

TUGAS AKHIR - TM 184835

**OPTIMASI TEKANAN INJEKSI DAN TEKANAN *HOLDING*
CETAKAN INJEKSI TERHADAP NILAI PERUBAHAN
DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL KOMPOSIT
*STAINLESS STEEL 304L/PA-6***

MUHAMMAD RAFII PRATAMA WIBOWO

NRP 02111840000061

Dosen Pembimbing

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

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

NIP 197906202006042001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM 184835

**OPTIMASI TEKANAN INJEKSI DAN TEKANAN *HOLDING*
CETAKAN INJEKSI TERHADAP NILAI PERUBAHAN
DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL KOMPOSIT
*STAINLESS STEEL 304L/PA-6***

MUHAMMAD RAFII PRATAMA WIBOWO

NRP 02111840000061

Dosen Pembimbing

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

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

NIP 197906202006042001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM 184835

**OPTIMIZATION OF INJECTION AND HOLDING PRESSURE
ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL
CHANGE AND ROUNDNESS OF STAINLESS STEEL
304L/PA-6 COMPOSITE PROJECTILE**

MUHAMMAD RAFII PRATAMA WIBOWO

NRP 02111840000061

Advisor

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

NIP 196912031994031001

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

NIP 197906202006042001

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI TEKANAN INJEKSI DAN TEKANAN *HOLDING* CETAKAN INJEKSI TERHADAP NILAI PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIH. KOMPOSIT *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 : **MUHAMMAD RAFII PRATAMA WIBOWO**
NRP. 0211184000061

Disetujui oleh Tim Penguji 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, M.Eng.
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.
5. Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.

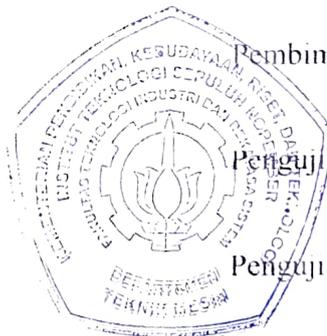
Pembimbing 1

Pembimbing 2

Penguji

Penguji

Penguji



SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

OPTIMIZATION OF INJECTION AND HOLDING PRESSURE ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL CHANGE AND ROUNDNESS OF STAINLESS STEEL 304L/PA-6 COMPOSITE PROJECTILE

FINAL PROJECT

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

By : **MUHAMMAD RAFII PRATAMA WIBOWO**
NRP. 0211184000061

Approved by Final Project 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, M.Eng.
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.
5. Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.

Advisor 1



Advisor 2



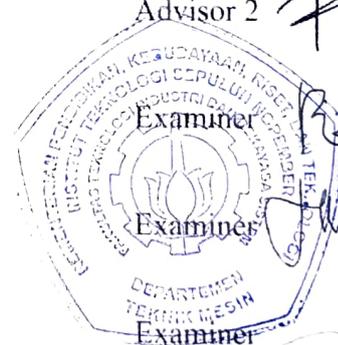
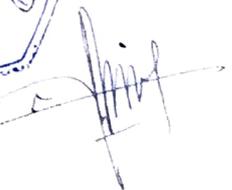
Examiner



Examiner



Examiner



SURABAYA
July 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Rafii Pratama Wibowo / 0211184000061
Program studi : S-1 Teknik Mesin
Dosen Pembimbing 1 / NIP : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D. /
196912031994031001
Dosen Pembimbing 2 / NIP : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si. / 197906202006042001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “OPTIMASI TEKANAN INJEKSI DAN TEKANAN *HOLDING* CETAKAN INJEKSI TERHADAP NILAI PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN PROYEKTIL KOMPOSIT *STAINLESS STEEL 304L/PA-6*” 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



Muhammad Rafii Pratama Wibowo
NRP. 0211184000061

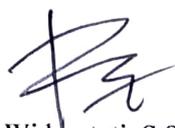
Mengetahui

Dosen Pembimbing 1



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

Dosen Pembimbing 2



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

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Name of student / NRP : Muhammad Rafii Pratama Wibowo / 0211184000061
Study Program : Mechanical Engineering Undergraduate Study Program
Advisor 1 / NIP : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D. /
196912031994031001
Advisor 2 / NIP : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si. / 197906202006042001

hereby declare that the Final Project with the title of “OPTIMIZATION OF INJECTION AND HOLDING PRESSURE ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL CHANGE AND ROUNDNESS OF STAINLESS STEEL 304L/PA-6 COMPOSITE PROJECTILE” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

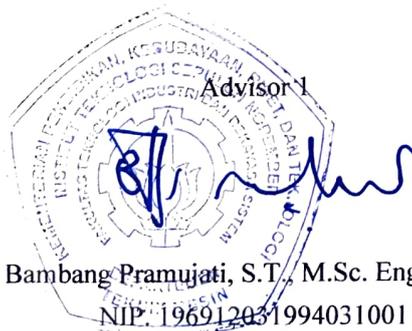
Surabaya, 13 July 2022

Student

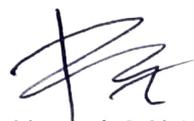


Muhammad Rafii Pratama Wibowo
NRP. 0211184000061

Acknowledged


Advisor 1
Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
NIP. 196912031994031001

Advisor 2


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

**OPTIMASI TEKANAN INJEKSI DAN TEKANAN *HOLDING* PADA PROSES
CETAKAN INJEKSI TERHADAP PERUBAHAN DIMENSI DAN KEBULATAN
PROYEKTIL KOMPOSIT *STAINLESS STEEL 304L/PA6***

Nama Mahasiswa / NRP : Muhammad Rafii Pratama Wibowo / 0211184000061
Dapartemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing 1 : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstrak

Proyektil *frangible* adalah proyektil yang mudah pecah menjadi serpihan kecil ketika mengenai target yang lebih keras agar mencegah terjadinya *ricochet* dan *backsplash*. Pada pengembangannya, material *frangible* dapat diaplikasikan sebagai material proyektil. Pada penelitian ini, proyektil dibuat dengan proses cetakan injeksi berbahan komposit *stainless steel 304L/PA6*. Untuk memproduksi proyektil dengan toleransi yang tinggi, diperlukan optimasi parameter proses cetakan injeksi agar kecacatan pada produk dapat diminimalisir, khususnya perubahan dimensi dan kebulatan pada produk yang akan diteliti lebih lanjut. Penelitian diawali dengan pembuatan desain eksperimen parameter proses injeksi yang akan digunakan. Selanjutnya, parameter proses yang akan digunakan dalam eksperimen disimulasikan terlebih dulu pada *software* Autodesk Moldflow Adviser 2021 dilanjutkan eksperimen penentuan parameter injeksi untuk mendapatkan variabel proses dan konstan pada eksperimen. Setelah itu, eksperimen dilakukan menggunakan mesin cetakan injeksi. Proyektil yang dihasilkan kemudian diukur perubahan dimensi dan kebulatan pada bagian badan proyektil. Hasil pengukuran perubahan diameter dan kebulatan badan proyektil dilanjutkan pada tahap perhitungan optimasi parameter. Perhitungan optimasi parameter proses injeksi menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy untuk mengetahui parameter proses yang optimal, dilanjutkan dengan ANOVA menggunakan nilai *grey-fuzzy reasoning grade* atau GFRG untuk mengetahui kontribusi tiap parameter proses injeksi terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil. Selanjutnya, uji konfirmasi dilakukan untuk membuktikan nilai parameter injeksi hasil perhitungan optimasi merupakan variabel terbaik. Hasil dari penelitian ini yaitu tekanan injeksi dan tekanan *holding* berkontribusi terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil secara berurut sebesar 22,054% dan 21,113% dengan tekanan injeksi sebesar 9 MPa dan tekanan *holding* sebesar 9 MPa merupakan konfigurasi optimal. Berdasarkan uji hipotesis, tekanan injeksi dan tekanan *holding* tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil. Nilai GFRG dari uji konfirmasi berada di dalam interval keyakinan, sehingga hasil desain optimasi sesuai dengan hasil eksperimen.

Kata kunci: Proyektil *Frangible*, Cetakan Injeksi, *Shrinkage*, Perubahan Dimensi, Kebulatan.

OPTIMIZATION OF INJECTION AND HOLDING PRESSURE ON INJECTION MOLDING PROCESS FOR DIMENSIONAL CHANGE AND ROUNDNESS OF STAINLESS STEEL 304L/PA-6 COMPOSITE PROJECTILE

Student Name / NRP : Muhammad Rafii Pratama Wibowo / 02111840000061
Departement : Mechanical Engineering FTIRS - ITS
Advisor 1 : Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
Advisor 2 : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstract

Frangible projectiles are projectiles that break easily into small pieces when hitting a harder target to prevent ricochets and backsplashes. In its development, frangible materials can be applied as projectile materials. In this research, the projectiles were made by injection molding process made from stainless steel 304L/PA6 composite. To produce high tolerance projectiles, it is necessary to optimize the injection molding process parameters so that defects in the product can be minimized, especially dimensional change and roundness of the projectile which will be investigated further. The research begins with making an experimental design of the injection process parameters that will be used. Furthermore, the process parameters that will be used in the experiment will be simulated first on Autodesk Moldflow Adviser 2021 software to obtain the process and constant variables for the experiment. After that, the projectile making experiment were carried out using an injection molding machine. The dimensional change and roundness of the projectile then measured on the body part. Then, the measurements of dimensional change and roundness of projectile on the experimental results are carried out to continue at the parameter optimization calculation stage. The calculation of the optimization of injection process parameters using the Taguchi-Grey-Fuzzy method to determine the optimal process parameters, followed by ANOVA using the value of gray-fuzzy reasoning grade or GFRG to determine the contribution of each injection process parameter toward the projectile dimensional change and roundness. Furthermore, confirmation experiments were carried out to prove the value of the injection parameter from the optimization calculation was the best variable. The result obtained that injection pressure and holding pressure contribute toward dimensional change and roundness of the projectile respectively by 22.054% and 21.113% with injection pressure of 9 MPa and holding pressure of 9 MPa is the optimum configuration. Based on the hypothesis test, injection pressure and holding pressure have no effect on dimensional changes and roundness of projectile. The GFRG value of the confirmation test is within the confidence interval, so the results of the optimization design are in accordance with the experimental results.

Keywords: *Frangible Projectile, Injection Molding, Shrinkage, Dimensional Change, Roundness.*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “Optimasi Tekanan Injeksi dan Tekanan *Holding* pada Proses Cetakan Injeksi terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan Proyektile Komposit *Stainless Steel 304L/PA6* ” dengan baik.

Keberhasilan penulisan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah banyak memberikan bantuan, motivasi, dan dukungan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Setyo Wibowo dan Ibu Yuniati selaku orang tua penulis, serta Muhammad Tsaqif Aulia Wibowo selaku adik penulis yang telah memberikan dukungan dan doa restu.
2. Bapak Bambang Pramujati, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D. dan Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing penulis yang telah memberi bimbingan dan motivasi kepada saya.
3. Bapak Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, M.Eng., bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T., dan ibu Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., sebagai dosen penguji, atas saran dan masukan yang telah diberikan untuk menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Atok Setiawan, M. Eng.Sc. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS beserta seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika, atas bantuan dan kerjasamanya selama masa perkuliahan.
5. Bapak M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. selaku dosen wali yang telah memberikan bantuan selama awal perkuliahan sampai akhirnya penulis dapat menyelesaikan kuliah jenjang S-1 di Teknik Mesin ITS.
6. Dhau Fara Shabira, Andi Alfian Kartika Aji, Satriyo Wibisono Aspar, dan Muhammad Fadel Alfayed, selaku teman dekat penulis yang selalu memberikan bantuan dan semangat selama pengerjaan tugas akhir ini.
7. Teman-teman *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan FTIRS yang telah memberikan bantuan dan ilmunya kepada penulis.
8. Teman-teman WarjoSTMJ dan Gayam *Squad* yang telah memberikan semangat selama pengerjaan tugas akhir ini.
9. Teman-teman Ash-Shaff, terutama Badan Pengurus Harian periode 2020/2021 yang telah memberikan semangat selama pengerjaan tugas akhir ini.
10. Teman-teman Laboratorium Kompiler yang telah memberikan motivasi dan bantuan selama pengerjaan tugas akhir ini.
11. Seluruh keluarga besar M61 yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan.
12. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuannya yang tidak bisa disebutkan satu persatu di halaman ini.

Semoga segala bentuk kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Allah SWT, Amin.

Penulis sadar bahwa penulisan tugas akhir ini memiliki banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua.

Surabaya, 13 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Projektil <i>Frangible</i>	4
2.1.1 <i>Stainless Steel 304L</i>	5
2.1.2 Poliamida-6 (PA-6)	5
2.2 Cetakan Injeksi	6
2.2.1 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Proses Cetakan Injeksi	7
2.3 Jenis-jenis Cacat Produk pada Proses Cetakan Injeksi.....	7
2.3.1 <i>Shrinkage</i>	8
2.3.2 <i>Warpage</i>	9
2.4 Kebulatan.....	9
2.5 Material Komposit.....	11
2.6 Autodesk Moldflow Adviser 2021	12
2.7 Desain Eksperimen Metode Taguchi.....	13
2.8 <i>Grey Relational Analysis</i>	16
2.9 Analisis Variansi	18
2.10 Uji Konfirmasi.....	19
2.11 Penelitian Pendahuluan	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Tahapan Penelitian	30
3.2.1 Studi Literatur dan Lapangan	30
3.2.2 Simulasi Proses Injeksi dengan <i>Software</i> Autodesk Moldflow.....	30
3.2.3 Desain Eksperimen Pengambilan Data.....	33
3.2.4 Persiapan Bahan dan Mesin.....	36
3.2.5 Proses Eksperimen Injeksi Projektil	37
3.2.6 Pengukuran Projektil	37
3.2.7 Optimasi Metode Taguchi-Grey-Fuzzy.....	38
3.2.8 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	41
3.2.9 Uji Hipotesis	41
3.2.10 Uji Konfirmasi.....	42
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Penentuan Variabel Eksperimen.....	43
4.2 Pelaksanaan Eksperimen Injeksi	45

4.2.1	Pengaruh Tekanan Injeksi dan Tekanan <i> Holding </i> terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan Projektil	46
4.3	Optimasi Data dengan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy dan ANOVA	48
4.3.1	Perhitungan Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N	48
4.3.2	Perhitungan <i> Grey Relational Coefficient </i> (GRC).....	49
4.3.3	<i> Grey-Fuzzy Reasoning Grade </i> (GFRG).....	50
4.3.4	ANOVA.....	51
4.4	Uji Konfirmasi.....	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		56
5.1	Kesimpulan.....	56
5.2	Saran	56
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proyektil <i>Frangible</i> Kaliber 9 mm (Komenda et al., 2017).....	4
Gambar 2.2 Bagian Umum Mesin Cetakan Injeksi (Groover, 2019)	6
Gambar 2.3 Mesin Cetakan Injeksi Vertikal (ENGEL, 2022).....	7
Gambar 2.4 <i>Shrinkage</i> (Mahesh Naik et al., 2019).....	9
Gambar 2.5 <i>Warpage</i> (Mahesh Naik et al., 2019)	9
Gambar 2.6 Pengukuran Kebulatan dengan <i>V-Block</i> (60°) dan Jam Ukur Tidak Selalu Menunjukkan Adanya Ketidakbulatan (Yanis, 2010)	11
Gambar 2.7 Hasil Simulasi Analisis “ <i>Molding Window</i> ” (Autodesk, 2021)	12
Gambar 2.8 (a) Hasil Prediksi Kualitas Produk dan (B) Prediksi <i>Shrinkage</i> pada Produk (Autodesk, 2021)	13
Gambar 2.9 Fungsi Keanggotaan Respon sebagai Variabel Input (Chen et al., 2008).....	17
Gambar 2.10 Hasil Simulasi (a) <i>Short Shot</i> , (b) <i>Shrinkage</i> , dan (c) <i>Warpage</i> (Moayyedien & Mamedov, 2019).....	21
Gambar 2.11 Grafik Hasil Simulasi Analisis <i>Shrinkage</i> [(a) dan (b)] dan <i>Warpage</i> [(c) dan (d)] untuk Parameter Injeksi (Luca et al., 2018).....	22
Gambar 2.12 Sampel Data Hasil GOM (Kurt et al., 2009).....	24
Gambar 2.13 Efek Tekanan <i> Holding</i> terhadap Nilai Total <i>Shrinkage</i> pada Arah X dan Y, dan <i>Error</i> Kebulatan (Kurt et al., 2009).....	25
Gambar 2.14 Efek Temperatur Leleh Material terhadap Nilai Total <i>Shrinkage</i> pada Arah X dan Y, dan <i>Error</i> Kebulatan pada Tekanan <i> Holding</i> 950 bar (Kurt et al., 2009).....	25
Gambar 2.15 Efek Waktu Pendinginan terhadap Nilai Total <i>Shrinkage</i> pada Arah X dan Y, dan <i>Error</i> Kebulatan (Kurt et al., 2009)	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Autodesk Moldflow Adviser 2021	31
Gambar 3.3 <i>Gate</i> untuk Proses Simulasi	32
Gambar 3.4 Pemilihan Material pada <i>Database Software</i>	32
Gambar 3.5 Prediksi Kualitas Hasil Analisis “ <i>Fill + Pack</i> ”	33
Gambar 3.6 Mesin Kompaksi	36
Gambar 3.7 Mikrometer Sekrup	36
Gambar 3.8 <i>V-block</i> dan <i>Dial Indicator</i>	37
Gambar 3.9 Dimensi Pengukuran pada Proyektil.....	38
Gambar 3.10 (a) Titik Pengukuran Kebulatan Proyektil dan (b) Contoh Hasil Pengukuran Kebulatan.....	38
Gambar 3.11 Diagram Alir Perhitungan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy	38
Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan (a) Input dan (b) <i>Output</i>	40
Gambar 3.13 Perhitungan GFRG pada MATLAB	41
Gambar 4.1 Tahapan Analisis Data dan Pembahasan pada Penelitian.....	43
Gambar 4.2 Hasil Analisis “ <i>Molding Window</i> ” pada Autodesk Moldflow Adviser 2021	44
Gambar 4.3 (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.	45
Gambar 4.4 Proyektil <i>Frangible</i> Hasil Eksperimen Injeksi (mm).....	46
Gambar 4.5 Pengaruh Tekanan Injeksi dan Tekanan <i> Holding</i> terhadap Perubahan Dimensi	47
Gambar 4.6 Pengaruh Tekanan Injeksi dan Tekanan <i> Holding</i> terhadap Kebulatan	48
Gambar 4.7 (a) Pengaruh Tekanan Injeksi terhadap Respon GFRG dan (b) Pengaruh Tekanan <i> Holding</i> terhadap Respon GFRG.....	51
Gambar 4.8 Perhitungan <i>P-value</i> dengan Minitab	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat Mekanik Projektil <i>Frangible</i>	5
Tabel 2.2 Komposisi <i>Stainless Steel 304L</i>	5
Tabel 2.3 Parameter Berpengaruh terhadap <i>Shrinkage</i> (Fischer, 2003).	8
Tabel 2.4 Nilai Umum <i>Shrinkage</i> Beberapa Material Termoplastik (Groover, 2019).	9
Tabel 2.5 Metode Pengukuran Penyimpangan Kebulatan (Sui & Zhang, 2012).	10
Tabel 2.6 Keterangan Warna pada Hasil Analisis “ <i>Molding Window</i> ” (Autodesk, 2021)	12
Tabel 2.7 Keterangan Hasil Prediksi Kualitas Produk (Autodesk, 2021)	13
Tabel 2.8 Pemilihan Matriks Ortogonal (Soejanto, 2009)	15
Tabel 2.9 Tabel Analisis Variansi (ANOVA)	19
Tabel 2.10 Parameter Proses Injeksi Penelitian C.-M. Lin & Chen (2021)	20
Tabel 2.11 Parameter Proses Injeksi dalam Tiga Level pada Penelitian Moayyedian & Mamedov (2019)	21
Tabel 2.12 Desain Simulasi Penelitian Luca et al. (2018)	22
Tabel 2.13 Parameter Optimal Injeksi pada Penelitian Kc et al. (2016)	23
Tabel 2.14 Parameter Injeksi pada Penelitian Kusić dan Hančić (2016)	24
Tabel 2.15 Perbandingan Parameter Proses Injeksi pada Penelitian Terdahulu	27
Tabel 3.1 Perbandingan Material BASF: Catamold 17-4PH dan 90% <i>Stainless Steel 304L</i> + 10% PA-6	33
Tabel 3.2 Perbandingan Komposisi <i>Stainless Steel</i> BASF: Catamold 17-4PH dan <i>Stainless Steel 304L</i>	34
Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen Penentuan Parameter Injeksi yang akan Digunakan	34
Tabel 3.4 Variabel Proses dan Level	34
Tabel 3.5 Variabel Konstan	35
Tabel 3.6 Derajat Kebebasan Eksperimen	35
Tabel 3.7 Desain Eksperimen Berdasarkan Matriks Ortogonal	35
Tabel 3.9 Nilai Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N	39
Tabel 3.10 Nilai <i>Deviation Sequence</i> dan GRC	39
Tabel 3.11 Fungsi Keanggotaan GRC	40
Tabel 3.12 Logika Fuzzy pada Penelitian	40
Tabel 3.13 Hasil ANOVA	41
Tabel 4.1 Hasil Analisis “ <i>Fill</i> ” pada Autodesk Moldflow Adviser 2021	44
Tabel 4.2 Hasil Tahap Penentuan Variabel Eksperimen Penelitian	45
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Projektil	46
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N	49
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan <i>Deviation Sequence</i> dan GRC	50
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan GFRG	51
Tabel 4.7 Nilai Rata-rata Multirespon GFRG pada setiap Level Variabel Proses	51
Tabel 4.8 Hasil ANOVA Penelitian	53
Tabel 4.9 Hasil Akhir Optimasi Data	54
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Eksperimen Uji Konfirmasi	55
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan GFRG Uji Konfirmasi	55
Tabel 4.12 Hasil Uji Konfirmasi	55

