3	0.333	1.000	0.659
4	0.839	0.351	0.563
5	0.715	0.478	0.595
6	0.450	0.706	0.572
7	0.446	0.337	0.408
8	1.000	0.430	0.705
9	0.396	0.333	0.401
Rata-rata			0.52733

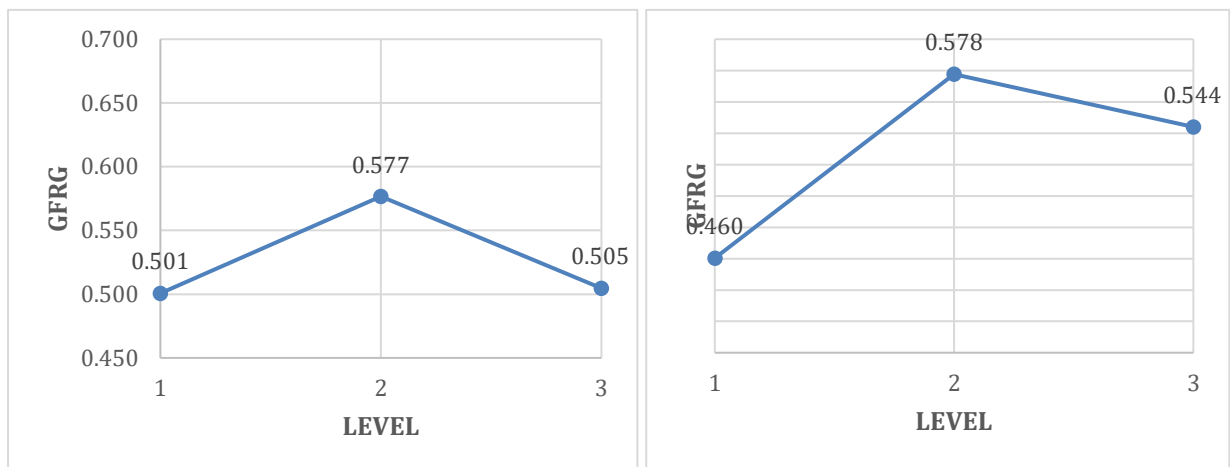
Berdasarkan nilai GFRG yang telah didapatkan dari perhitungan, dapat diketahui nilai parameter optimal untuk respons perubahan dimensi dan kebulatan yang terbaik.

Perhitungan tersebut dilakukan dengan mengelompokkan masing-masing GFRG berdasarkan variabel proses dan levelnya dan menghitung rata-rata dari GFRG pada level tersebut seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.7. Parameter yang optimal ditunjukkan oleh nilai GFRG terbesar pada masing-masing variabel proses.

Tabel 4.7 Nilai Rata-rata Multi Respon GFRG pada Masing-masing Level Faktor

Level	Variabel Proses	
	Temperatur Barrel (°C)	Temperatur Cetakan (°C)
1	0.501	0.460
2	0.577	0.578
3	0.505	0.544
Selisih	0.076	0.117
Rank	2	1
Rata-rata	0.527	

Berdasarkan perhitungan diatas, maka didapatkan bahwa nilai temperatur barrel yang optimal adalah pada level 2 yaitu sebesar 240°C sementara untuk nilai temperatur cetakan yang optimal adalah pada level 2 yaitu sebesar 90°C. Berikut adalah grafik pengaruh dari variabel proses terhadap GFRG ditunjukkan pada gambar 4.11:



(a)

(b)

Gambar 4.9 (a) Pengaruh Temperatur Barrel terhadap Respons GFRG (b) Pengaruh Temperatur Cetakan terhadap Respons GFRG

4.3.4 Analisa Data dan Persen Kontribusi

Analisa data dan persen kontribusi dilakukan untuk mengetahui apakah parameter proses yang dioptimasi memiliki pengaruh terhadap kedua variabel respons dan menghitung persen kontribusi yang diberikan oleh masing-masing variabel proses terhadap respons. Analisa data dan persen kontribusi pada penelitian ini dilakukan dengan metode *analysis of variance* (ANOVA) dengan tahapan awalnya menghitung nilai *degree of freedom* (DF), dilanjutkan dengan perhitungan *sum of square* (SS), *mean square* (MS), F statistik, *p-value*, dan persen kontribusi. Perhitungan ANOVA mengikuti rumus pada tabel 2.7. Berikut adalah contoh perhitungan ANOVA:

- ***Degree Of Freedom***

Perhitungan ANOVA dimulai dengan menghitung derajat kebebasan yang dimiliki oleh variabel tersebut. Derajat kebebasan dihitung dengan mengurangi banyaknya level dengan 1.

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

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

Derajat kebebasan total eksperimen dihitung dengan mengurangi banyaknya eksperimen yang dilakukan dengan 1.

$$DF_T = N - 1$$

$$DF_T = 9 - 1 = 8$$

Derajat kebebasan dari *error*, dilakukan dengan melakukan pengurangan dari derajat kebebasan total dengan total derajat kebebasan variabel proses.

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

$$DF_E = 8 - 4 = 4$$

- ***Sum of Square***

Perhitungan *sum of square* dari temperatur barrel ditunjukkan sebagai berikut:

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

$$SS_{TR} = 3 \times [(0.501 - 0.527)^2 + (0.577 - 0.527)^2 + (0.505 - 0.527)^2]$$

$$SS_{TR} = 0.01098$$

Perhitungan *sum of square* dari total penelitian ditunjukkan sebagai berikut

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

$$SS_T = [(0.41 - 0.527)^2 + (0.433 - 0.527)^2 + (0.659 - 0.527)^2 + (0.563 - 0.527)^2$$

$$+ (0.595 - 0.527)^2 + (0.572 - 0.527)^2 + (0.408 - 0.527)^2 + (0.705 - 0.527)^2$$

$$+ (0.401 - 0.527)^2]$$

$$SS_T = 0.10961$$

Perhitungan *sum of square* dari *error* dilakukan dengan mengurangi *sum of square* total dengan total *sum of square* dari variabel proses ditunjukkan sebagai berikut:

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

$$SS_E = 0.10961 - (0.01098 + 0.0219)$$

$$SS_E = 0.07674$$

- **Mean Square**

Perhitungan *mean square* dilakukan dengan membagi nilai *sum of square* dengan derajat kebebasan dari variabel tersebut. Contoh perhitungan *mean square* pada temperatur barrel ditunjukkan sebagai berikut:

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

$$MS_{TR} = \frac{0.01098}{2}$$

$$MS_{TR} = 0.00549$$

- **F Statistik**

Perhitungan F statistik masing-masing variabel proses dilakukan dengan membagi nilai *mean square* pada variabel tersebut dengan nilai *mean square error*. Contoh perhitungan F statistik ditunjukkan sebagai berikut:

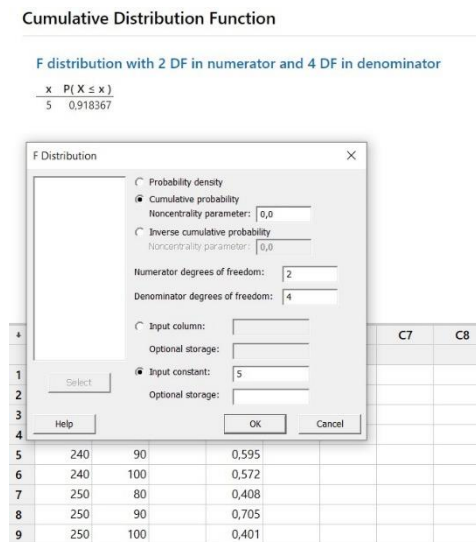
$$F = \frac{MS_{TR}}{MS_E}$$

$$F = \frac{0.00549}{0.01918}$$

$$F = 0.29$$

- **P-value**

Perhitungan *p-value* dapat 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*. Penggunaan Minitab pada perhitungan *p-value* ditunjukkan oleh Gambar 4.12.