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses injeksi merupakan metode yang biasa digunakan untuk mengolah plastik. Proses injeksi memiliki kelebihan seperti biaya yang murah, berkualitas tinggi, dan dapat dikerjakan secara massal. Proses injeksi diawali dengan memanaskan material yang ingin diinjeksi ke dalam cetakan dengan tekanan tinggi, kemudian didinginkan dan produk dikeluarkan dengan alat *ejector* (Nakazawa, 2011). Pada proses injeksi terdapat berbagai jenis kecacatan produk, seperti *shrinkage* dan *warpage*. Perbedaan dimensi antara bagian yang diinjeksi dengan rongga cetakan disebut *shrinkage* (Pomerleau & Sanschagrín, 2006). Hal ini dikarenakan dimensi bagian yang diinjeksi berubah dan menjadi lebih kecil, sehingga ketebalannya berkurang (Ozcelik et al., 2010). Sedangkan ketika cetakan mendistorsi atau menekuk keluar dari bidang, maka terjadi *warpage*. Dalam beberapa aplikasi, perubahan dimensi akibat *warpage* bisa jauh melebihi *shrinkage* (Kazmer, 2007). *Shrinkage* dan *warpage* sangat dihindari pada hasil proses injeksi karena dapat mempengaruhi kualitas dari produk, terutama dalam memproduksi proyektil yang memiliki toleransi yang sangat tinggi. Menurut *Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute Inc.* atau SAAMI (2015), toleransi proyektil mencapai $\pm 0,0005$ mm. Sedangkan menurut penelitian Bélanger et al. (1993), proyektil memiliki toleransi sebesar $\pm 0,0254$ mm dengan densitas sebesar $5,7 - 5,8$ gram/cm³. Sehingga diperlukan optimasi proses injeksi agar spesifikasi proyektil sesuai dengan standarnya.

Beberapa penelitian terdahulu membahas hal-hal yang memengaruhi terjadinya *shrinkage* dan kebulatan pada produk, diantaranya Lin dan Chen (2021) melakukan penelitian mengenai optimasi parameter injeksi untuk meminimalisir eror kebulatan dan konsentrisitas yang disebabkan *shrinkage* menggunakan *software* simulasi dengan metode Taguchi pada spesimen berbentuk lensa telesentris. Dari hasil penelitian diperoleh kontribusi terbesar parameter injeksi terhadap kebulatan dan konsentrisitas secara berurutan yaitu temperatur leleh material, tekanan *holding*, waktu pendinginan, tekanan injeksi, kemudian temperatur cetakan. Moayeddián dan Mamedov (2019) meneliti parameter proses (waktu pengisian, *part cooling time*, *pressure holding time*, dan temperatur leleh) yang optimal terhadap *shrinkage*, *warpage*, dan *short shot* dengan model evaluasi kombinasi analisis Taguchi-Fuzzy. Hasilnya, peningkatan waktu pengisian dan *part cooling time* dapat menurunkan tingkat *shrinkage*. Analisis *warpage* didasarkan pada suhu rata-rata pada akhir langkah pengisian. Jika perbedaan suhu antara dua permukaan *mesh shell* tidak seragam, *warpage* dapat terjadi. Penelitian menggunakan *software* SolidWorks dengan *triangular mesh* sebanyak 104604 elemen. Luca et al. (2018) meneliti parameter berpengaruh terhadap *shrinkage* dan *warpage* pada mikrokomponen medis untuk sensor optik menggunakan simulasi pada Moldflow Adviser 2021. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan injeksi, temperatur leleh, dan temperatur cetakan maka nilai *shrinkage* semakin besar. Sedangkan semakin tinggi tekanan *holding* maka semakin rendah nilai *shrinkage*. Semakin tinggi temperatur cetakan maka nilai *warpage* juga semakin tinggi, sedangkan semakin tinggi temperatur leleh injeksi, kecepatan injeksi, dan tekanan *holding* maka nilai *warpage* lebih rendah. Kusić dan Hančić (2016) meneliti parameter proses yang berpengaruh terhadap *shrinkage* dan *warpage* pada spesimen bermaterial 60% polipropilena dan 40% kalsium karbonat, didapatkan bahwa parameter yang paling berpengaruh yaitu tekanan *holding*, diikuti dengan waktu pendinginan, waktu *holding*, temperatur leleh, kecepatan injeksi, dan tekanan injeksi. Huang, et al. (2015) meneliti parameter proses (durasi injeksi, temperatur plastik/bahan yang diinjeksi, temperatur cetakan, tekanan injeksi, tekanan *holding*) optimal terhadap distribusi temperatur *warpage* pada *Auto Lock-Parts*. Semakin kecil durasi injeksi dan temperatur cetakan, maka *warpage* dapat diminimalisir.

Penelitian ini menggunakan software analisis *cetakan flow Computer Aided Engineering (CAE)* dengan metode Taguchi dan model analisis Grey dimana hasil simulasinya dicocokkan dengan produk jadi.

Densitas dan geometri proyektil *frangible* sangat diperhitungkan agar proyektil dapat berfungsi sesuai dengan standarnya. Densitas yang tinggi dibutuhkan agar keakuratan dan kepresisian proyektil saat ditembakkan maksimal, perubahan dimensi yang kecil juga dapat tercapai jika densitas yang tinggi dapat tercapai. Tapi pada saat tertentu, perubahan dimensi dapat meninggi yang diakibatkan *internal stress* yang besar pada molekul material. Tingginya *internal stress* menyebabkan kecacatan *non-uniform shrinkage* yang mana memengaruhi kebulatan dari proyektil. Kebulatan yang baik dapat dicapai dengan meminimalisir *non-uniform shrinkage* yang terjadi pada proyektil. Berdasar pada hipotesis tersebut, dilakukan penelitian dengan tujuan memperoleh besaran parameter proses injeksi yang optimal untuk mendapatkan nilai perubahan dimensi produk dan kebulatan terendah. Berkaca dari penelitian sebelumnya, variabel proses yang dipakai pada penelitian ini yaitu tekanan injeksi dan tekanan *holding*. Untuk melakukan penelitian, *software* Autodesk Moldflow Adviser 2021 digunakan untuk melakukan simulasi proses cetakan injeksi. Setelah parameter proses injeksi optimal didapatkan dari simulasi, dilakukan eksperimen injeksi proyektil untuk mendapatkan data diameter dan kebulatan badan proyektil. Data tersebut diolah menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy supaya mendapatkan nilai parameter proses injeksi terbaik, dilanjutkan dengan ANOVA untuk mengetahui kontribusi parameter proses injeksi terbesar terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, didapatkan rumusan masalah untuk penelitian ini, yaitu:

1. Apakah tekanan injeksi berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil dengan komposisi *stainless steel 304L* dan PA-6?
2. Apakah tekanan *holding* berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil dengan komposisi *stainless steel 304L* dan PA-6?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk menganalisis pengaruh dari tekanan injeksi terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil dengan komposisi *stainless steel 304L* dan PA-6.
2. Untuk menganalisis pengaruh dari tekanan *holding* terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil dengan komposisi *stainless steel 304L* dan PA-6.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan batasan mengenai variabel yang akan diteliti maupun variabel yang akan diasumsikan sehingga bahasan tidak melebar dari tujuan utama. Adapun batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Suhu ruangan diasumsikan sebesar 25°C saat pengukuran dimensi hasil produk cetakan injeksi.
2. Temperatur tempat penyimpanan spesimen dalam proses pengondisian diasumsikan sebesar 25°C.
3. Proses pendinginan cetakan pasca proses injeksi dianggap merata.
4. Komposisi material yang digunakan yaitu 90% *stainless steel 304L* dan 10% PA-6.
5. Pengukuran dilakukan pada bagian *boat-tail* proyektil.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini, yaitu:

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proyektil *Frangible*

Proyektil *frangible* adalah proyektil yang mudah pecah menjadi serpihan kecil ketika mengenai target yang lebih keras agar mencegah terjadinya *ricochet* dan *backsplash*. Pada pengembangannya, material *frangible* dapat diaplikasikan sebagai material proyektil. Proyektil proyektil *frangible* didesain supaya dapat terpecah menjadi bagian-bagian kecil ketika membentur tembok atau permukaan lain yang keras agar mencegah terjadinya pemantulan. Perkembangan proyektil *frangible* tergolong masih baru, hal ini diawali dari penggunaan proyektil standar yang digunakan sesuai dengan jarak tembakan dan kebutuhan perlindungan diri. Dengan munculnya taktik penyelamatan sandera yang lebih modern di tahun 1980-an, lembaga militer dan polisi mencari cara bagaimana meminimalisir resiko dari penggunaan proyektil konvensional. Sehingga salah satu solusi yang dapat diterima adalah penggunaan proyektil *frangible* (Jonas, 2017). Contoh proyektil *frangible* saat masih berbentuk proyektil dan setelah hancur ditunjukkan pada gambar 2.1.

Menurut Nadkarni & Abrams (2003), densitas proyektil *frangible* memiliki kisaran 5,7 g/cm³–8,25 g/cm³. Sedangkan untuk proyektil *frangible* yang sesuai dengan karakteristik uji tembak memiliki densitas dengan kisaran 7,1–8,5 g/cm³. Pada penelitian yang dilakukan S. Kruachatturat, dkk (2009) didapatkan kekuatan tekan yang harus dimiliki oleh proyektil *frangible* berada pada kisaran 31 – 310 MPa. Dengan nilai kekerasan permukaan pada kisaran 54 – 119 HV (Anugraha & Widyastuti, 2014).

Massa total dari fragmen yang ditangkap dibandingkan dengan massa asli proyektil harus dimaksimalkan (minimal 90%) untuk mencapai hasil yang cukup representatif dari evaluasi kerapuhan proyektil. Fragmen yang ditangkap dibagi ke dalam kelas ukuran dari masing-masing fragmen yang dibedakan menggunakan ayakan dengan ukuran mata jaring yang ditentukan. Faktor kerapuhan (*frangibility factor*) dapat ditentukan menurut persamaan berikut (Komenda et al., 2017):

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

Keterangan:

FF_E = faktor kerapuhan

K_{mi} = koefisien kategori i

m_{ci} = massa pecahan proyektil pada kategori i (kg)

m_q = massa awal proyektil (kg)



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

Proyektil *frangible* tentunya perlu memiliki sifat mekanik dan sifat fisik tertentu agar dapat ditembakkan dengan baik. Sifat dan karakteristik proyektil *frangible* ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Mekanik Proyektil *Frangible*

Karakteristik	Nilai	Referensi
Densitas (g/cm ³)	5,7-5,8	(Bélanger et al., 1993)
Kekuatan geser (MPa)	89,63	(Joys et al., 2012)
Kekerasan permukaan (HRB)	21,6 – 22,9	(Mates et al., 2008)
Kekuatan tekan (MPa)	31-310	(Benini, 2000)

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

2.1.1 *Stainless Steel 304L*

Stainless steel 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 (Bramfitt, 2015).

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). SS 304L memiliki komposisi dan sifat yang ditunjukkan pada tabel 2.2:

Tabel 2.2 Komposisi *Stainless Steel 304L*

Unsur	C	Mn	Si	Ni	P	Cr
Kadar (%)	0.08	2.00	1.00	8.0-10.5	0.045	18.0-20.0

2.1.2 *Poliamida-6 (PA-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 (Kim, 2019). Poliamida 6 merupakan polimer berjenis termoplastik 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 (Tg) (Bramfitt, 2015).

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*) (Groover, 2019). Dengan sifat yang dimiliki, poliamida 6 banyak digunakan sebagai *bearing*, roda gigi, poros, *bushing*, *handle*, dan pelapis (*jacketing*) untuk kawat dan kabel (Mates et al., 2008).

2.2 Cetakan Injeksi

Cetakan injeksi merupakan proses memproduksi benda berbahan plastik dengan menginjeksi plastik leleh ke dalam sebuah cetakan yang diinginkan. Terdapat lima proses utama yang dilakukan oleh mesin cetakan injeksi. Proses pertama yaitu memanaskan dan melelehkan plastik. Proses kedua, menginjeksi plastik yang telah dilelehkan menuju cetakan. Proses ketiga, mempertahankan plastik yang telah diinjeksi supaya tidak terjadi *backflow* dan mengurangi terjadinya penyusutan plastik pada saat mengering. Proses keempat, mendinginkan plastik sampai plastik tersebut siap untuk dilepaskan. Proses kelima, cetakan terbuka dan plastik dikeluarkan dari cetakan, lalu menutup kembali untuk proses cetakan selanjutnya (Rosato et al., 2000). Komponen utama pada mesin cetakan injeksi ditunjukkan pada gambar 2.2. Contoh mesin cetakan injeksi vertikal dapat dilihat pada gambar 2.3.

Di dalam mesin injeksi *molding* terdapat 3 bagian utama, yaitu:

1. *Clamping unit*

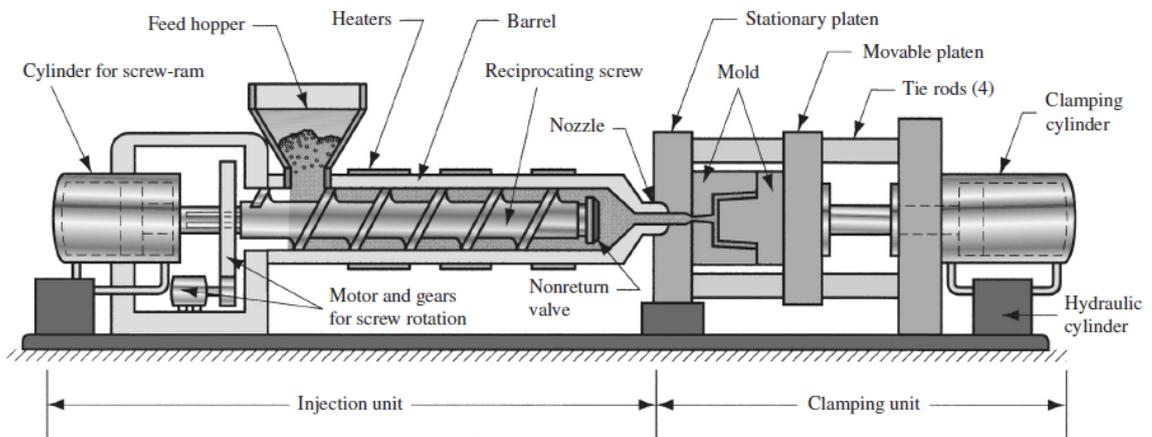
Clamping unit merupakan tempat untuk menyatukan cetakan. *Clamping system* sangat kompleks, dan di dalamnya terdapat cetakan (cetakan), *dwelling* untuk memastikan cetakan terisi penuh oleh resin, *injection* untuk memasukan resin melalui *sprue*, *ejection* untuk mengeluarkan hasil cetakan plastik dari cetakan.

2. *Injection unit*

Injection unit merupakan bagian untuk memasukan pellet plastik (resin) dan pemanasan. Bagian dari *Injection unit*: *hopper* (untuk memasukkan resin); *screw* (untuk mencampurkan material supaya merata); *barrel*; *heater* dan *nozzle*.

3. *Drive unit*

Drive unit untuk melakukan kontrol kerja dari *injection molding*, terdiri dari motor untuk menggerakkan *screw*; *injection piston* menggunakan *hydraulic system* (sistem pompa) untuk mengalirkan fluida dan menginjeksi resin cair ke cetakan.



Gambar 2.2 Bagian Umum Mesin Cetakan Injeksi (Groover, 2019)



Gambar 2.3 Mesin Cetakan Injeksi Vertikal (ENGEL, 2022)

2.2.1 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Proses Cetakan Injeksi

Terdapat banyak parameter proses yang digunakan untuk mengontrol proses (Tsany, 2017) diantaranya sebagai berikut:

1. *Injection time* merupakan waktu pengisian plastik leleh sampai *cavity* terisi penuh oleh lelehan plastik.
2. *Injection pressure* adalah jumlah tekanan yang dibutuhkan untuk mengisi cairan material kedalam rongga cetakan (*mold cavity*).
3. *Clamping force* merupakan gaya cekam mesin, dimana dalam mengatur *clamping force* harus tepat, *clamping force* terlalu besar akan mengakibatkan *air trap* (udara terjebak) di *cavity*, dan sebaliknya ketika terlalu rendah akan mengakibatkan cacat *flash*.
4. *Injection velocity* berfungsi untuk mengatur injeksi material tiap mm/detik-nya.
5. *Holding pressure* adalah tekanan yang dibutuhkan untuk membentuk secara keseluruhan rongga cetak setelah terisi penuh, sampai tekanan akhir selesai dilakukan membentuk produk.
6. *Holding time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk membentuk secara keseluruhan rongga cetak setelah terisi penuh, sampai tekanan akhir selesai dilakukan membentuk produk. *Holding time* berpengaruh terhadap kepadatan produk. Proses *holding* terjadi setelah *injection*. Semakin lama *holding time* maka produk akan lebih padat.
7. *Cooling time* adalah waktu yang diperlukan untuk mendinginkan produk setelah pengisian. Lamanya waktu pendinginan dihitung setelah *holding pressure* sampai waktu membuka.
8. *Barrel temperature* adalah temperatur yang berasal dari elemen pemanas yang dilengkapi dengan *thermocouple* pada bagian *barrel*. *Barrel temperature* ini yang berada diantara *nozzle temperature* dan *hopper temperature*.

2.3 Jenis-jenis Cacat Produk pada Proses Cetakan Injeksi

Dalam membuat produk dengan proses cetakan injeksi menemui banyak kesulitan untuk membuat produk yang sempurna. Hal ini dikarenakan banyak variabel atau parameter proses

cetakan injeksi yang saling berinterkoneksi satu dengan lainnya. Sehingga jika hanya mengoptimasi untuk menghindari satu jenis kecacatan dapat menghasilkan jenis kecacatan yang lain. Terdapat beberapa kecacatan yang dapat terjadi pada proses cetakan injeksi, seperti *shrinkage*, *warpage*, *flash*, *burn marks*, *short shot*, *weld line*, dan *sink mark* (Mahesh Naik et al., 2019).

2.3.1 *Shrinkage*

Shrinkage merupakan perbedaan dimensi dari cetakan dengan produk hasilnya dikarenakan plastik yang diinjeksi mengalami penurunan densitas ketika temperatur dari plastik menurun. *Shrinkage* dapat terjadi saat proses penginjeksian plastik, saat pendinginan di dalam cetakan, dan saat produk berada di luar cetakan selama 24 jam setelah proses injeksi. Karena itu, pengukuran *shrinkage* pada produk hasil injeksi disarankan dilakukan setelah 24 jam dari proses injeksi. *Shrinkage* dapat dirumuskan sebagai persentase dari selisih antara dimensi cetakan (C) dengan dimensi produk (P) dibagi dengan dimensi cetakan.

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

Tabel 2.3 Parameter Berpengaruh terhadap *Shrinkage* (Fischer, 2003).