Gambar 4.10 Perhitungan *p-value* Menggunakan Minitab

Berikut adalah tabel hasil perhitungan ANOVA ditunjukkan pada tabel 4.8:

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan ANOVA

Parameter	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>	Kontribusi (%)
Temperatur Barrel (°C)	2	0.01098	0.00549	0.29	0.765	10.0173
Temperatur Cetakan (°C)	2	0.0219	0.01095	0.57	0.605	19.9799
Error	4	0.07674	0.01918			70.0119
Total	8	0.10961				100

Berdasarkan perhitungan ANOVA yang telah dilakukan, dapat ditentukan parameter yang dioptimasi berpengaruh terhadap variabel proses atau tidak. Untuk menentukan hal tersebut dilakukan dengan melakukan uji hipotesis dengan hipotesis sebagai berikut:

H₀: Variabel proses tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan

H₁: Variabel proses berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan

dengan kriteria penolakan: Tolak H₀ jika *p-value* < 0.05

Pada tahap uji hipotesis berdasarkan nilai yang telah didapatkan pada perhitungan ANOVA, maka dapat dibuat kesimpulan perhitungan sebagai berikut

1. Variabel proses temperatur barrel memiliki nilai *p-value* sebesar 0.765. Berdasarkan kriteria penolakan yang telah dibuat, maka dapat disimpulkan bahwa temperatur barrel tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan dengan nilai kontribusi sebesar 10.0173%.
2. Variabel proses temperatur cetakan memiliki nilai *p-value* sebesar 0.605. Berdasarkan kriteria penolakan yang telah dibuat, maka dapat disimpulkan bahwa temperatur cetakan tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan dengan nilai kontribusi sebesar 19.9799%.

Hasil perhitungan yang telah dilakukan pada tahap pengolahan data ditunjukkan pada tabel 4.9:

Tabel 4.9 Hasil Pengolahan Data

Variabel	Parameter Optimal (°C)	Persen Kontribusi(%)	<i>P-value</i>
Temperatur Barrel(°C)	240	10.0173	0.765
Temperatur Cetakan(°C)	90	19.9799	0.605

4.4 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk mengetahui perhitungan optimasi parameter yang dilakukan apakah benar. Eksperimen konfirmasi dilakukan sebanyak 4 kali. Untuk melakukan eksperimen konfirmasi perlu menghitung nilai GFRG prediksi terlebih dahulu yang akan didapatkan dengan menggunakan parameter optimal yang telah didapatkan. Nilai GFRG prediksi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

$$\hat{\gamma} = 0.527 + (0.577 - 0.527) + (0.578 - 0.527)$$

$$\hat{\gamma} = 0.628$$

Untuk mendapatkan batas toleransi dari nilai GFRG prediksi, perlu menghitung *confidence interval* dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CI_C = \sqrt{F_{(\infty;v_1;v_2)} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI = \sqrt{7,71 \cdot 0.01918 \cdot \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{3} \right)}$$

$$CI = 0.279$$

$$CI_{atas} = 0.907$$

$$CI_{bawah} = 0.349$$

Setelah menentukan nilai prediksi GFRG dengan rentang *confidence interval*, maka dapat dilakukan eksperimen konfirmasi dengan hasil yang ditunjukkan oleh Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi

Variabel Proses	Nomor	Variabel Respons	
		Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
Temperatur Barrel (240 °C) Temperatur Cetakan (90 °C)	1	0.834	0.11133
	2	0.749	0.08133
	3	0.764	0.09867

Hasil respons eksperimen tersebut dilakukan perhitungan seperti pada tahap sebelumnya sehingga didapatkan nilai GFRG. Pengolahan data dari hasil eksperimen konfirmasi ditunjukkan oleh Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Pengolahan Data Eksperimen Konfirmasi

	Rasio S/N	Normalisasi Rasio S/N	Deviation sequence	GRC	GFRG
Perubahan dimensi (%)	2.122	0.542	0.458	0.522	0.473
Kebulatan (mm)	20.186	0.373	0.627	0.443	

Pada perhitungan GFRG dari eksperimen konfirmasi, dapat diketahui bahwa nilai GFRG tersebut berada dalam rentang interval keyakinan yaitu $0.349 < GFRG < 0.907$ sehingga

dapat disimpulkan bahwa perhitungan nilai optimal dari kedua variabel respons adalah valid seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.12:

Tabel 4.12 Hasil Eksperimen Konfirmasi

Hasil Perhitungan	Nilai
Batas atas GFRG	0.907
Batas bawah GFRG	0.349
Nilai GFRG Konfirmasi	0.473

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan metode ANOVA, pada temperatur barrel didapatkan syarat nilai p-value < 0.05 dengan nilai sebesar 0,765 yang berdasarkan uji hipotesis menyatakan bahwa temperatur barrel tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil berbahan Stainless Steel 304L/PA6. Adapun nilai persen kontribusi dari temperatur barrel terhadap perubahan dimensi dan kebulatan adalah 10.0173%. Perhitungan menggunakan Taguchi-grey-fuzzy menghasilkan nilai optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan terkecil adalah 240°C.
2. Berdasarkan metode ANOVA, pada temperatur cetakan didapatkan syarat nilai p-value < 0.05 sebesar 0,605 yang berdasarkan uji hipotesis menyatakan bahwa temperatur cetakan tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil berbahan Stainless Steel 304L/PA6. Adapun nilai persen kontribusi dari temperatur barrel terhadap perubahan dimensi dan kebulatan adalah 19.9799%. Perhitungan menggunakan Taguchi-grey-fuzzy menghasilkan nilai optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi dan kebulatan terkecil adalah 90°C.

5.2 Saran

Saran yang didapatkan pada penelitian ini adalah:

1. Kualitas pemanas yang digunakan pada mesin injeksi ditingkatkan agar tidak terjadi fluktuasi temperatur yang terjadi pada bagian *barrel* dan cetakan.
2. Pembuatan *feedstock* menggunakan variabel dan metode yang optimal agar material yang digunakan homogen.
3. Penggunaan *feedstock* komersial dalam proses eksperimen diperlukan sebagai hasil pembandingan.
4. Sistem produksi dalam pembuatan proyektil menggunakan metode injection molding dirancang agar memiliki proses yang lebih terkontrol dan memiliki repeatability baik

DAFTAR PUSTAKA

- Bélangier, G., Germain-De-Grantham, S., Potvin, M., & Bélaïr, 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.
- 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>
- Kc, B., Faruk, O., Agnelli, J. A. M., Leao, A. L., Tjong, J., & Sain, M. (2016). Sisal-glass fiber hybrid biocomposite: Optimization of injection molding parameters using Taguchi method for reducing shrinkage. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *83*, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.034>
- 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>
- Mates, S. P., Rhorer, R., Banovic, S., Whintenton, 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>
- Naik, M., Shetty, P. B., Kotresh, K., & L, A. (2019). Prevention of Defects in Injection Molding Process in the Manufacturing of Ballpoint Pen. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, *8*(3), 4932–4937. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C5590.098319>

- 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>
- 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

Spesifikasi Mesin dan Material

Spesifikasi Material *Stainless Steel 304L*

No.	Parameter	Nilai
1.	Densitas (g/cm ³)	8,0
2.	Titik leleh (°C)	1535
3.	Tensile Strength (MPa)	540-750
4.	Konduktivitas Thermal (W/m.K)	13.6
5.	Modulus Elastisitas (GPa)	200