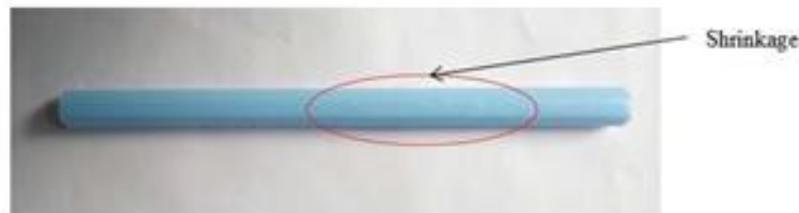
Kenaikan pada parameter proses	Efek terhadap <i>shrinkage</i>
Tekanan injeksi	Berkurang
Kecepatan injeksi	Tidak berpengaruh signifikan
Tekanan <i>holding</i>	Berkurang
Waktu penahanan	Berkurang
Temperatur leleh	Dapat bertambah atau berkurang
Temperatur cetakan	Bertambah
Tekanan penjepit	Dapat berkurang
Kecepatan aliran	Berkurang
Temperatur saat ejsksi	Bertambah
Waktu pendinginan	Berkurang

Shrinkage selalu terjadi pada produk yang diproses melalui cetakan injeksi. Proses injeksi material akan mengikuti persamaan gas ideal, yaitu tekanan dikalikan dengan volume akan sama dengan konstanta gas dikalikan dengan temperatur, $PV = RT$. Material yang diinjeksi dengan tekanan dan temperatur tinggi akan memiliki densitas yang tinggi. Material tersebut akan masuk ke dalam cetakan sehingga terjadinya penurunan tekanan pada bagian tertentu. Bagian yang mengalami penurunan tekanan paling besar akan lebih mudah mengalami penyusutan. Setelah material diinjeksi ke dalam cetakan, material tersebut akan didinginkan sehingga densitasnya akan ikut berkurang. Hal ini mengakibatkan terjadinya penyusutan yang dapat dilihat pada gambar 2.4. Untuk mengurangi efek dari penyusutan tersebut, maka tekanan tetap diberikan pada saat material berhasil memenuhi cetakan dan juga tetap menginjeksikan material tambahan untuk mengurangi efek dari penyusutan tersebut. Jika material tambahan yang diinjeksikan terlalu sedikit, maka *shrinkage* yang terjadi akan semakin banyak. Sedangkan jika terlalu banyak diinjeksikan material tambahan, maka akan terjadi *flash* pada produk. Lalu setelah produk selesai dicetak, *shrinkage* masih akan berlangsung hingga 24 jam ke depan. Hal

ini dikarenakan terjadinya penyusunan ulang molekul dari material dan juga terjadinya pemulihan dari *stress* yang diakibatkan tingginya temperatur pada material selama proses injeksi. Setelah susunan molekul dan *stress* kembali normal, *shrinkage* akan berhenti. Pada tabel 2.3 ditunjukkan beberapa parameter yang mempengaruhi *shrinkage* (Rosato et al., 2000) dan nilai *shrinkage* pada umumnya ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai Umum *Shrinkage* Beberapa Material Termoplastik (Groover, 2019).

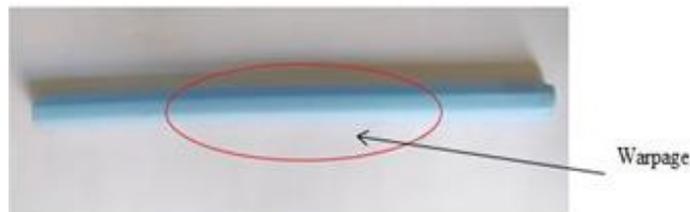
Material plastik	<i>Shrinkage</i> (%)
ABS	0,6
Selulosa asetat	0,5
Nilon-6,6	1,5
Polikarbonat	0,6
Polietilena, densitas tinggi	4,0
Polietilena, densitas rendah	2,0
Polietilen tereftalat	2,3
Polipropilena	1,5
Polistirena	0,5
Polivinilklorida	0,5



Gambar 2.4 *Shrinkage* (Mahesh Naik et al., 2019)

2.3.2 *Warpage*

Warpage adalah perubahan bentuk produk hasil injeksi dikarenakan adanya perbedaan *shrinkage* pada beberapa bagian dalam produk. Hal ini berakibat pada kecacatan produk dimana sebagian daerah pada produk melengkung atau memutar yang dapat mengubah bentuk dan ukuran dari produk seperti pada gambar 2.5. Hal ini tidak diinginkan pada produk hasil injeksi, terutama pada produk yang memiliki toleransi tinggi. Perbedaan *shrinkage* juga menghasilkan adanya perbedaan tekanan pada produk sehingga tekanan yang lebih besar bisa menarik bagian dengan tekanan yang lebih kecil dan membelokkan dapat terjadi.



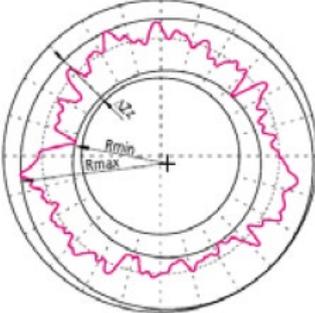
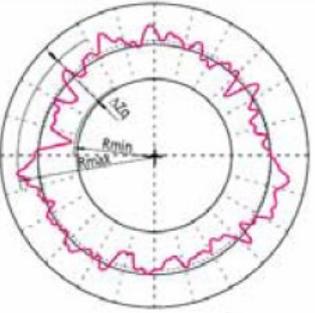
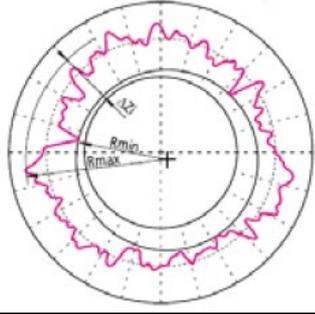
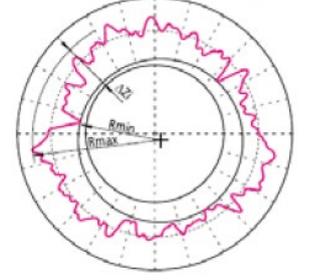
Gambar 2.5 *Warpage* (Mahesh Naik et al., 2019)

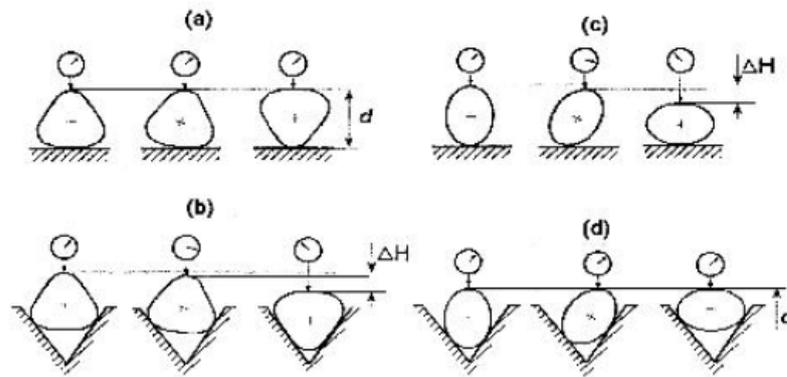
2.4 Kebulatan

Salah satu jenis toleransi geometri untuk mengukur penyimpangan pada produk berbentuk lingkaran yaitu kebulatan. Pada umumnya suatu profil kebulatan dikatakan bulat sempurna bila jarak titik-titik yang terdapat pada bentuk geometrik tersebut memiliki jarak yang

sama terhadap sebuah titik yang disebut dengan titik pusat. Suatu profil kebulatan dikatakan tidak bulat sempurna jika terjadi ketidakbulatan yang ditandai dengan adanya perbedaan jarak antara titik-titik pada bentuk geometrik tersebut terhadap titik pusatnya. ISO/R 1101 mendefinisikan toleransi kebulatan sebagai daerah toleransi pada bidang penampang yang dibatasi oleh dua lingkaran konsentris dengan selisih radius sebesar harga toleransinya (Yanis, 2010).

Tabel 2.5 Metode Pengukuran Penyimpangan Kebulatan (Sui & Zhang, 2012)

Jenis Toleransi Geometri	Keterangan
<p data-bbox="363 562 719 595"><i>Minimum Zone Circle (MZC)</i></p> 	<p data-bbox="863 618 1433 887">Dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Titik tengah dari lingkaran minimum tersebut disebut dengan <i>minimum zone center</i> (MZC). Sedang ketidakbulatan adalah selisih radius kedua lingkaran tersebut dan dinamakan <i>minimum radial zone</i> (MRZ).</p>
<p data-bbox="368 943 715 976"><i>Least Squares Circles (LSC)</i></p> 	<p data-bbox="863 958 1433 1294">Merupakan lingkaran yang ditentukan berdasarkan profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jumlah kuadrat jarak dari sejumlah titik dengan interval sudut yang sama pada profil kebulatan ke lingkaran referensi adalah paling kecil. Titik tengah lingkaran kuadrat terkecil dinamakan <i>least square center</i> (LSC). Jarak radial harga mutlak rata-rata antara profil kebulatan dengan lingkaran kuadrat terkecil disebut <i>mean line average</i> (MLA).</p>
<p data-bbox="341 1312 746 1346"><i>Maximum Inscribed Circle (MIC)</i></p> 	<p data-bbox="863 1424 1433 1592">Merupakan lingkaran terbesar yang mungkin dibuat di dalam profil kebulatan tanpa memotong profil tersebut. Ketidakbulatan sama dengan jarak radial dari lingkaran tersebut ke tonjolan yang paling luar.</p>
<p data-bbox="309 1671 778 1704"><i>Minimum Circumscribed Circle (MCC)</i></p> 	<p data-bbox="863 1697 1433 1966">Dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Titik tengah dari lingkaran minimum tersebut disebut dengan <i>minimum zone center</i> (MZC). Sedang ketidakbulatan adalah selisih radius kedua lingkaran tersebut dan dinamakan <i>minimum radial zone</i> (MRZ).</p>



Gambar 2.6 Pengukuran Kebulatan dengan *V-Block* (60°) dan Jam Ukur Tidak Selalu Menunjukkan Adanya Ketidakbulatan (Yanis, 2010)

Pengukuran kebulatan dapat dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang memiliki dua sensor yang saling bertolak belakang (180°) atau tiga sensor menggunakan *v-block* (*v-block* dengan sudut 60°) dan jam ukur. Pada gambar 2.6 dapat dilihat skema pengukuran kebulatan dengan *V-block*. Terdapat empat jenis metode untuk mengukur kebulatan yang ditunjukkan pada tabel 2.5.

2.5 Material Komposit

Komposit merupakan bahan multifase yang dibuat secara artifisial, berlawanan dengan terbentuk secara alami. Selain itu, fase penyusunnya harus berbeda secara kimiawi dan dipisahkan oleh antarmuka yang berbeda. Dalam merancang material komposit, berbagai logam, keramik, dan polimer digabungkan untuk menghasilkan generasi baru bahan dengan karakteristik yang sesuai yang diinginkan. Kebanyakan komposit telah dibuat untuk meningkatkan kombinasi karakteristik mekanik seperti kekakuan, ketangguhan, dan kuat terhadap suhu lingkungan yang tinggi.

Material komposit terdiri dari dua buah penyusun, yaitu *filler* (bahan pengisi) dan matriks. Adapun definisi dari keduanya adalah sebagai berikut:

1. *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, biasanya berupa serat atau serbuk. Serat yang sering digunakan dalam pembuatan komposit antara lain serat E-glass, boron, karbon dan lain sebagainya. Bisa juga dari serat alam antara lain serat kenaf, jute, rami, cantula dan lain sebagainya.
2. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Fungsi dari matriks dalam komposit antara lain:
 - a. Mengikat serat menjadi satu kesatuan struktur.
 - b. Melindungi serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan.
 - c. Mentransfer dan mendistribusikan beban ke serat.
 - d. Menyumbangkan beberapa sifat seperti, kekakuan, ketangguhan dan tahanan listrik.

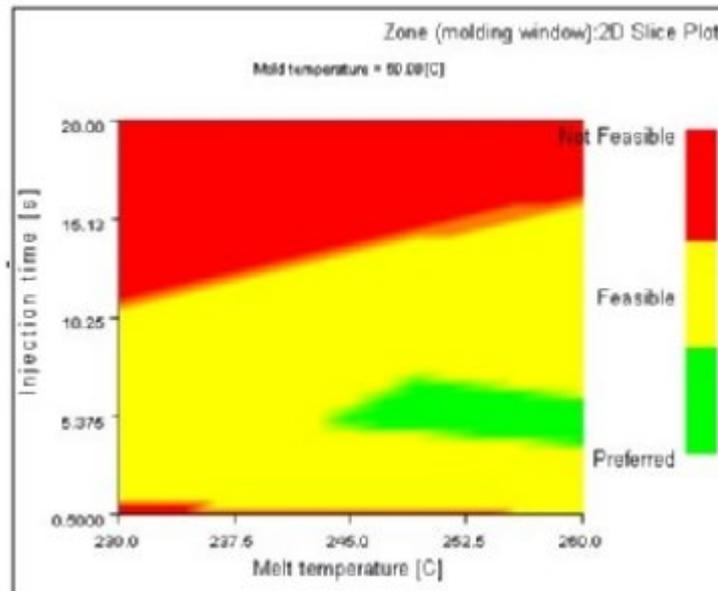
Sifat-sifat komposit merupakan fungsi dari sifat-sifat fasa penyusunnya, jumlah relatifnya, dan geometri fasa terdispersinya. Geometri fasa terdispersi dalam konteks ini berarti bentuk partikel dan ukuran partikel, distribusi, dan orientasi (Callister & Rethwisch, 2010).

2.6 Autodesk Moldflow Adviser 2021

Software simulasi dapat membantu proses cetakan injeksi karena dapat memperkirakan proses injeksi yang sebenarnya, sehingga *trial and error* pada proses cetakan injeksi dapat dikurangi. Dari hasil simulasi didapatkan parameter proses cetakan injeksi yang terbaik, sehingga pengaturan proses eksperimen cetakan injeksi lebih siap dan produk yang ingin dibuat sudah optimal (Rosato et al., 2000).

Autodesk Moldflow Adviser 2021 merupakan salah satu *software* yang dapat mensimulasikan proses cetakan injeksi. Dengan *software* ini, parameter-parameter proses injeksi terbaik bisa didapatkan untuk digunakan langsung pada mesin cetakan injeksi. Hal pertama untuk mensimulasikan proses injeksi pada *software* ini yaitu mengimpor geometri bentuk produk yang ingin diinjeksi, kemudian dimensi dan *gate* cetakan diatur pada *software*. Setelah cetakan selesai didesain, material untuk produk dan cetakan ditentukan sesuai dengan *database* yang tersedia pada *software*.

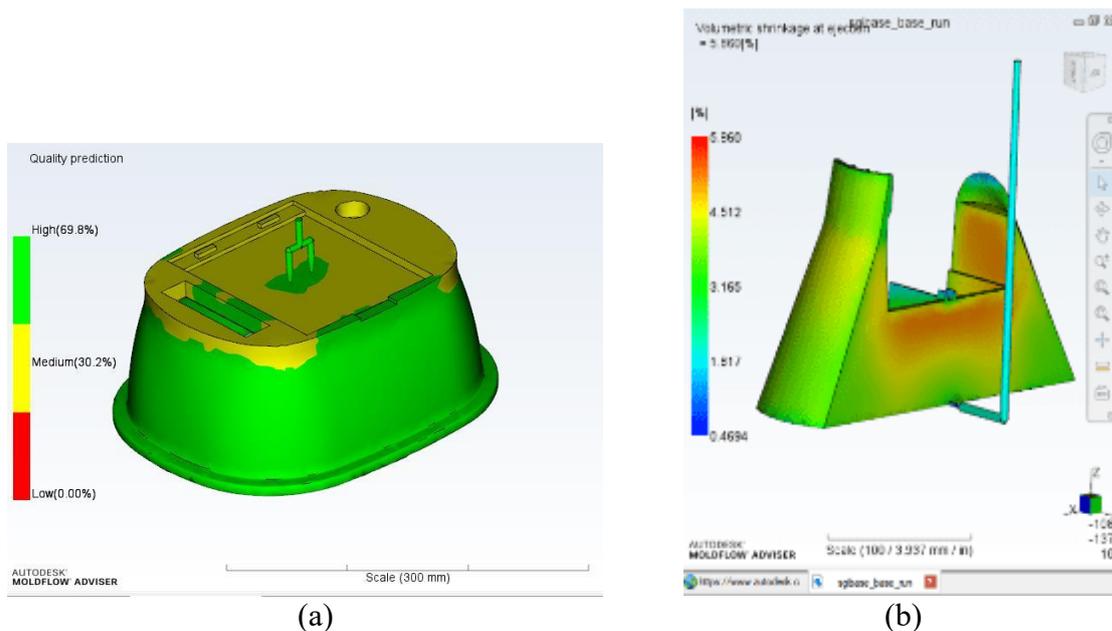
Setelah material ditetapkan, analisis “*molding window*” dijalankan untuk mendapatkan parameter proses terbaik, seperti waktu injeksi, temperatur cetakan, dan temperatur leleh material dengan memperhatikan dimensi cetakan, lokasi injeksi, dan juga tekanan injeksi maksimal yang diinginkan. Hasil analisis memperlihatkan kondisi dalam tiga jenis, yaitu warna merah, kuning, dan hijau seperti pada gambar 2.7 dengan keterangan warna dapat dilihat pada tabel 2.6.



Gambar 2.7 Hasil Simulasi Analisis “*Molding Window*” (Autodesk, 2021)

Tabel 2.6 Keterangan Warna pada Hasil Analisis “*Molding Window*” (Autodesk, 2021)

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



Gambar 2.8 (a) Hasil Prediksi Kualitas Produk dan (B) Prediksi *Shrinkage* pada Produk (Autodesk, 2021)

Pada *software* ini terdapat analisis lainnya, yaitu “*Fill + Pack*” yang dapat dijalankan bersamaan dengan parameter hasil dari analisis “*Molding Window*”. Analisis “*Fill + Pack*” menghasilkan prediksi adanya penurunan tekanan saat proses injeksi, *shrinkage*, prediksi kualitas produk, *weld lines*, dan lokasi *air trap*. Selain itu, didapatkan juga rekomendasi parameter proses injeksi seperti tekanan injeksi dan tekanan *holding* aktual, waktu injeksi aktual, dan waktu pendinginan (Autodesk, 2021). Pada gambar 2.8 dapat dilihat contoh prediksi kualitas produk dan keterangan warnanya ditunjukkan pada tabel 2.7.

Tabel 2.7 Keterangan Hasil Prediksi Kualitas Produk (Autodesk, 2021)

Hasil	Pengertian
<i>High Quality</i>	<ul style="list-style-type: none"> Semua faktor yang mempengaruhi kualitas produk diterima.
<i>Medium Quality</i>	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan tekanan injeksi yang lebih besar. Temperatur leleh atau cetakan yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dari rekomendasi. Waktu pendinginan terlalu lama yang mengakibatkan masalah saat proses <i>holding</i>. Nilai <i>shear rate</i> dan <i>shear stress</i> melebihi batas rekomendasi material.
<i>Low Quality</i>	<ul style="list-style-type: none"> Terjadi <i>Pressure drop</i> yang lebih besar dari 80% tekanan injeksi. Temperatur leleh atau cetakan di luar dari batas minimum material. Waktu pendinginan terlalu lama yang mengakibatkan masalah saat proses <i>holding</i>. Nilai <i>shear rate</i> dan <i>shear stress</i> melebihi batas rekomendasi material.

2.7 Desain Eksperimen Metode Taguchi

Metode Taguchi diaplikasikan oleh perusahaan-perusahaan manufaktur Jepang dalam rangka memperbaiki kualitas produk dan proses. Penekanan lebih diutamakan pada rancangan

kualitas pada produk dan proses, bukan pada taraf inspeksi pada produk. Metode Taguchi bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional. Sedangkan sasarannya, yaitu menjadikan produk memiliki sifat yang kokoh (*robust*) terhadap faktor gangguan (*noise*) atau disebut juga dengan *robust design*.

Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain:

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu. Di bawah ini merupakan desain eksperimen metode Taguchi (Soejanto, 2009).

a. Derajat Kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk mendapatkan jumlah minimum percobaan yang harus dilakukan dalam meneliti faktor yang diamati, sehingga bisa membantu menentukan dan mendesain matriks ortogonal. Bentuk persamaan umum derajat kebebasan yaitu sebagai berikut:

- 1) Derajat kebebasan *orthogonal array* (V_{OA}) untuk menentukan jumlah eksperimen yang diamati yaitu:

$$V_{OA} = \text{banyak eksperimen} - 1 \quad (2.3)$$

- 2) Derajat kebebasan faktor dan level (V_{fl}) untuk menghitung jumlah level yang diuji atau diadakan pengamatan pada sebuah faktor dengan sebagai berikut:

$$V_{fl} = \text{banyak tingkatan eksperimen} - 1 \quad (2.4)$$

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

$$\text{Total } V_{fl} = (\text{banyak faktor eksperimen}) \cdot (V_{fl}) \quad (2.5)$$

b. Matriks Ortogonal

Taguchi menyarankan penggunaan matriks ortogonal untuk membuat desain parameter seperti pada Tabel 2.8. Pemilihan matriks ortogonal bergantung pada nilai faktor dan interaksi yang diharapkan dari nilai tingkatan pada tiap faktor (Ross, 1989). Matriks ortogonal berkemampuan untuk mengevaluasi sejumlah variabel dengan jumlah eksperimen yang minimum dengan persamaan sebagai berikut (Soejanto, 2009).

$$L_a b^c \quad (2.6)$$

Keterangan:

- L = rancangan bujur sangkar latin
a = banyak baris eksperimen
b = banyak tingkatan (level) eksperimen

c = banyak faktor atau variabel proses

Hasil penelitian yang lebih teliti dapat diperoleh dengan eksperimen yang dilakukan berulang kali. Pengulangan eksperimen tersebut yaitu dengan cara membuat replikasi dan randomisasi berdasarkan rancangan matriks ortogonal yang sudah dipilih.

Tabel 2.8 Pemilihan Matriks Ortogonal (Soejanto, 2009)

Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
L ₄ (2 ³)	L ₉ (3 ⁴)	L ₁₆ (4 ⁵)	L ₂₅ (5 ⁶)
L ₈ (2 ⁷)	L ₂₇ (3 ¹³)	L ₆₄ (4 ²¹)	-
L ₁₂ (2 ¹¹)	L ₈₁ (3 ⁴⁰)	-	-
L ₁₆ (2 ¹⁵)	-	-	-
L ₃₂ (2 ³¹)	-	-	-
L ₆₄ (2 ⁶³)	-	-	-

c. Replikasi

Replikasi merupakan pengulangan kembali untuk perlakuan yang sama dalam suatu percobaan dengan kondisi yang sama supaya memperoleh ketelitian yang lebih tinggi. Fungsi dari replikasi antara lain, mengurangi tingkat kesalahan percobaan, menambah ketelitian data percobaan, dan mendapatkan harga estimasi kesalahan percobaan. Hal ini bertujuan untuk memungkinkan diadakan uji signifikansi hasil eksperimen.

d. Randomisasi

Randomisasi merupakan pengacakan urutan percobaan dengan perlakuan yang sama. Tujuan dari randomisasi yaitu untuk meratakan pengaruh dari faktor- faktor yang tidak dapat dikendalikan, seperti kelelahan operator dan naik turunnya daya mesin. Selain itu juga dapat memberikan kesempatan yang sama pada semua unit percobaan untuk menerima suatu perlakuan, sehingga diharapkan ada kehomogenan pengaruh pada tiap perlakuan yang sama.

e. Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N bergantung pada jenis karakteristik kualitas, yaitu (J. L. Lin & Lin, 2002):

1) Semakin kecil semakin baik

Merupakan karakteristik kualitas dengan batas nilai nol dan non-negatif, sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.7)$$

2) Tertuju pada nilai tertentu

Merupakan karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas, sehingga nilai yang semakin mendekati target adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.8)$$

3) Semakin besar semakin baik

Merupakan karakteristik kualitas dengan rentang nilai tidak terbatas dan non-negatif, sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.9)$$

2.8 Grey Relational Analysis

Grey relational analysis merupakan suatu metode yang digunakan dalam melakukan optimasi multirespon. Hal ini dilakukan dengan cara penggabungan beberapa respon menjadi satu respon. Penggabungan beberapa respon dapat dilakukan menggunakan *fuzzy logic*. Pengubahan input menjadi bilangan *fuzzy* dengan analisis *grey relational* yang merupakan pendekatan untuk mengubah optimasi kedalam bentuk *grey-fuzzy* (Das et al., 2016).

Langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan optimasi dengan metode *grey-fuzzy* antara lain, normalisasi data respon, menentukan GRA, menggunakan fungsi keanggotaan (*fuzzification*), mengaplikasikan *fuzzy rules*, *defuzzification* dan menentukan kombinasi parameter yang optimum.

a. Normalisasi Data Respon

Proses normalisasi dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respon rasio S/N. Karakteristik respon tersebut meliputi, lebih besar lebih baik (*larger is better*), lebih kecil lebih baik (*smaller is better*) dan tertuju pada nilai tertentu (*nominal is best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi adalah sebagai berikut (Bhattacharya & Bepari, 2014).

Persamaan untuk respon normalisasi dengan karakteristik “lebih besar lebih baik”:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (2.10)$$

Persamaan untuk respon normalisasi dengan karakteristik “lebih kecil lebih baik”:

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

Persamaan untuk respon normalisasi dengan karakteristik “tertuju pada nilai tertentu”:

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i^o(k) - x_i^o|}{\max x_i^o(k) - x_i^o} \quad (2.12)$$

Keterangan:

$x_i^*(k)$	= nilai normalisasi rasio S/N ke- i pada respon eksperimen ke- k
$x_i^o(k)$	= nilai rasio S/N ke- i pada respon eksperimen ke- k
$\max x_i^o(k)$	= nilai terbesar dari rasio S/N
$\min x_i^o(k)$	= nilai terkecil dari rasio S/N
$x_i^o(k)$	= nilai target dari $x_i^o(k)$

b. *Grey Relational Coefficient*

Grey relational coefficient (GRC) merupakan suatu hubungan antara kondisi yang ideal dengan kondisi aktual dari respon yang telah dinormalisasi. GRC akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Nilai GRC yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai GRC yaitu (Bhattacharya & Bepari, 2014; Das et al., 2016):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{o,i}(k) + \zeta\Delta_{max}} \quad (2.13)$$

$$\Delta_{o,i}(k) = |x_o^*(k) - x_i^*(k)| \quad (2.14)$$

Keterangan:

$\xi_i(k)$ = nilai koefisien *grey relational* ke- i pada respon eksperimen ke- k

$\Delta_{o,i}(k)$ = nilai *deviation sequence*, yang merupakan nilai mutlak dari perbedaan antara nilai x_o^* dan x_i^* pada respon eksperimen ke- k

$x_o^*(k)$ = nilai terbesar dari normalisasi rasio S/N yang dikonversikan senilai 1

Δ_{min} = nilai minimum dari $\Delta_{o,i}(k)$

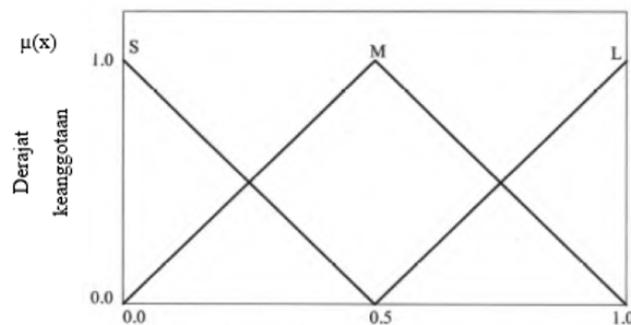
Δ_{max} = nilai maksimum dari $\Delta_{o,i}(k)$

ζ = identifikasi koefisien atau perbedaan koefisien yang bernilai antara 0 hingga 1. Nilai ini ditentukan oleh peneliti terhadap harapannya, umumnya nilai ζ sebesar 0,5.

c. *Logika Fuzzy*

Teori himpunan *fuzzy* yang diusulkan Prof. Lotfi Zaedah pada tahun 1960 untuk menghitung derajat yang tidak terbatas jumlahnya antara benar dan salah. Teori ini merupakan metode dalam menganalisis sistem yang kompleks agar memperoleh keputusan dari pola yang tak tentu. Pola tersebut disebabkan oleh variabilitas kabur (*ke-fuzzy-an*) dari keacakan (*random*). Variabel yang bersifat kabur dalam logika *fuzzy* direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai tegas (*crisp*) dan derajat keanggotaan (*membership function*) (Pal & Majumder, 1989).

d. *Fuzzification*



Gambar 2.9 Fungsi Keanggotaan Respon sebagai Variabel Input (Chen et al., 2008)

Fuzzification merupakan proses perubahan *input* menjadi bilangan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Fungsi keanggotaan tersebut merupakan suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik yang semula data *input* menjadi derajat keanggotaan. Interval nilai keanggotaan yang digunakan yaitu antara nol sampai satu (Das et al., 2016; Sharma et al., 2014). Pendekatan fungsi digunakan sebagai salah satu cara supaya

mendapatkan nilai keanggotaan. Terdapat dua fungsi keanggotaan yang biasa digunakan dalam penelitian, yaitu fungsi keanggotaan kurva segitiga dan kurva trapesium. Pada Gambar 2.9 dapat dilihat bentuk fungsi keanggotaan kurva segitiga (Chen et al., 2008).

e. *Fuzzy Rules*

Fuzzy rules merupakan aturan yang menyatakan tentang hubungan antara masing- masing variabel *input* menjadi variabel *output* (Sharma et al., 2014). *Fuzzy rules* dibuat berdasarkan pengelompokkan data dengan bentuk aturan *if-then* (jika-maka) seperti yang dicontohkan sebagai berikut (Das et al., 2016).

Aturan ke- 1: Jika ξ_1 adalah A_1 , ξ_2 adalah B_1 dan ξ_3 adalah C_1 , maka η adalah D_1

Aturan ke- 2: Jika ξ_1 adalah A_2 , ξ_2 adalah B_2 dan ξ_3 adalah C_2 , maka η adalah D_2 .

dan seterusnya, hingga

Aturan ke- n: Jika ξ_1 adalah A_n , ξ_2 adalah B_n dan ξ_3 adalah C_n , maka η adalah D_n .

Notasi ξ_1 , ξ_2 dan ξ_3 adalah derajat keanggotaan atau himpunan keanggotaan dari *grey relational coefficient*. Nilai A, B dan C akan menghasilkan η yang merupakan himpunan *fuzzy* berdasarkan ketetapan himpunan keanggotaan. Adapun D_n adalah *Grey-fuzzy reasoning grade* (GFRG) yang merupakan *output* dari himpunan *fuzzy*.

f. Kombinasi Parameter dan Nilai GFRG

Makin besar nilai GFRG, maka semakin baik respon dari proses pada kombinasi parameter tersebut. Nilai prediksi GFRG berdasarkan kombinasi level parameter untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dirumuskan sebagai berikut (Soepangkat & Pramujati, 2013):

$$\hat{y} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \tag{2.15}$$

Keterangan:

γ_m = nilai rata-rata keseluruhan GFRG

$\bar{\gamma}_i$ = rata-rata GFRG pada level optimum

q = jumlah parameter yang memengaruhi respon secara signifikan

2.9 Analisis Variansi

Analisis variansi merupakan teknik analisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik (Soejanto, 2009). Analisis ini dilakukan dengan cara menguraikan semua variansi terhadap bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga kontribusi faktor dapat diidentifikasi, sehingga akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan atas dasar perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANOVA (*Analysis of Variance*) terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (DF), jumlah kuadrat (*sum of square* [SS]), kuadrat tengah (*mean of square* [MS]), dan F_{hitung} seperti ditunjukkan pada tabel 2.9.

Setelah analisis variansi dilakukan, *p-value* dan persen kontribusi dari tiap faktor dapat dihitung. *P-value* digunakan pada uji hipotesis dengan membandingkan dengan level signifikansi yang sudah ditentukan, jika nilai *p-value* lebih rendah dari nilai level signifikansi, maka faktor dari eksperimen penelitian dikatakan berpengaruh terhadap respon penelitian. Persen kontribusi merupakan besar pengaruh dari faktor eksperimen penelitian terhadap respon penelitian.

Tabel 2.9 Tabel Analisis Variansi (ANOVA)

Sumber variasi	DF	SS	MS	F _{hitung}	Kontribusi
Faktor A	DF _A	SS _A	MS _A	F _A	$\%A = \frac{SS_A}{SS_T}$
Faktor B	DF _B	SS _B	MS _B	F _B	$\%B = \frac{SS_B}{SS_T}$
Error	DF _{error}	SS _{error}	MS _{error}		100% - %A - %B
Total	DF _T	SST			100%

Keterangan:

$$DF_T = \text{derajat kebebasan total} = N - 1 \quad (2.16)$$

$$DF_A = \text{derajat kebebasan faktor A} = k_A - 1 \quad (2.17)$$

$$DF_B = \text{derajat kebebasan faktor B} = k_B - 1 \quad (2.18)$$

$$DF_{\text{error}} = \text{derajat kebebasan error} = DF_T - DF_A - DF_B \quad (2.19)$$

$$T = \text{jumlah keseluruhan} = \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.20)$$

$$SS_T = \text{jumlah kuadrat total} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.21)$$

$$SS_A = \text{jumlah kuadrat faktor A} = ka \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.22)$$

$$SS_B = \text{jumlah kuadrat faktor B} = kb \sum_{j=1}^b (y_j - \bar{y})^2 \quad (2.23)$$

$$SS_{\text{error}} = \text{jumlah kuadrat error} = SS_T - SS_A - SS_B \quad (2.24)$$

$$MS_A = \text{kuadrat tengah faktor A} = \frac{SS_A}{DF_A} \quad (2.25)$$

$$MS_B = \text{kuadrat tengah faktor B} = \frac{SS_B}{DF_B} \quad (2.26)$$

$$MS_{\text{error}} = \text{kuadrat tengah error} = \frac{SS_{\text{error}}}{v_{\text{error}}} \quad (2.27)$$

Dimana:

k_A = banyak level faktor A

k_B = banyak level faktor B

N = banyak total eksperimen

2.10 Uji Konfirmasi

Uji konfirmasi adalah suatu percobaan yang menggunakan kombinasi level variabel proses hasil optimasi. Tujuan dari percobaan konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahapan sebelumnya. Pertama, mencari estimasi rata-rata GFRG menggunakan nilai GFRG optimum pada tahap sebelumnya. Perhitungan estimasi rata-rata GFRG dapat dirumuskan sebagai berikut (Soepangkat & Pramujati, 2013):

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^a \hat{\gamma}_i - \gamma_m \quad (2.28)$$

Keterangan:

- γ_m = total rata-rata GFRG
- $\hat{\gamma}_i$ = rata-rata GFRG pada tingkat optimum
- i = jumlah parameter proses pada eksperimen

Selanjutnya menentukan interval keyakinan yang digunakan untuk mengetahui bahwa eksperimen yang dilakukan valid (masih di dalam batas interval keyakinan). Perhitungan interval keyakinan dapat dirumuskan sebagai berikut (Blank, 1980):

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;v1,v2} MS_E \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (2.29)$$

Keterangan:

- $F_{\alpha;v1,v2}$ = Nilai F-ratio dari tabel
- α = Level signifikansi (0,05)
- $v1$ = 1
- $v2$ = Derajat kebebasan dari *error*
- MS_E = *Mean square error*
- n_{eff} = Jumlah pengamatan efektif
- r = Jumlah uji konfirmasi

2.11 Penelitian Pendahuluan

C.-M. Lin & Chen (2021) melakukan penelitian mengenai optimasi parameter injeksi untuk meminimalisir eror kebulatan dan konsentrisitas yang disebabkan *shrinkage* dengan simulasi *software*. Spesimen yang diteliti yaitu teleskop (lensa telesentris) bermaterial poliamida (PA66). Penelitian ini menggunakan Moldex3D sebagai *software* simulasinya dengan desain eksperimen Taguchi untuk menentukan parameter injeksi optimal.

Dari hasil simulasi berdasarkan desain eksperimen Taguchi diperoleh kontribusi terbesar parameter injeksi terhadap kebulatan dan konsentrisitas secara berurut yaitu temperatur leleh material, tekanan *holding*, waktu pendinginan, tekanan injeksi, kemudian temperatur cetakan. Tabel 2.10 menunjukkan desain model simulasi yang digunakan dengan keterangan nilai yang ditebalkan merupakan parameter injeksi optimal.

Tabel 2.10 Parameter Proses Injeksi Penelitian C.-M. Lin & Chen (2021)

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

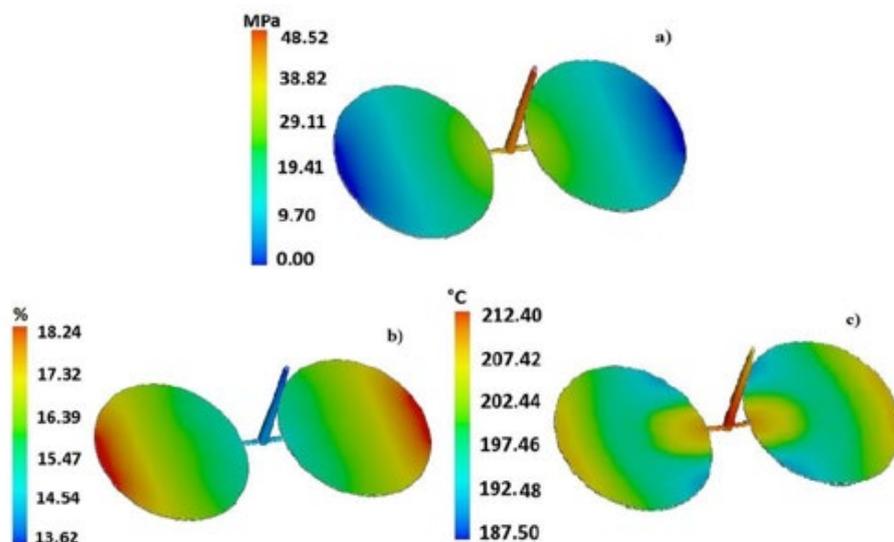
Moayyedien & Mamedov (2019) dalam penelitiannya menentukan parameter proses terbaik untuk mencari nilai *shrinkage*, *warpage*, dan *short shot* terendah melalui optimasi proses multi-tujuan dan simulasi numerik dengan model evaluasi kombinasi analisis Taguchi-Fuzzy. Spesimen yang diteliti yaitu dua komponen silinder dengan diameter 100 mm dan tebal 1 mm dengan material polipropilena. SolidWorks Plastic Software digunakan untuk menjalankan simulasi injeksi. Parameter injeksi yang dijadikan variabel bebas yaitu kecepatan pengisian injeksi, waktu pendinginan, waktu *holding*, dan temperatur leleh material.

Keseriusan setiap cacat dinilai dengan evaluasi *fuzzy* pada lima tingkat yang berbeda dan ditentukan dengan menggunakan istilah linguistik. Dalam penelitian ini, kombinasi metode Taguchi digunakan untuk menetapkan desain eksperimen. Lima variabel input, yang berisi parameter geometrik dan proses, dalam tiga level berbeda dipilih untuk desain eksperimen yang ditunjukkan pada tabel 2.11.

Tabel 2.11 Parameter Proses Injeksi dalam Tiga Level pada Penelitian Moayyedien & Mamedov (2019)

Parameter	Level		
	1	2	3
Tipe <i>gate</i>	1	2	-
Waktu pengisian injeksi (s)	0,2	0,6	1
Waktu pendinginan (s)	3	3,9	5
Waktu <i>holding</i> (s)	1	2	3
Temperatur leleh material (°C)	200	230	280

Peningkatan waktu pengisian injeksi dan waktu pendinginan secara signifikan menurunkan tingkat *shrinkage*. Analisis *warpage* didasarkan pada suhu rata-rata pada akhir langkah pengisian. Jika perbedaan suhu antara dua permukaan *mesh shell* tidak seragam, *warpage* dapat terjadi. Pada gambar 2.10 ditunjukkan hasil simulasi produk.