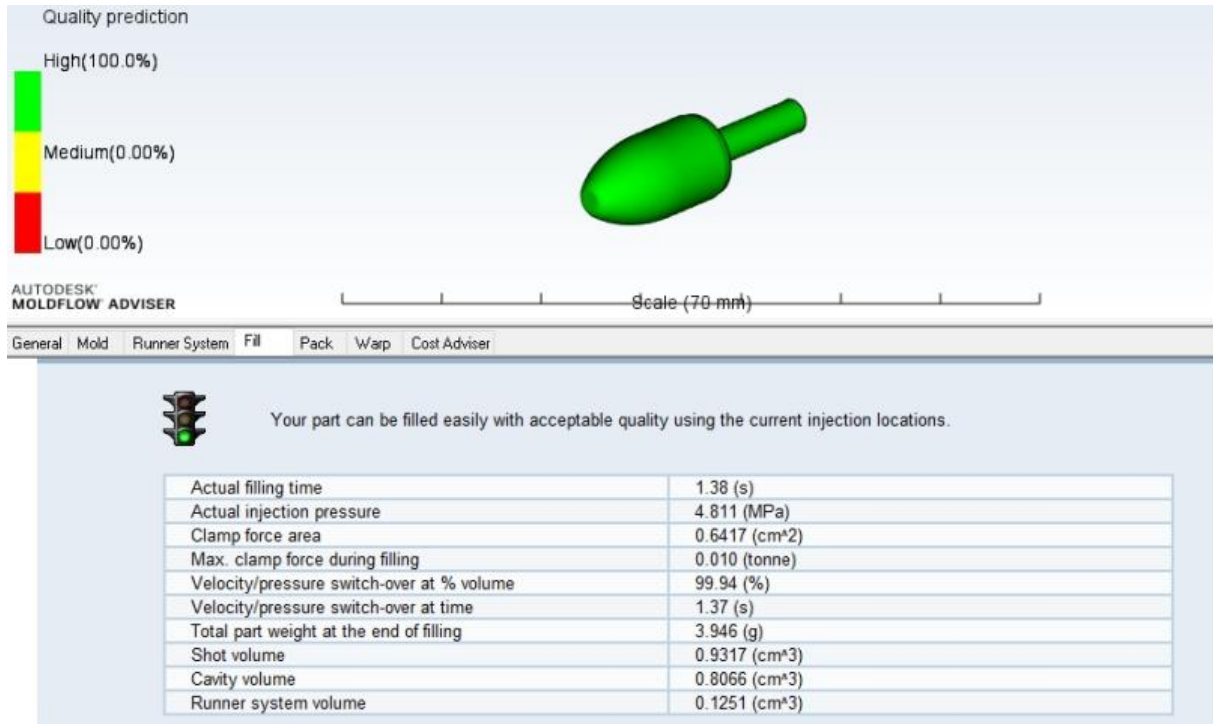
Spesifikasi PA-6

No.	Parameter	Nilai
1.	Densitas (g/cm ³)	1,12
2.	Titik leleh (°C)	223
3.	Tensile Strength (MPa)	48,3-82,7
4.	Konduktivitas Thermal (W/m.K)	0,2575
5.	Modulus Elastisitas (GPa)	2,4