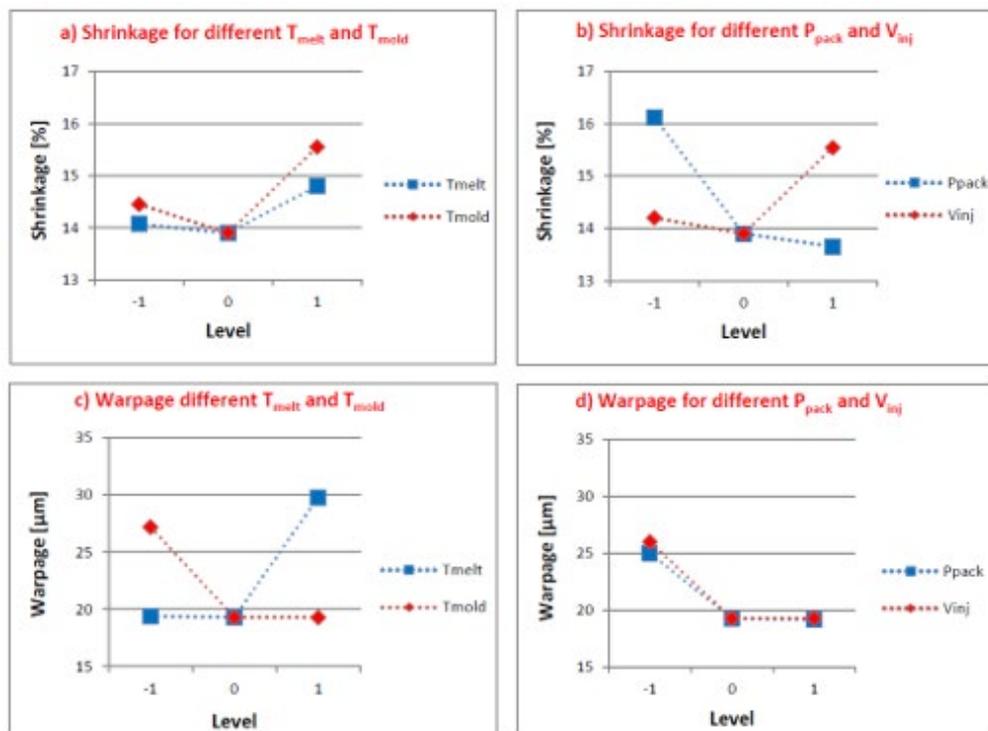
Gambar 2.10 Hasil Simulasi (a) *Short Shot*, (b) *Shrinkage*, dan (c) *Warpage* (Moayyedien & Mamedov, 2019)

Penelitian yang dilakukan Luca et al. (2018) memprediksi kecacatan *shrinkage* dan *warpage* pada mikrokomponen medis melalui simulasi numerik menggunakan *software* Moldflow Adviser 2021. Material yang digunakan adalah polimer termoplastik dengan koefisien gesekan dan keausan geser yang sangat rendah dengan permukaan logam halus (*uncolored* POM N23200035). Parameter injeksi yang dijadikan variabel bebas adalah temperatur leleh material, temperatur cetakan, kecepatan injeksi, dan tekanan *holding*. Desain parameter untuk simulasi ditunjukkan pada tabel 2.12 dengan keterangan nilai yang ditebalkan merupakan parameter optimal.

Nilai minimum *shrinkage* (13,9%) dan *warpage* (19,2 μm) diperoleh untuk percobaan 4, sedangkan nilai maksimum (16,23% dan 29,9 μm) untuk percobaan 5 dan 2 berturut-turut. Dimungkinkan untuk melihat variasi yang relatif lebih tinggi dalam *warpage* daripada *shrinkage* untuk parameter proses yang berbeda.

Tabel 2.12 Desain Simulasi Penelitian Luca et al. (2018)

Simulasi	Temperatur leleh ($^{\circ}\text{C}$)	Tekanan <i>holding</i> (bar)	Temperatur cetakan ($^{\circ}\text{C}$)	Kecepatan injeksi (mm/s)
1	210	200	90	175
2	230	200	90	175
3	190	200	90	175
4	210	300	90	175
5	210	100	90	175
6	210	200	110	175
7	210	200	70	175
8	210	200	90	250
9	210	200	90	100



Gambar 2.11 Grafik Hasil Simulasi Analisis *Shrinkage* [(a) dan (b)] dan *Warpage* [(c) dan (d)] untuk Parameter Injeksi (Luca et al., 2018)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan injeksi, suhu leleh dan suhu cetakan memiliki pengaruh yang sama pada efek *shrinkage*. Nilai yang lebih tinggi dari parameter ini menyebabkan *shrinkage* volumetrik rata-rata yang lebih tinggi, yang mungkin dikarenakan tingkat pemadatan yang tidak konsisten selama proses pemadatan antara rongga dan sisi inti mold untuk bagian berdinding tipis. Berdasarkan gambar 2.11, peningkatan suhu cetakan dan suhu leleh material menunda waktu pendinginan *gate* yang mengurangi *shrinkage* sembari meningkatkan *shrinkage* termal setelah ejsksi. Tekanan *holding* didapatkan sebagai parameter paling berpengaruh terhadap efek *shrinkage*. Tekanan *holding* yang lebih tinggi menghasilkan *shrinkage* volumetrik yang lebih rendah, sedangkan tekanan *holding* yang lebih rendah disertai dengan laju aliran yang rendah mengakibatkan pertumbuhan lapisan beku yang cepat dan menyebabkan *shrinkage* volumetrik yang lebih tinggi.

Parameter injeksi yang menyebabkan variasi *warpage* tertinggi adalah temperatur cetakan. Nilai *warpage* yang lebih tinggi diperoleh pada arah orthogonal terhadap aliran selama fase injeksi (arah X) sedangkan nilai yang lebih rendah seiring dengan ketebalan rongga bagian mikro (arah Z).

Kc et al. (2016) 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*. Bahan yang digunakan pada penelitian tersebut adalah pelet biokomposit yang berasal dari serat sisal, serat kaca dan PP. Pelet biokomposit dicetak menjadi produk plakat berbentuk persegi panjang. Sewaktu melakukan proses cetak sistem injeksi, setiap pengaturan kondisi proses tersebut dilakukan penstabilan suhu selama 5 menit untuk pencetakan selanjutnya. Sampel cetakan pertama dan kedua dibuang, lalu sampel ketiga yaitu sampel terakhir yang digunakan untuk pengukuran *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. Pada tabel 2.13 ditunjukkan rancangan parameter eksperimen injeksi dengan nilai yang ditebalkan merupakan parameter optimal.

Tabel 2.13 Parameter Optimal Injeksi pada Penelitian Kc et al. (2016)

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

Kusić & Hančič (2016) meneliti *shrinkage* dan *warpage* pada spesimen D2 ISO standar dengan material polipropilena 60% dengan kalsium karbonat (CaCO₃) 40% melalui eksperimen

pada mesin cetakan injeksi KraussMaffei (KM80SP380CX) dengan metode Taguchi. Parameter injeksi yang dijadikan variabel bebas yaitu temperatur leleh, kecepatan injeksi, tekanan injeksi, tekanan *holding*, waktu *holding*, dan waktu pendinginan. Sistem *scanning* ATOS II 3D digunakan mengecek secara teliti adanya cacat *shrinkage* dan *warpage* (akurasi sampai ribuan mm). Setelah spesimen dibiarkan selama 24 jam pada temperatur 21-25 C, ATOS II 3D digunakan untuk mengecek adanya indikasi *shrinkage* pada spesimen. Perhitungan *shrinkage* pada spesimen berdimensi 60 cm × 60 cm sebagai berikut.

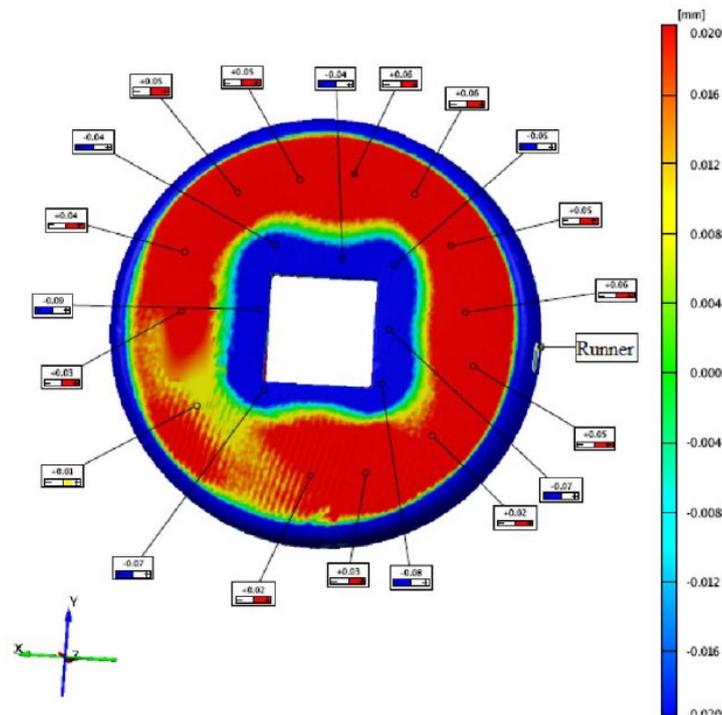
$$S_x = x_1 - x_2, S_{pp} = 100.((x_1 - x_2)/x_1) \quad (2.30)$$

$$S_y = y_1 - y_2, S_{pn} = 100.((y_1 - y_2)/y_1) \quad (2.31)$$

Dari penelitian tersebut, didapatkan parameter optimal untuk hasil *shrinkage* dan *warpage* minimum mulai dari kontribusi terbesar yaitu tekanan *holding*, waktu pendinginan, waktu *holding*, temperatur leleh material, kecepatan injeksi, dan yang terakhir tekanan injeksi. Data parameter percobaan ditampilkan pada tabel 2.14 dengan keterangan nilai bercetak tebal merupakan parameter optimal proses injeksi.

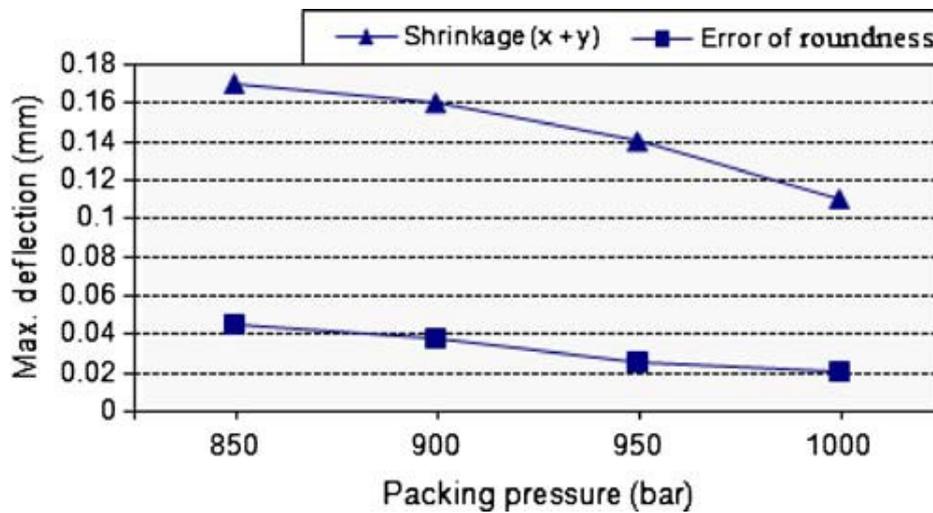
Tabel 2.14 Parameter Injeksi pada Penelitian Kusić dan Hančič (2016)

	Temperatur leleh (°C)	Kecepatan injeksi (mm/s)	Tekanan injeksi (bar)	Tekanan <i>holding</i> (bar)	Waktu <i>holding</i> (s)	Waktu pendinginan (s)
Level 1	230	40	1000	300	3	6
Level 2	240	45	1100	400	4	8
Level 3	-	50	1200	500	5	10

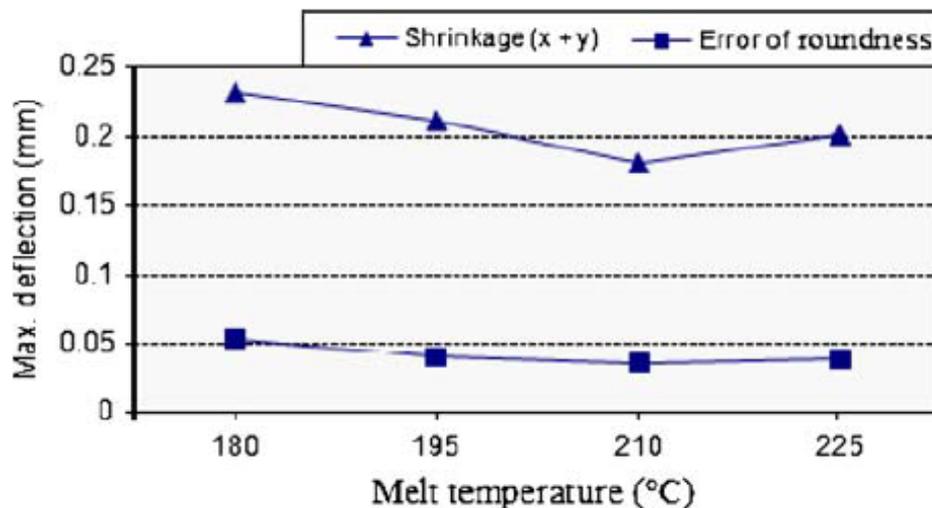


Gambar 2.12 Sampel Data Hasil GOM (Kurt et al., 2009)

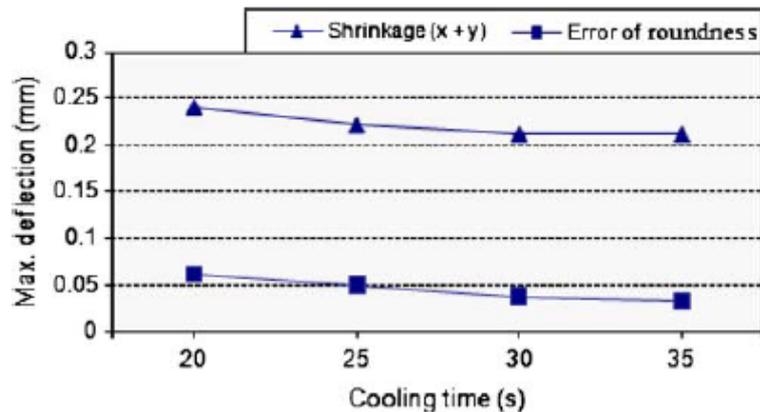
Kurt et al. (2009) melakukan penelitian mengenai optimasi parameter injeksi untuk meminimalisir eror kebulatan dan *shrinkage* pada material ABS melalui eksperimen menggunakan mesin Haitian tipe HTW58. Sebelum melakukan eksperimen, parameter proses injeksi yang digunakan untuk eksperimen dicari terlebih dahulu melalui simulasi menggunakan program MoldFlow. Berdasarkan hasil simulasi, eksperimen akan dilakukan dengan memvariasikan tekanan *holding* dengan rentang 850 sampai 1000 bar, temperatur leleh material dengan rentang 185 sampai 225°C, dan waktu pendinginan dengan rentang 20 sampai 35 detik. Untuk menganalisis defleksi yang terjadi pada spesimen, sistem *Advanced Topometric Sensor* (ATOS) digunakan sebagai *scanner* optik 3D. Sistem ATOS akan memindai spesimen, kemudian secara otomatis menghasilkan *mesh* spesimen. Data tersebut dibandingkan dengan hasil *mesh* ATOS menggunakan data desain CAD spesimen. Perbedaan antar kedua data dibandingkan menggunakan *software* GOM dengan atribut yang diukur yaitu *shrinkage* pada arah y, *shrinkage* pada arah x, dan kebulatan pada spesimen. Contoh hasil perbandingan data dengan *software* GOM dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.13 Efek Tekanan *Holding* terhadap Nilai Total *Shrinkage* pada Arah X dan Y, dan *Error* Kebulatan (Kurt et al., 2009)



Gambar 2.14 Efek Temperatur Leleh Material terhadap Nilai Total *Shrinkage* pada Arah X dan Y, dan *Error* Kebulatan pada Tekanan *Holding* 950 bar (Kurt et al., 2009)



Gambar 2.15 Efek Waktu Pendinginan terhadap Nilai Total *Shrinkage* pada Arah X dan Y, dan *Error* Kebulatan (Kurt et al., 2009)

Dari gambar 2.13 didapatkan bahwa semakin tinggi tekanan *holding*, maka *shrinkage* pada arah x dan y, dan eror kebulatan semakin berkurang. Namun, hal ini berakibat parameter lain dapat dipengaruhi dari kenaikan tekanan *holding*. Tekanan pada cetakan bertambah secara cepat, tetapi temperatur cetakan bertambah secara lambat.

Pada gambar 2.14 didapatkan temperatur leleh terbaik pada saat 210 °C. *Shrinkage* dan *error* kebulatan mulai bertambah pada saat 225 °C dikarenakan tingginya tekanan *holding* yang menyebabkan temperatur leleh dan temperatur cetakan yang semakin bertambah.

Dari gambar 2.15 didapatkan bahwa semakin lama waktu pendinginan, maka *shrinkage* pada arah x dan y, dan eror kebulatan semakin berkurang. Namun, semakin lamanya waktu pendinginan dapat menaikkan biaya manufaktur.

Dari penelitian Kurt et al., disimpulkan bahwa parameter injeksi yang paling berpengaruh terhadap *shrinkage* dan *error* kebulatan secara urut yaitu tekanan *holding*, temperatur leleh material, dan waktu pendinginan. Walaupun waktu pendinginan memengaruhi *error* kebulatan secara signifikan, tetapi efek terhadap tekanan pada rongga cetakan tidak efektif (membutuhkan waktu yang lebih lama).

Dari tiap penelitian terdahulu yang telah dibahas, diperoleh parameter proses injeksi optimal yang dapat meminimalisir kecacatan *shrinkage* dan kebulatan. Perbandingan parameter dari tiap penelitian dapat dilihat pada tabel 2.15.

Tabel 2.15 Perbandingan Parameter Proses Injeksi pada Penelitian Terdahulu

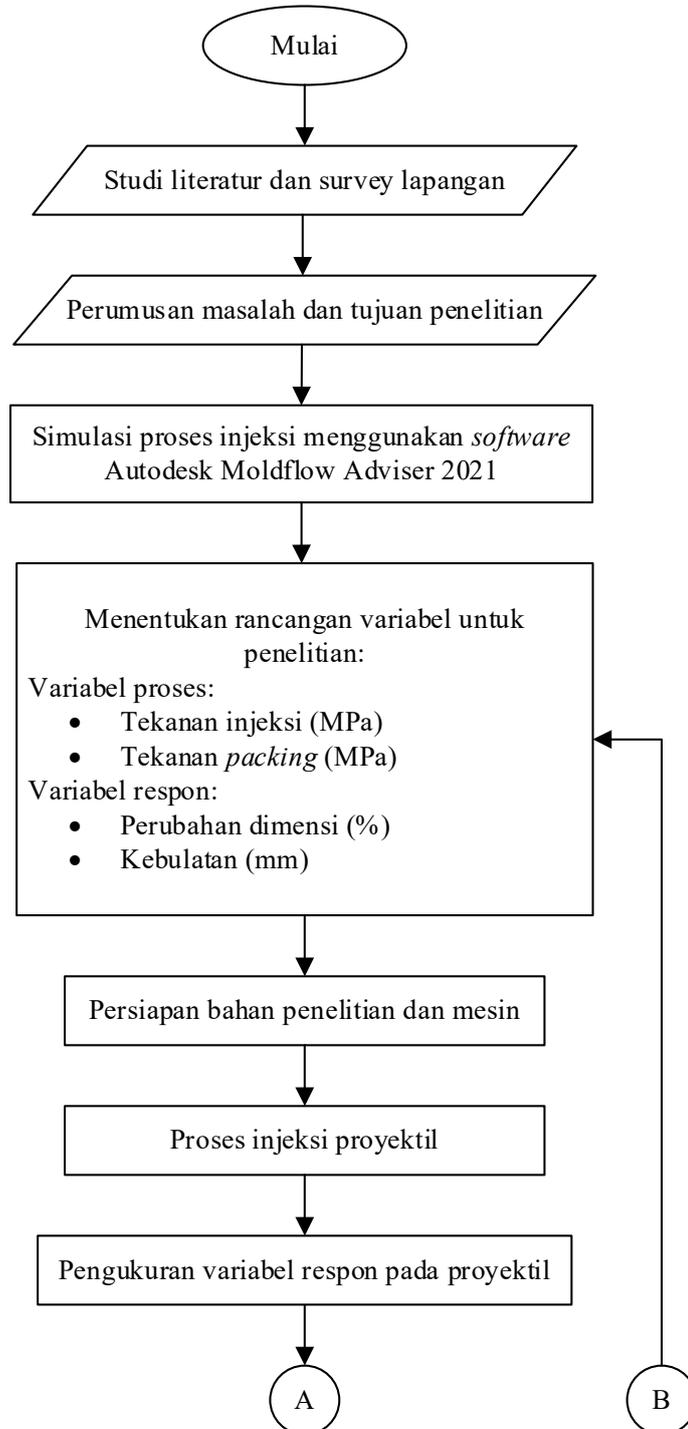
Peneliti	Variabel Respon	Metode	Parameter Optimasi
C.-M. Lin & Chen (2021)	Kebulatan dan konsentrisitas	Simulasi proses injeksi dengan spesimen teleskop (lensa telesentris) bermaterial poliamida (PA66) menggunakan Moldex3D sebagai <i>software</i> simulasinya dengan desain eksperimen Taguchi untuk menentukan parameter injeksi optimal.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekanan injeksi = 220 MPa 2. Tekanan <i>holding</i> = 240 MPa 3. Temperatur leleh = 275 °C 4. Temperatur cetakan = 90 °C 5. Waktu pendinginan = 17 s
Moayyedean & Mamedov (2019)	<i>shrinkage, warpage, dan short shot</i>	Simulasi proses injeksi dengan spesimen dua komponen silinder bermaterial polipropilena menggunakan SolidWorks <i>plastic software</i> dengan model evaluasi kombinasi analisis Taguchi-Grey-Fuzzy.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Waktu injeksi = 0,2 s 2. Waktu <i>holding</i> = 2 s 3. Temperatur leleh = 230°C 4. Waktu pendinginan = 3,9 s
Luca et al. (2018)	<i>Shrinkage dan warpage</i>	Simulasi proses injeksi dengan spesimen komponen mikro medis untuk sensor optik bermaterial <i>uncolored</i> POM N23200035 (polimer termoplastik) menggunakan Moldflow Adviser 2021 dengan metode eksperimen Taguchi.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekanan <i>holding</i> = 30 MPa 2. Temperatur leleh = 210 °C 3. Temperatur cetakan = 90 °C 4. Kecepatan injeksi = 175 mm/s

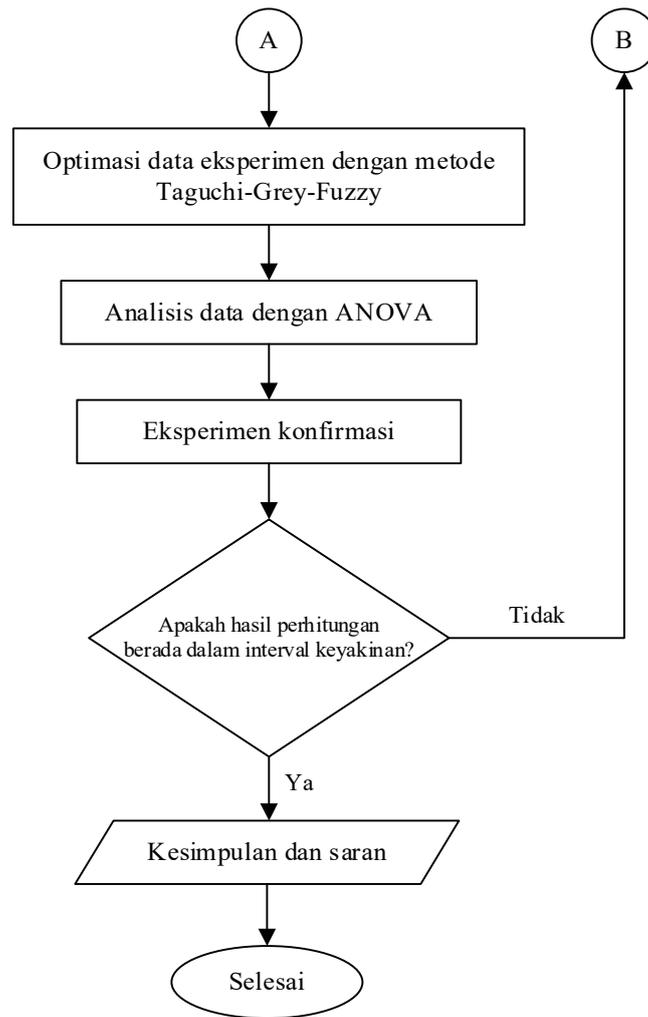
Kc et al. (2016)	<i>Shrinkage</i>	Eksperimen proses injeksi dengan mesin ROMI Pratica 130 menggunakan material 70% polipropilena, penguat 10% <i>glass fiber</i> , dan 20% serat sisal dengan metode eksperimen Taguchi.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekanan injeksi = 9 MPa 2. Tekanan <i>holding</i> = 5 MPa 3. Temperatur leleh = 210 °C 4. Temperatur cetakan = 40 °C 5. Waktu pendinginan = 40 s 6. Waktu <i>holding</i> = 6 s
Kusić dan Hančič (2016)	<i>Shrinkage dan warpage</i>	Eksperimen proses injeksi dengan mesin KraussMaffei (KM80SP380CX) dengan spesimen D2 ISO standar bermaterial polipropilena 60% dan (CaCO ₃) 40% dengan metode eksperimen Taguchi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekanan injeksi = 110 MPa 2. Tekanan <i>holding</i> = 30 MPa 3. Temperatur leleh = 240 °C 4. Waktu pendinginan = 6 s 5. Waktu <i>holding</i> = 5 s
Kurt et al. (2009)	<i>Shrinkage dan kebulatan</i>	Eksperimen proses injeksi dengan mesin Haitian tipe HTW58 menggunakan material ABS dengan membandingkan data hasil <i>scan</i> ATOS antara spesimen hasil eksperimen dengan desain CAD spesimen.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekanan <i>holding</i> = 95 MPa 2. Temperatur leleh = 210 °C 3. Waktu pendinginan = 35 s

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

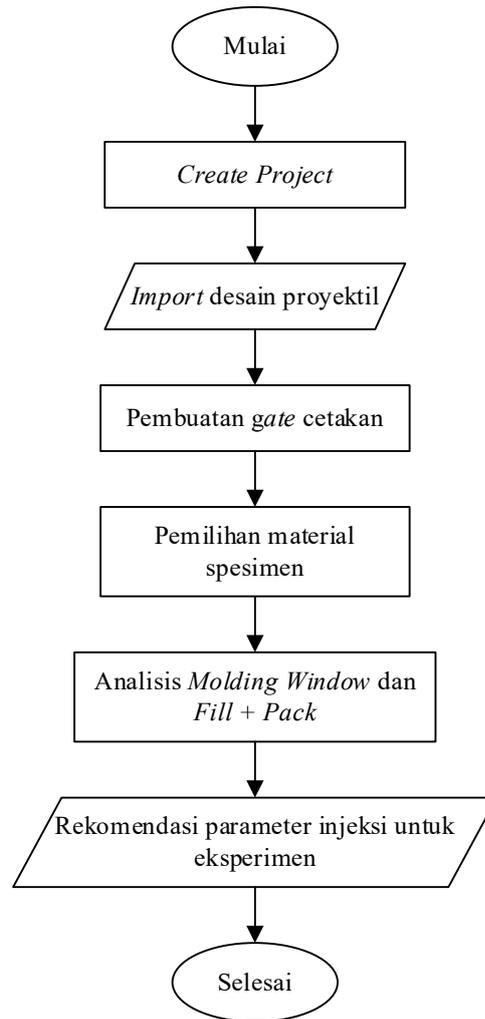
Berikut merupakan tahapan yang dilakukan berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1.

3.2.1 Studi Literatur dan Lapangan

Pengkajian materi diperlukan untuk mendapatkan dasar-dasar dari dilakukannya sebuah penelitian. Materi tersebut dapat diperoleh melalui buku maupun jurnal dari penelitian terdahulu. Materi-materi yang perlu diketahui dan dipelajari seperti spesifikasi proyektil *frangible*, proses dari *injection molding*, pemahaman mengenai material komposit, simulasi proses *injection molding* menggunakan Autodesk Moldflow Adviser, dan proses optimasi menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy. Studi lapangan dilakukan untuk memahami proses eksperimen yang akan dilakukan sehingga masalah-masalah yang terjadi saat proses penelitian dapat dikurangi.

3.2.2 Simulasi Proses Injeksi dengan *Software* Autodesk Moldflow

Proses simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter proses awal yang akan diaplikasikan ke mesin injeksi. Simulasi juga dilakukan untuk mendapatkan data referensi untuk membuat variasi nilai parameter proses pada desain eksperimen. Pada proses simulasi, nilai yang dimasukkan untuk proses analisis berdasarkan hasil studi literatur dan lapangan. Proses simulasi dilakukan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Autodesk Moldflow Adviser 2021

Berikut ini adalah langkah-langkah dalam menggunakan *software* Autodesk Moldflow Adviser 2021:

1. Create Project

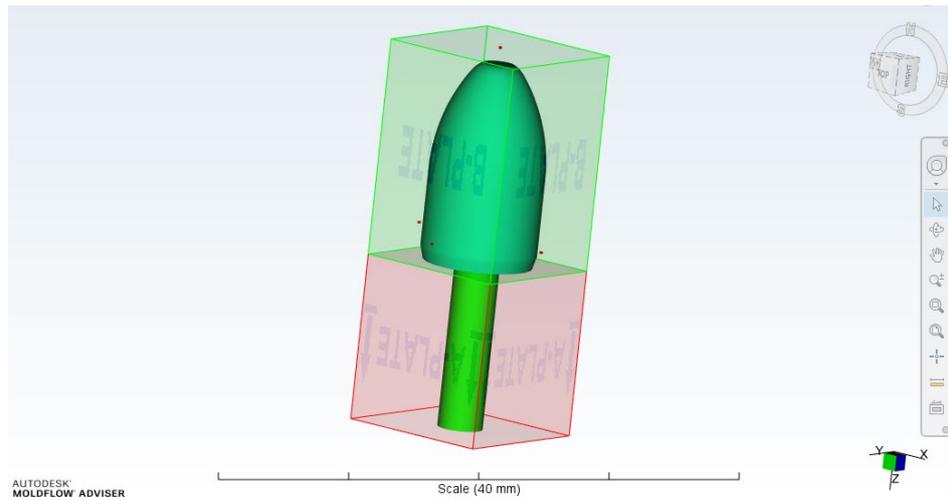
Langkah pertama untuk menggunakan *software* ini yaitu membuat file *project* dari simulasi ini. *Project* akan berisi berbagai hasil analisis yang dilakukan pada simulasi.

2. Import Desain CAD

Desain CAD dari proyektil *frangible* dimasukkan atau diimpor ke dalam *software*. *Software* akan melakukan *meshing* secara otomatis dan memberikan peringatan jika terdapat kesalahan pada model CAD.

3. Membuat Desain Gate

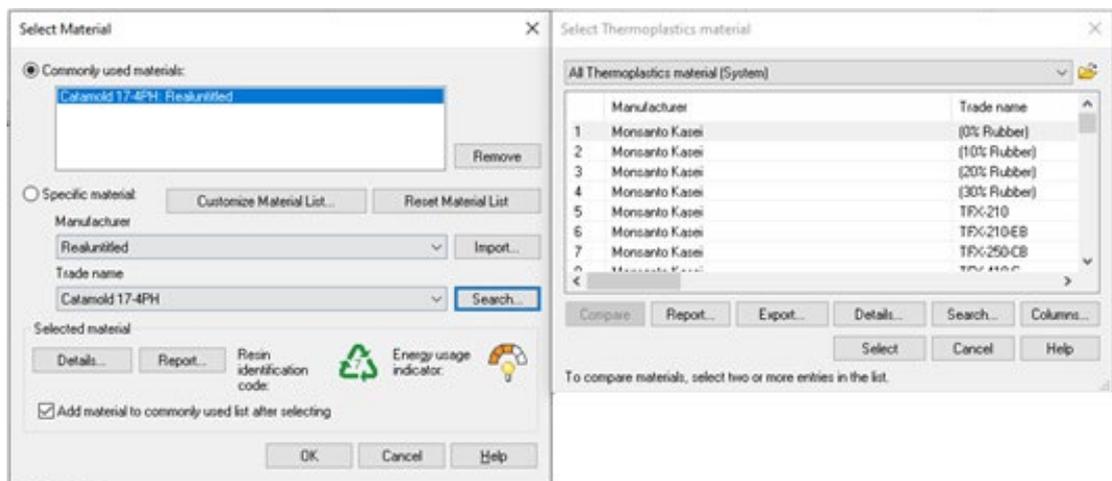
Untuk membuat *gate*, proses *meshing* dilakukan terlebih dahulu secara otomatis, selanjutnya memberikan lokasi injeksi pada desain. *Gate* dapat dibuat pada tab “*Geometry*” lalu pilih “*Sprue*”. Dimensi dari cetakan beserta *gate* dapat dibuat sesuai dengan cetakan yang akan digunakan. Pada gambar 3.3 ditampilkan hasil desain *gate* yang akan digunakan.



Gambar 3.3 Gate untuk Proses Simulasi

4. Memilih Material pada Database

Material yang akan digunakan dalam simulasi dipilih pada “*Select Material*”, lalu memilih “*Customize Material List*” untuk membuka database material yang dimiliki oleh *software*. Pada *database* tersebut, material “BASF: *Catamold 17-4 PH*” dengan komposisi serbuk *stainless steel* 90% dipilih. Gambar 3.4 di bawah merupakan ilustrasi pemilihan material.



Gambar 3.4 Pemilihan Material pada *Database Software*

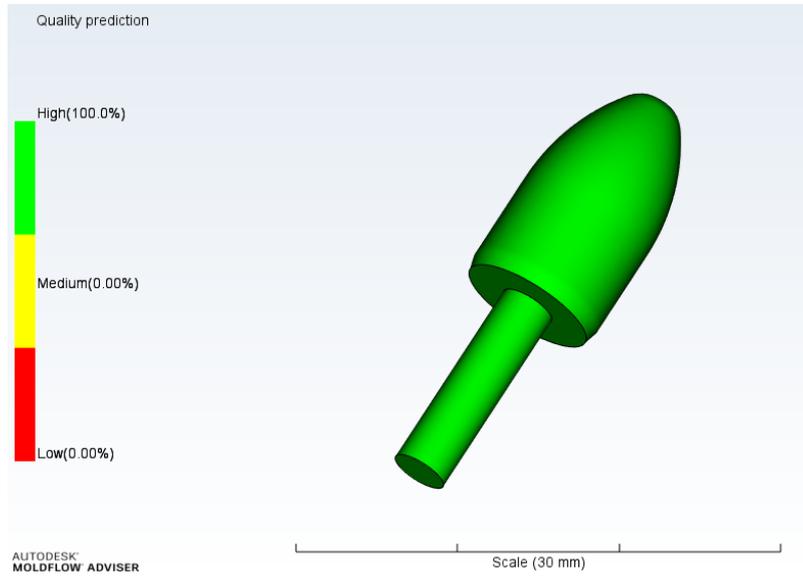
5. Analisis “*Molding Window*”

Analisis “*Molding Window*” dijalankan untuk mendapatkan parameter injeksi optimal untuk eksperimen. Hasil analisis yang didapatkan yaitu temperatur cetakan, temperatur leleh material, dan waktu injeksi.

6. Analisis “*Fill+Pack*”

Hasil analisis “*Molding Window*” digunakan sebagai *input* pada analisis “*Fill+Pack*”. Analisis “*Fill + Pack*” dijalankan untuk mendapatkan parameter injeksi seperti tekanan injeksi aktual, gaya tekan, volume material yang terinjeksi, waktu pendinginan, waktu *holding* dan prediksi kualitas proyektil. Untuk tekanan injeksi

maksimum disesuaikan dengan spesifikasi mesin yang akan digunakan. Nilai parameter yang didapatkan dari analisis ini dapat dijadikan referensi untuk nilai-nilai variabel proses dan konstan dari eksperimen. Contoh hasil analisis ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Prediksi Kualitas Hasil Analisis “Fill + Pack”

3.2.3 Desain Eksperimen Pengambilan Data

Desain eksperimen dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen serta bagaimana variasi yang perlu dilakukan untuk optimasi parameter proses injeksi. Hal ini dilakukan agar nilai variabel respon yang didapatkan bernilai baik. Berikut ini merupakan desain eksperimen yang akan dilakukan:

1. Eksperimen Penentuan Parameter Optimal untuk Eksperimen Data

Material yang digunakan pada simulasi dan eksperimen memiliki perbedaan sehingga parameter injeksi yang akan digunakan juga akan 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* BASF: Catamold 17-4PH dengan sisa 10% yang tidak diketahui materialnya. Perbandingan material pada simulasi dengan material yang digunakan pada eksperimen dapat dilihat pada tabel 3.1 dan tabel 3.2. Perlu dilakukan eksperimen untuk mencari parameter injeksi optimal yang akan digunakan dengan mempertimbangkan sifat material yang digunakan pada eksperimen. Pada tabel 3.3 dapat dilihat rancangan eksperimen untuk mendapatkan parameter proses injeksi optimal.

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

	BASF: Catamold 17-4PH	90% <i>Stainless Steel</i> 304L + 10% PA-6
Titik leleh material	201,1 °C	220 °C ((BASF, 2021)
Rekomendasi temperatur cetakan	115 °C	60 – 93 °C (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	Bal.
<i>Stainless Steel</i> 304L	≤ 0,03	≤ 1,0	≤ 2,0	18,0 – 20,0	9,0 - 12,0	≤ 0,03	≤ 0,045	-	Bal.

Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen Penentuan Parameter Injeksi yang akan Digunakan

Tekanan Injeksi (MPa)	Tekanan <i>holding</i> (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

Perancangan eksperimen pada tabel 3.3 mempertimbangkan spesifikasi maksimal mesin injeksi. Tekanan maksimal pada mesin injeksi yaitu 10 MPa dengan tekanan transisi maksimal ke proses *holding* hanya 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 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.

2. Menentukan Variabel Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat tiga jenis variabel yang digunakan, yaitu variabel proses, variabel konstan, dan variabel respon. Variabel proses adalah variabel yang dikendalikan serta nilainya ditentukan oleh peneliti. Terdapat dua variabel proses dengan tiga level yang digunakan pada penelitian ini yang ditunjukkan pada tabel 3.4:

Tabel 3.4 Variabel Proses dan Level

No	Variabel Proses	Level 1	Level 2	Level 3
1	Tekanan injeksi (MPa)	9	9,5	10
2	Tekanan <i>holding</i> (MPa)	8	8,5	9

Variabel konstan adalah variabel yang tidak divariasikan atau dibiarkan selama eksperimen dilakukan, sehingga tidak memengaruhi nilai dari variabel respon. Variabel konstan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.5:

Tabel 3.5 Variabel Konstan

Variabel Konstan	Nilai
Waktu pendinginan (s)	30
Waktu <i>holding</i> (s)	5
Temperatur leleh (°C)	240
Temperatur cetakan (°C)	90

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

3. Menentukan Derajat Kebebasan

Setelah menentukan variabel proses dan jumlah variasi atau level yang akan dilakukan, derajat kebebasan dapat dihitung untuk menentukan ukuran matriks ortogonal. Pada tabel 3.6 ditunjukkan derajat kebebasan yang digunakan pada penelitian.

Tabel 3.6 Derajat Kebebasan Eksperimen

No	Variabel Proses	Level	Derajat Kebebasan
1.	Tekanan injeksi	3	2
2.	Tekanan <i>holding</i>	3	2
Total derajat kebebasan			4

4. Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal didapatkan berdasarkan total derajat kebebasan dari eksperimen. Ukuran dari matriks ortogonal harus lebih besar dibandingkan total derajat kebebasan. 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 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 Respon	
Tekanan Injeksi (MPa)	Tekanan <i> Holding</i> (MPa)	Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
9	8		
	8,5		
	9		
9,5	8		
	8,5		
	9		
10	8		
	8,5		
	9		

3.2.4 Persiapan Bahan dan Mesin

Bahan eksperimen dan mesin harus dipersiapkan terlebih dahulu sebelum melakukan eksperimen. Bahan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *feedstock* berbentuk pelet dengan komposisi 90% *stainless steel 304L* dengan 10% PA-6 yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya. *Feedstock* tersebut digunakan sebagai material yang akan diinjeksi pada mesin.