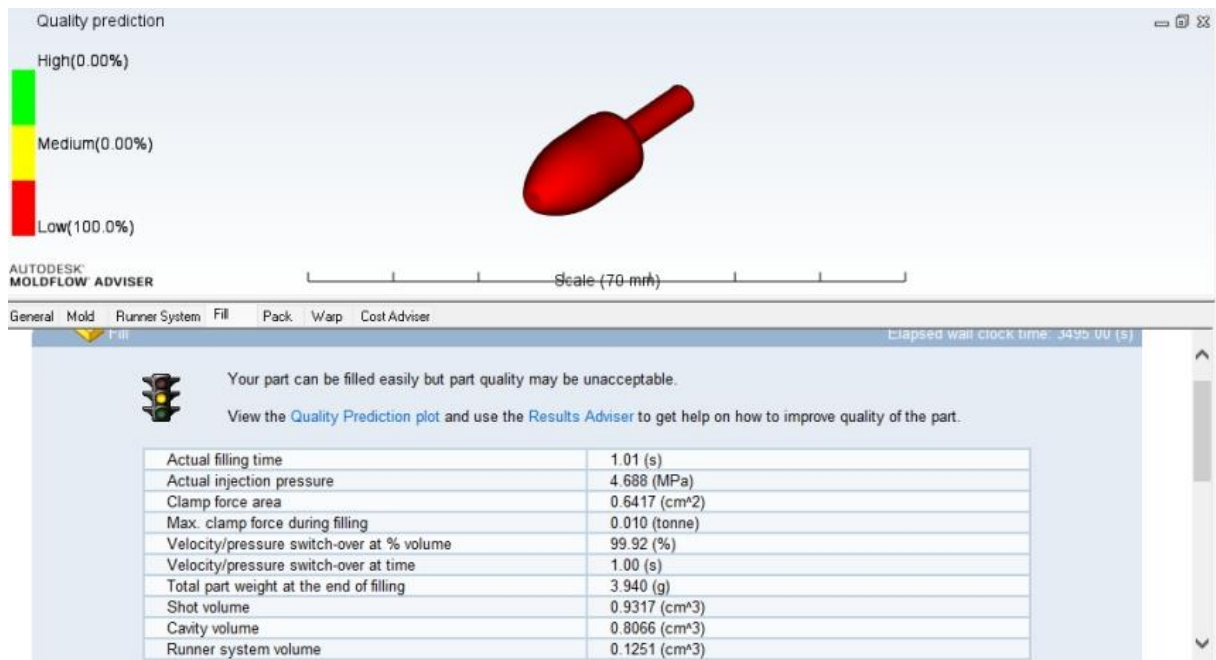
Spesifikasi Mesin Kompaksi

No.	Parameter	Nilai
1.	Tekanan injeksi maksimum (MPa)	10
2.	Temperatur leleh maksimum (°C)	300
3.	Temperatur cetakan maksimum (°C)	300
4.	Kapasitas injeksi (g)	60
5.	Displacement Oil Pump (L/s)	2,04
6.	Viskositas kinematik minyak (cSt)	10-860
7.	Daya (W)	4,08 (3 fasa)
8.	Dimensi mesin (mm)	900x400x1764,9

Hasil Simulasi Autodesk Moldflow Adviser 2021



Quality Prediction Analisis Fill dengan Parameter Optimal Hasil Analisis “Molding Window”



Quality Prediction dengan Parameter Rekomendasi Material yang digunakan pada Eksperimen

Hasil perhitungan *Taguchi-Grey-Fuzzy*

No	Loss Function		Rasio S/N		Normalisasi S/N		Deviation Sequence		GRC		GFRG
	Shrinkage	Kebulatan	Shrinkage	Kebulatan	Shrinkage	Kebulatan	Shrinkage	Kebulatan	Shrinkage	Kebulatan	Shrinkage + Kebulatan
1	0,895	0,010	0,483	20,137	0,000	1,000	1,000	0,000	0,333	1,000	0,659
2	0,847	0,015	0,720	18,237	0,127	0,711	0,873	0,289	0,364	0,634	0,499
3	0,793	0,030	1,009	15,231	0,283	0,255	0,717	0,745	0,411	0,402	0,434
4	0,683	0,012	1,653	19,253	0,628	0,866	0,372	0,134	0,574	0,788	0,644
5	0,583	0,019	2,345	17,293	1,000	0,568	0,000	0,432	1,000	0,536	0,751
6	0,728	0,044	1,376	13,554	0,480	0,000	0,520	1,000	0,490	0,333	0,409
7	0,613	0,018	2,127	17,461	0,883	0,594	0,117	0,406	0,810	0,552	0,651
8	0,635	0,023	1,972	16,291	0,800	0,416	0,200	0,584	0,714	0,461	0,582
9	0,630	0,015	2,010	18,322	0,820	0,724	0,180	0,276	0,735	0,645	0,632
10	0,654	0,012	1,841	19,118	0,730	0,845	0,270	0,155	0,649	0,763	0,644

BIODATA PENULIS



M Fadel Alfayed dilahirkan di Palembang, 4 Januari 2001 merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDS 03 YKPP Dumai (2006-2012), SMP Negeri 2 Karanganyar Dumai (2012) dan SMP Negeri 1 Palembang (2013-2015), dan SMA Plus Negeri 17 Palembang (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 Ketua Paguyuban Mahasiswa ITS asal kota Palembang (Limass ITS). Penulis juga menjabat sebagai Staf Pengurus Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) 2019/2020 dan dilanjutkan menjadi Kabiro Penanaman Nilai Departemen Kaderisasi Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) 2020/2021. Penulis juga pernah berkesempatan untuk melakukan kerja praktik di PT. Pertamina Persero Plaju, Kota Palembang. Penulis dapat dihubungi melalui email Fadelalfayed0401@yahoo.com.