Pada eksperimen ini, terdapat satu mesin utama dan tiga alat ukur yang digunakan, yaitu sebagai berikut:

1. Mesin Cetakan Injeksi

Mesin injeksi yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin kompaksi yang dimodifikasi untuk melakukan proses injeksi vertikal yang terdapat pada *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS. Mesin yang dipakai dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Mesin Kompaksi

2. Mikrometer Sekrup

Mikrometer sekrup digunakan untuk mengukur nilai pengurangan dimensi yang terjadi pada proyektil hasil proses injeksi. Mikrometer sekrup yang digunakan pada penelitian ini terdapat di *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS dengan toleransi sebesar 0,001 mm yang ditampilkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Mikrometer Sekrup

3. *V-Block* dan *Dial Indicator*

V-block dan *dial indicator* digunakan untuk mengukur kebulatan dari hasil produk injeksi. Produk yang berupa proyektil diletakkan pada *v-block*, lalu *spindle* dari *dial indicator* diletakkan pada bagian badan proyektil. Setelah itu, proyektil diputar sebesar 360° secara perlahan. Jika terdapat perubahan dimensi, *dial indicator* dapat mendeteksi kebulatan proyektil. *V-block* dan *dial indicator* pada gambar 3.8 yang digunakan terdapat di *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan ITS.



Gambar 3.8 *V-block* dan *Dial Indicator*

3.2.5 Proses Eksperimen Injeksi Proyektil

Proses injeksi dilakukan setelah persiapan bahan eksperimen dan mesin telah selesai. *Feedstock* dimasukkan ke dalam mesin injeksi, kemudian tekanan injeksi dan tekanan *holding* diatur sesuai dengan nilai parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Sesuai tabel 3.8, eksperimen akan dilakukan sebanyak sembilan kali dan ditambah dengan replikasi eksperimen sebanyak dua kali sehingga total eksperimen yang dijalankan sebanyak 27 kali.

3.2.6 Pengukuran Proyektil

Proyektil hasil proses injeksi diukur sesuai dengan masing-masing alat ukur. Terdapat dua pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pengukuran diameter dan kebulatan sebanyak tiga titik pada bagian *boat tail* sampai *ogive* (badan proyektil).

1. Diameter Proyektil

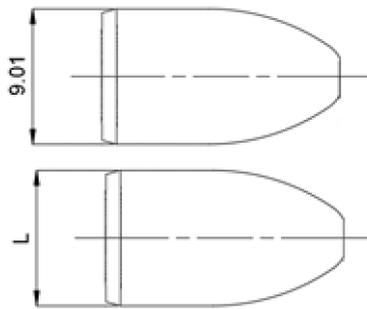
Sebelum seluruh proyektil diukur, proyektil dibiarkan terlebih dahulu selama 48 jam pada suhu ruangan supaya tegangan sisa pada proyektil menghilang, sehingga tidak memengaruhi dimensi proyektil. Pengukuran dilakukan menggunakan mikrometer sekrup.

Nilai perubahan dimensi proyektil didapatkan dengan melakukan perbandingan antara diameter cetakan dengan diameter proyektil hasil pengukuran sesuai pada rumus 2.2. Perhitungan dilakukan dengan membandingkan diameter badan proyektil pada cetakan dengan diameter badan proyektil (L) seperti pada gambar 3.9.

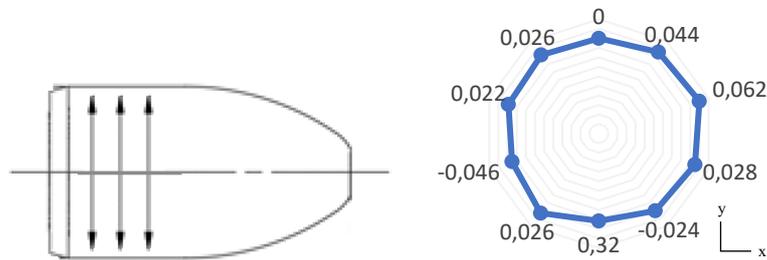
2. Kebulatan

Pengukuran kebulatan menggunakan metode *Minimum Zone Reference Circle* (MZC) karena sesuai dengan standar ISO dan nilai penyimpangan kebulatan yang dihasilkan paling rendah dibandingkan metode lainnya (Sui & Zhang, 2012). Perhitungan dalam metode MZC yaitu mencari selisih dari nilai diameter lingkaran terbesar dengan nilai diameter lingkaran terkecil, sesuai dengan tabel 2.5. Bagian proyektil yang diukur dilakukan pada titik yang sama dengan pengukuran perubahan dimensi yaitu pada badan

proyektil yang dapat dilihat pada gambar 3.10 (a). Nilai kebulatan diukur setiap 36° sehingga terdapat 10 titik pengukuran yang dapat dilihat pada gambar 3.10 (b)



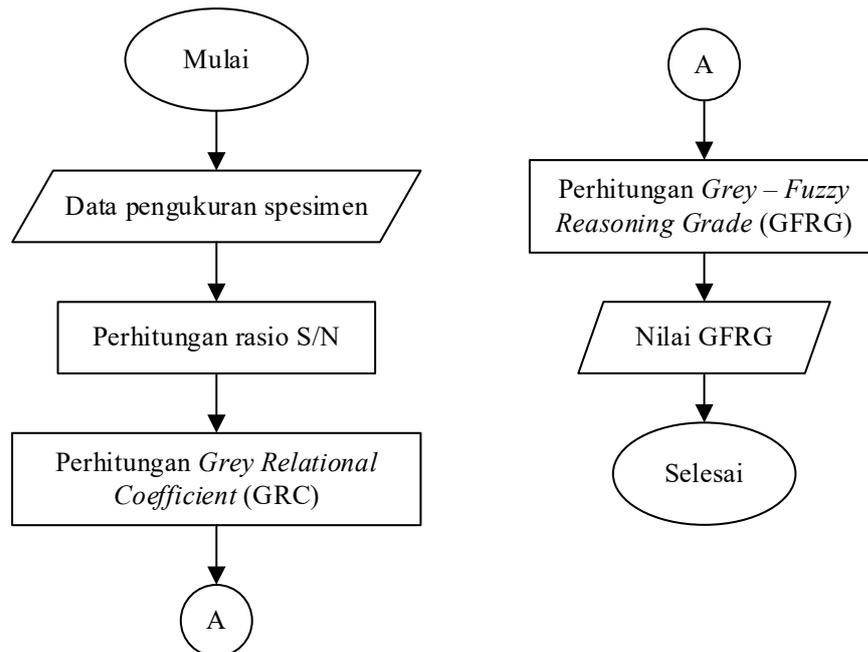
Gambar 3.9 Dimensi Pengukuran pada Proyektil



Gambar 3.10 (a) Titik Pengukuran Kebulatan Proyektil dan (b) Contoh Hasil Pengukuran Kebulatan

3.2.7 Optimasi Metode Taguchi-Grey-Fuzzy

Proses optimasi dengan metode Taguchi-Grey-Fuzzy dilakukan untuk mendapatkan variabel respon terbaik dari tiap parameter proses injeksi yang digunakan. Pada gambar 3.11 ditunjukkan tahapan yang dilakukan untuk melakukan metode Taguchi-Grey-Fuzzy dalam bentuk diagram alir.



Gambar 3.11 Diagram Alir Perhitungan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy

1. Perhitungan Rasio *Signal to Noise*

Untuk melakukan perhitungan rasio *signal to noise*, perhitungan *loss function* dilakukan setiap eksperimen terlebih dahulu. Kategori yang digunakan untuk kedua respon perubahan dimensi dan kebulatan adalah semakin kecil semakin baik (*lower-is-better*) pada perhitungan *loss function* dengan menggunakan rumus 2.7. Setelah perhitungan *loss function*, rasio *signal to noise* dapat dihitung. Nilai *signal to noise* yang telah didapatkan perlu dinormalisasi terlebih dulu menggunakan rumus 2.10. Desain tabel perhitungan rasio S/N dapat dilihat pada tabel 3.9.

Tabel 3.8 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 menggunakan perhitungan GRC, nilai *deviation sequence* setiap eksperimen dihitung terlebih dulu dengan rumus 2.14. Kemudian nilai GRC dihitung dengan menggunakan rumus 2.13. Desain tabel perhitungan GRC dapat dilihat pada tabel 3.10.

Tabel 3.9 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}

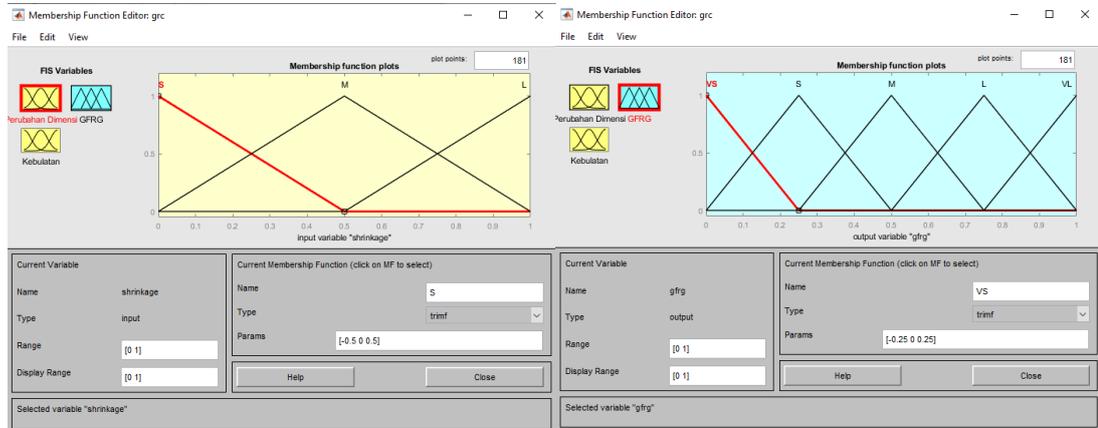
3. *Grey-Fuzzy Reasoning Grade* (GFRG)

Terdapat tiga tahapan untuk mendapatkan nilai GFRG, 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*. Seluruh tahapan untuk mendapatkan nilai GFRG menggunakan *software* MATLAB.

a. *Fuzzification*

Hasil perhitungan GRC membutuhkan proses pengubahan menjadi bilangan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan nilai GRC pada penelitian ini yaitu *small* (S), *medium* (M), dan *large* (L). Fungsi keanggotaan nilai GFRG pada penelitian ini yaitu *very small* (VS), *small* (S), *medium* (M), *large* (L), dan *very large* (VL). Fungsi keanggotaan yang digunakan pada penelitian ini adalah kurva segitiga yang

dapat dilihat pada gambar 3.12. Fungsi keanggotaan GRC secara jelas dapat dilihat pada tabel 3.11.



Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan (a) Input dan (b) Output

Tabel 3.10 Fungsi Keanggotaan GRC

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

b. Logika Fuzzy

Logika fuzzy digunakan dalam perhitungan GFRG untuk menyesuaikan nilai antar GRC berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Contoh logika fuzzy yang digunakan pada penelitian yaitu sebagai berikut.

Aturan ke-1: Jika GRC perubahan dimensi bernilai *small* dan GRC kebulatan bernilai *small*, maka GFRG bernilai *very small*.

Aturan ke-2: Jika GRC perubahan dimensi bernilai *small* dan GRC kebulatan bernilai *medium*, maka GFRG bernilai *small*.

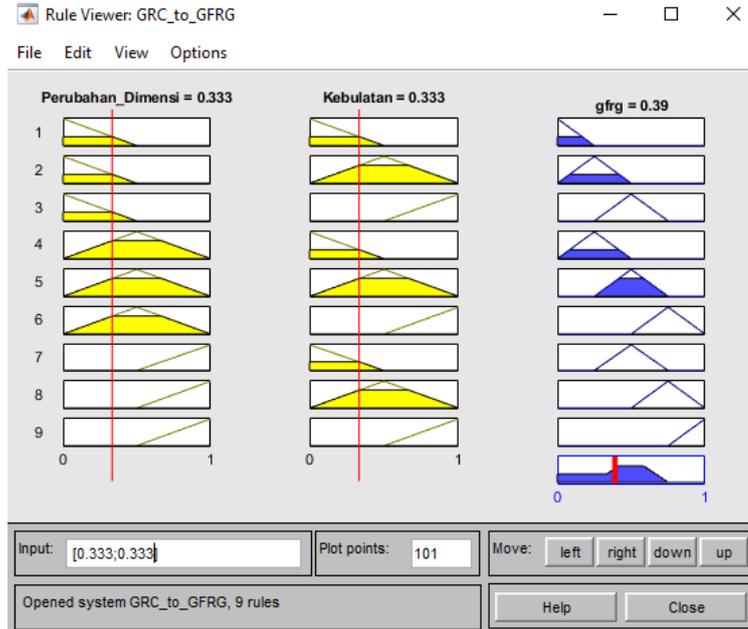
dan seterusnya, untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel 3.12.

Tabel 3.11 Logika Fuzzy pada Penelitian

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

c. Perhitungan GFRG

Perhitungan GFRG menggunakan bantuan *software* MATLAB dengan cara memasukkan nilai GRC dari perubahan dimensi dan kebulatan ke dalam logika fuzzy, sehingga didapatkan nilai GFRG. Contoh perhitungan GFRG dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Perhitungan GFRG pada MATLAB

3.2.8 Analysis of Variance (ANOVA)

Analysis of variance (ANOVA) digunakan untuk mendapatkan besar kontribusi setiap parameter proses injeksi yang diuji pada eksperimen. ANOVA dilakukan berdasarkan nilai GFRG yang didapatkan sebelumnya. ANOVA dapat dilakukan dengan menggunakan *software* Minitab. Hasil ANOVA dapat dilihat pada tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.12 Hasil ANOVA

Parameter	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>	Kontribusi (%)
Tekanan injeksi
Tekanan <i>holding</i>
<i>Error</i>
Total	...					100%

3.2.9 Uji Hipotesis

Dari hasil ANOVA, dapat diketahui bahwa variabel proses yang dioptimasi berpengaruh terhadap variabel respon atau tidak. Penentuan pengaruh dari variabel proses tersebut dilakukan dengan melakukan uji hipotesis dengan ketentuan hipotesis sebagai berikut.

H_0 : Variabel proses tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan.

H_1 : Variabel proses berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan.

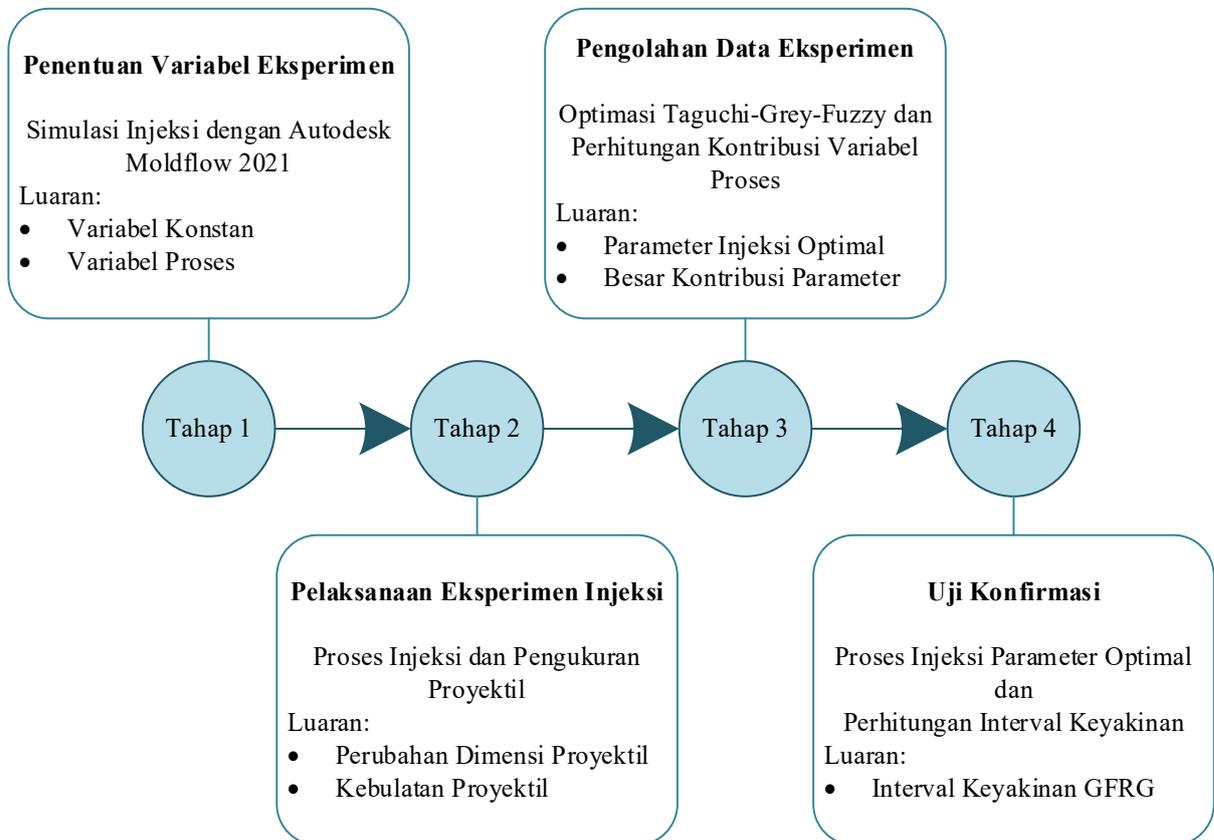
Kriteria penolakan: Tolak H_0 jika *p-value* < 0.05.

3.2.10 Uji Konfirmasi

Setelah nilai parameter proses injeksi optimal didapatkan, uji konfirmasi dilakukan untuk mengetahui bahwa perhitungan telah dilakukan dengan tepat. Uji konfirmasi dilakukan sebanyak tiga kali. Hasil dari uji konfirmasi dibandingkan dengan nilai rata-rata GFRG dengan interval keyakinan prediksi GFRG.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

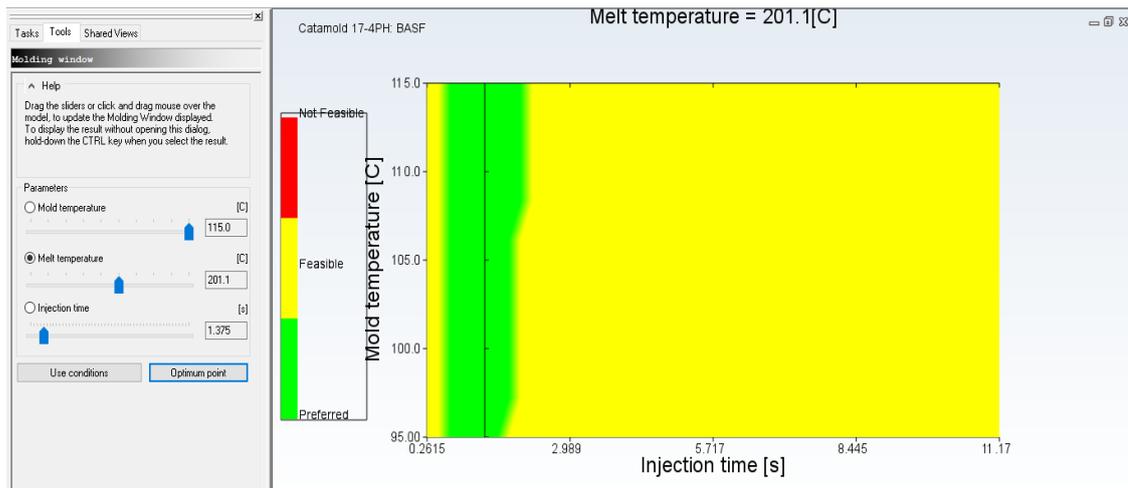
Pada penelitian ini dilakukan pengoptimalan tekanan injeksi dan tekanan *holding* pada proses injeksi untuk mendapatkan kualitas proyektil terbaik. Terdapat empat tahap pada penelitian, tahap pertama yaitu menentukan variabel eksperimen menggunakan *software* simulasi injeksi Autodesk Moldflow Adviser 2021. Tahap kedua yaitu melakukan eksperimen injeksi untuk mendapatkan nilai tiap variabel respon (perubahan dimensi dan kebulatan proyektil). Tahap ketiga yaitu mengolah data yang didapatkan dari eksperimen injeksi menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy untuk mendapatkan nilai optimum dari tekanan injeksi dan tekanan *holding* terhadap variabel respon. Setelah itu, ANOVA dilakukan untuk mendapatkan kontribusi dari tekanan injeksi dan tekanan *holding* terhadap variabel respon. Tahap empat yaitu melakukan uji konfirmasi untuk membuktikan hasil optimasi data sesuai dengan perhitungan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tahapan Analisis Data dan Pembahasan pada Penelitian

4.1 Penentuan Variabel Eksperimen

Nilai parameter injeksi optimal yang akan digunakan untuk eksperimen injeksi proyektil didapatkan dari hasil simulasi Autodesk Moldflow Adviser 2021 dengan keterangan *high quality prediction* terbaik. 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).



Gambar 4.2 Hasil Analisis “*Molding Window*” pada Autodesk Moldflow Adviser 2021

Hasil parameter optimal dari analisis “*Molding Window*” yaitu temperatur leleh material 201,1 °C, temperatur cetakan 115 °C, dan waktu injeksi 1,375 detik, diaplikasikan pada analisis “*Fill*” agar mendapatkan prediksi kualitas hasil injeksi. Hasil analisis “*Fill*” menunjukkan nilai *high quality prediction* sebesar 100% dengan waktu injeksi sebesar 1,38 detik dan tekanan injeksi aktual sebesar 4,811 MPa. Hasil simulasi di atas masih menggunakan material yang berbeda dengan eksperimen penelitian sehingga diperlukan simulasi lanjutan dengan *input* nilai parameter injeksi disesuaikan dengan material yang digunakan pada eksperimen penelitian.

Simulasi lanjutan dilakukan dengan nilai temperatur leleh material sebesar 220 °C dan temperatur cetakan sebesar 60 °C. Hasil analisis menunjukkan nilai *low quality prediction* sebesar 100% sehingga eksperimen tidak memungkinkan untuk dilakukan. Rendahnya prediksi kualitas tersebut diakibatkan oleh perbedaan dari *properties* material pada *database software* dengan material yang digunakan pada eksperimen, sehingga diperlukan eksperimen tambahan untuk mendapatkan nilai parameter optimal proses injeksi proyektil. Hasil analisis “*fill*” dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Analisis “*Fill*” pada 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.

Dari 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 – 80 °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 4.3.



Gambar 4.3 (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.

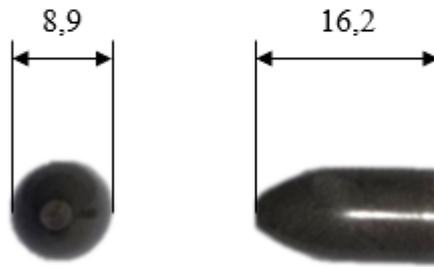
Berdasarkan eksperimen penentuan parameter injeksi, temperatur leleh material yang sebesar 240 °C dan temperatur cetakan sebesar 90 °C digunakan sebagai variabel konstan pada eksperimen pengambilan data penelitian ini. Tekanan injeksi sebesar 9 MPa dan tekanan *holding* sebesar 8 MPa digunakan sebagai variasi level terendah. Keseluruhan variabel yang akan digunakan pada eksperimen dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Tahap Penentuan Variabel Eksperimen Penelitian

Level	Parameter Injeksi			
	Tekanan Injeksi (MPa)	Tekanan <i> Holding </i> (MPa)	Temperatur Leleh Material (°C)	Temperatur Cetakan (°C)
1	9	8	240	90
2	9,5	8,5		
3	10	9		

4.2 Pelaksanaan Eksperimen Injeksi

Setelah variabel yang digunakan pada penelitian telah didapatkan sesuai dengan tabel 4.3, proses injeksi dapat dilakukan menggunakan mesin cetakan injeksi di *Workshop* Rekayasa Material dan Teknologi Pertahanan. Material yang diinjeksi adalah *feedstock* berbentuk *pellet* dengan komposisi 90 wt% *stainless steel* 304L/PA-6. Contoh proyektil hasil eksperimen injeksi dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Proyektil *Frangible* Hasil Eksperimen Injeksi (mm)

Desain eksperimen pada penelitian sebanyak 9 kali dengan replikasi sebanyak 2 kali, sehingga total eksperimen yang dilakukan sebanyak 27 kali. Setelah eksperimen selesai dilakukan, setiap proyektil diukur perubahan dimensi dan kebulatannya. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Proyektil

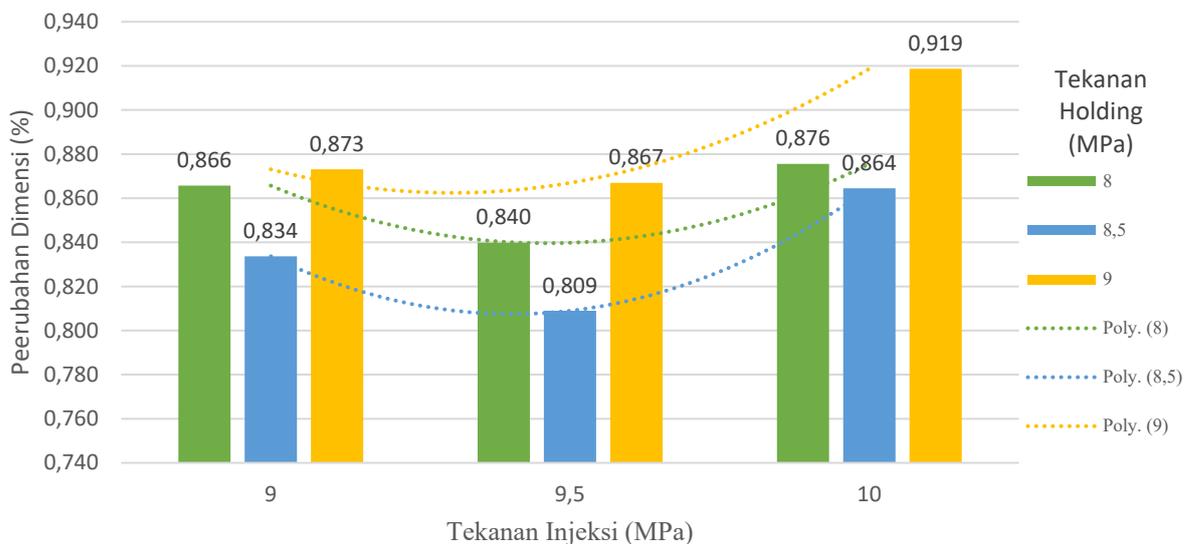
Variabel Proses		Variabel Respon					
Tekanan Injeksi (MPa)	Tekanan <i> Holding </i> (MPa)	Perubahan Dimensi (%)			Kebulatan (mm)		
9	8	0,869	0,832	0,895	0,084	0,0773	0,1000
	8,5	0,818	0,836	0,847	0,0947	0,1053	0,0867
	9	0,903	0,847	0,869	0,0573	0,0680	0,0693
9,5	8	0,847	0,840	0,832	0,0960	0,1093	0,0907
	8,5	0,810	0,810	0,807	0,0987	0,1080	0,1133
	9	0,847	0,840	0,914	0,1120	0,0707	0,0760
10	8	0,903	0,844	0,881	0,0760	0,1187	0,0827
	8,5	0,866	0,862	0,866	0,1067	0,1013	0,1013
	9	1,054	0,795	0,906	0,0733	0,0693	0,0640

4.2.1 Pengaruh Tekanan Injeksi dan Tekanan *Holding* terhadap Perubahan Dimensi dan Kebulatan Proyektil

Pada gambar 4.5, didapatkan tren grafik tekanan injeksi terhadap perubahan dimensi mengalami penurunan dari 9 MPa menuju 9,5 MPa untuk seluruh variasi tekanan *holding* . Pada saat tekanan *holding* sebesar 8 MPa, perubahan dimensi sebesar 0,866% menurun menjadi 0,84%, pada tekanan *holding* sebesar 8,5 MPa, perubahan dimensi sebesar 0,834% menurun menjadi 0,809%, dan pada tekanan *holding* sebesar 9 MPa, perubahan dimensi sebesar 0,873% menurun menjadi 0,867%. Perubahan dimensi meningkat pada tekanan injeksi sebesar 10 MPa untuk seluruh variasi tekanan *holding* (8 MPa, 8,5 MPa, dan 9 MPa). Dari gambar 4.5 juga didapatkan bahwa tekanan injeksi optimal terhadap perubahan dimensi terendah adalah pada

9,5 MPa. Pada saat tekanan injeksi 10 MPa untuk seluruh variasi tekanan *holding* didapatkan nilai perubahan dimensi terbesar. Berdasarkan tren grafik pada gambar 4.5, hasil eksperimen tidak sesuai dengan hipotesis.

Pada gambar 4.5 juga didapatkan tren grafik tekanan *holding* terhadap perubahan dimensi mengalami penurunan dari 8 MPa menuju 8,5 MPa untuk seluruh variasi tekanan injeksi. Pada saat tekanan injeksi sebesar 9 MPa, perubahan dimensi sebesar 0,866% menurun menjadi 0,834%, pada tekanan injeksi sebesar 9,5 MPa, perubahan dimensi sebesar 0,84% menurun menjadi 0,809%, dan pada tekanan injeksi sebesar 10 MPa, perubahan dimensi sebesar 0,876% menurun menjadi 0,864%. Perubahan dimensi meningkat pada tekanan *holding* sebesar 9 MPa untuk seluruh variasi tekanan injeksi (9 MPa, 9,5 MPa, dan 10 MPa). Dari gambar 4.7 juga didapatkan bahwa tekanan *holding* optimal terhadap perubahan dimensi terendah adalah pada 8,5 MPa. Pada saat tekanan *holding* 9 MPa untuk seluruh variasi tekanan injeksi didapatkan nilai perubahan dimensi terbesar. Berdasarkan tren grafik pada gambar 4.6, hasil eksperimen tidak sesuai dengan hipotesis. Menurut Rosato et al., (2000), semakin tinggi tekanan injeksi maupun *holding*, maka *shrinkage* yang dihasilkan semakin rendah. Nilai *shrinkage* yang rendah juga mengakibatkan nilai perubahan dimensi yang rendah.

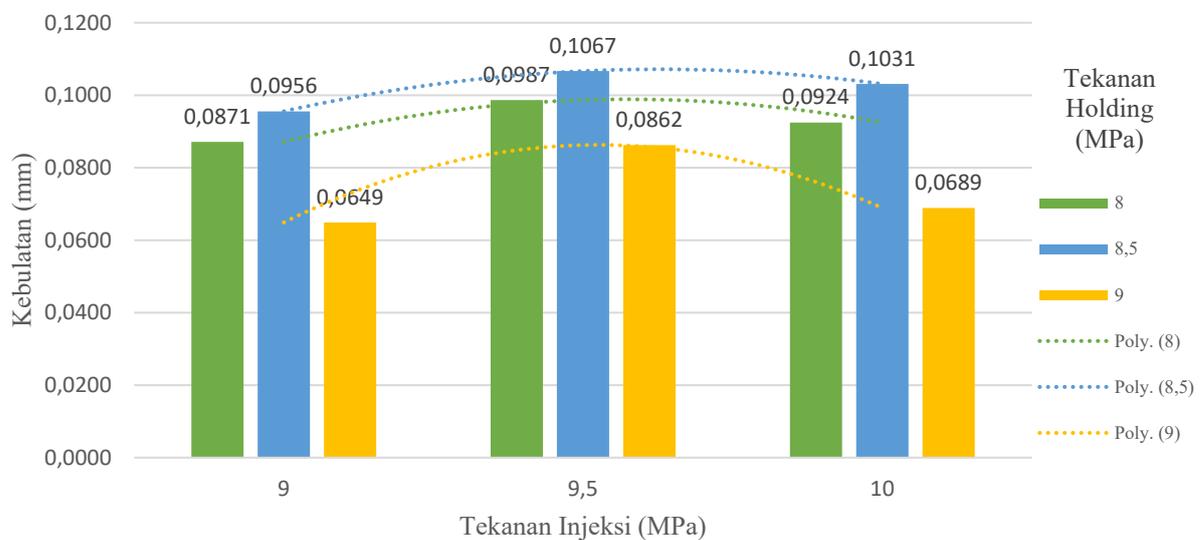


Gambar 4.5 Pengaruh Tekanan Injeksi dan Tekanan *Holding* terhadap Perubahan Dimensi

Pada gambar 4.6, didapatkan tren grafik tekanan injeksi terhadap kebulatan mengalami kenaikan pada 9 MPa menuju 9,5 MPa untuk seluruh variasi tekanan *holding*. Pada saat tekanan *holding* sebesar 8 MPa, kebulatan sebesar 0,0871 mm bertambah menjadi 0,0987 mm, pada tekanan *holding* sebesar 8,5 MPa, kebulatan sebesar 0,0956 mm bertambah menjadi 0,1067 mm, dan pada tekanan *holding* sebesar 9 MPa, kebulatan sebesar 0,0649 mm bertambah menjadi 0,0862 mm. Kebulatan menurun pada tekanan injeksi sebesar 10 MPa untuk seluruh variasi tekanan *holding* (8 MPa, 8,5 MPa, dan 9 MPa). Dari gambar 4.6 juga didapatkan bahwa tekanan injeksi optimal terhadap kebulatan terendah adalah pada 9 MPa. Pada saat tekanan injeksi 10 MPa untuk seluruh variasi tekanan *holding* didapatkan nilai kebulatan terbesar. Berdasarkan tren grafik pada gambar 4.6, hasil eksperimen tidak sesuai dengan hipotesis.

Pada gambar 4.6 juga didapatkan tren grafik tekanan *holding* terhadap kebulatan mengalami kenaikan pada 8 MPa menuju 8,5 MPa untuk seluruh variasi tekanan injeksi. Pada saat tekanan injeksi sebesar 9 MPa, kebulatan sebesar 0,0871 mm bertambah menjadi 0,0956

mm, pada tekanan injeksi sebesar 9,5 MPa, kebulatan sebesar 0,0987 mm bertambah menjadi 0,1067 mm, dan pada tekanan injeksi sebesar 10 MPa, kebulatan sebesar 0,0924 mm bertambah menjadi 0,1031 mm. Kebulatan menurun pada tekanan *holding* sebesar 9 MPa untuk seluruh variasi tekanan injeksi (9 MPa, 9,5 MPa, dan 10 MPa). Dari gambar 4.8 juga didapatkan bahwa tekanan *holding* optimal terhadap kebulatan terendah adalah pada 9 MPa. Pada saat tekanan *holding* 8,5 MPa untuk seluruh variasi tekanan injeksi didapatkan nilai kebulatan terbesar. Berdasarkan tren grafik pada gambar 4.6, hasil eksperimen tidak sesuai dengan hipotesis. Menurut Rosato et al., (2000), semakin tinggi tekanan injeksi maupun *holding*, maka *non-uniform shrinkage* yang dihasilkan juga semakin tinggi. *Non-uniform shrinkage* mengakibatkan terjadinya kebulatan yang tidak menentu dikarenakan adanya penyusutan di beberapa titik proyektil.



Gambar 4.6 Pengaruh Tekanan Injeksi dan Tekanan *Holding* terhadap Kebulatan

Hasil eksperimen yang didapatkan tidak sesuai dengan hipotesis dikarenakan oleh beberapa hal. Menurut Fischer (2003), tekanan injeksi maupun *holding* yang tinggi dapat menyebabkan *shrinkage* berlebih karena peningkatan temperatur leleh material karena panas yang terjadi akibat gesekan antara material dengan *barrel* injeksi. Hal tersebut menyebabkan perbedaan temperatur yang tinggi antara *barrel* dengan cetakan, sehingga kontraksi termal yang besar menyebabkan *shrinkage* yang berlebih. Selain itu, sistem kontrol pengubah fase pengisian menuju fase *holding* dilakukan secara manual dengan bantuan motor servo. Sehingga hasil eksperimen yang didapatkan inkonsisten.

4.3 Optimasi Data dengan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy dan ANOVA

Setelah didapatkan data hasil pengukuran proyektil, pengolahan data dilakukan menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy untuk mengetahui parameter optimum pada proses injeksi proyektil dan dilanjutkan dengan ANOVA untuk mengetahui kontribusi dari tekanan injeksi dan tekanan *holding* terhadap variabel respon.

4.3.1 Perhitungan Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N

Hasil pengukuran perubahan dimensi dan kebulatan pada penelitian digunakan untuk menghitung rasio S/N dan normalisasi rasio S/N. Untuk mendapatkan nilai rasio S/N digunakan

rumus 2.7. Contoh perhitungan rasio S/N pada eksperimen ke-9 untuk kebulatan yaitu sebagai berikut.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right]$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{0,0733^2 + 0,0693^2 + 0,064^2}{3} \right]$$

$$\frac{S}{N} = 23,224$$

Setelah nilai rasio S/N didapatkan, dilakukan perhitungan normalisasi rasio S/N dengan karakteristik “lebih besar lebih baik” sesuai rumus 2.10.

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

$$x_i^*(k) = \frac{23,224 - 19,425}{23,727 - 19,425}$$

$$x_i^*(k) = 0,883$$

Dengan menggunakan langkah – langkah seperti contoh perhitungan di atas, didapatkan hasil perhitungan rasio S/N dan normalisasi S/N untuk seluruh eksperimen yang dapat dilihat pada tabel 4.4.

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	1,249	21,147	0,490	0,400
2	1,579	20,367	0,775	0,219
3	1,176	23,727	0,428	1,000
4	1,516	20,089	0,720	0,154
5	1,841	19,425	1,000	0,000
6	1,234	21,095	0,478	0,388
7	1,151	20,507	0,406	0,252
8	1,265	19,731	0,504	0,071
9	0,679	23,224	0,000	0,883

4.3.2 Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC)

Setelah mendapatkan nilai normalisasi rasio S/N, dapat dilanjutkan dengan metode Grey untuk menggabungkan kedua respon optimum. Perhitungan grey relational coefficient (GRC) diawali dengan perhitungan deviation sequence. Perumusan deviation sequence ditunjukkan oleh Persamaan 2.14 sedangkan untuk perumusan GRC ditunjukkan oleh Persamaan 2.13. Contoh perhitungan pada eksperimen ke-2 perubahan dimensi ditunjukkan oleh perhitungan berikut.

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N selanjutnya digunakan untuk perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dengan menghitung nilai deviation sequence dari tiap eksperimen terlebih dahulu dengan rumus 2.14 dilanjutkan menghitung nilai GRC menggunakan rumus

2.13. Contoh perhitungan *deviation sequence* pada eksperimen ke-9 untuk kebulatan yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta_{o,i}(k) &= |x_o^*(k) - x_i^*(k)| \\ \Delta_{o,i}(k) &= |1 - 0,883| \\ \Delta_{o,i}(k) &= 0,117\end{aligned}$$

Untuk contoh perhitungan GRC pada eksperimen ke-9 untuk kebulatan yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\xi_i(k) &= \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{o,i}(k) + \zeta\Delta_{max}} \\ \xi_i(k) &= \frac{0 + 0,5 \cdot 1}{0,117 + 0,5 \cdot 1} \\ \xi_i(k) &= 0,810\end{aligned}$$

Dengan menggunakan langkah – langkah seperti contoh perhitungan di atas, didapatkan hasil perhitungan *deviation sequence* dan GRC untuk seluruh eksperimen yang dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan *Deviation Sequence* dan GRC

Eksperimen	<i>Deviation Sequence</i>		<i>Grey Relational Coefficient</i>	
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan
1	0,510	0,600	0,495	0,455
2	0,225	0,781	0,689	0,390
3	0,572	0,000	0,466	1,000
4	0,280	0,846	0,641	0,372
5	0,000	1,000	1,000	0,333
6	0,522	0,612	0,489	0,450
7	0,594	0,748	0,457	0,400
8	0,496	0,929	0,502	0,350
9	1,000	0,117	0,333	0,810

4.3.3 *Grey-Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)*

Metode Fuzzy digunakan untuk menggabungkan hasil perhitungan GRC dari perubahan dimensi dan kebulatan supaya hasil yang didapatkan lebih akurat. Perhitungan GFRG menggunakan aplikasi “*Fuzzy Logic Toolbox*” pada *software* MATLAB. Hasil perhitungan GFRG untuk seluruh eksperimen penelitian dapat dilihat pada tabel 4.6.

Dari hasil perhitungan GFRG dapat diketahui tekanan injeksi dan tekanan *holding* optimal untuk mendapatkan hasil respon perubahan dimensi dan kebulatan terendah. Perhitungan rata-rata dari nilai GFRG berdasarkan tiap level sesuai variabel prosesnya digunakan untuk menentukan tekanan injeksi dan tekanan *holding* optimal dengan nilai GFRG terbesar merupakan parameter optimalnya. Perhitungan rata-rata GFRG dapat dilihat pada tabel 4.7.

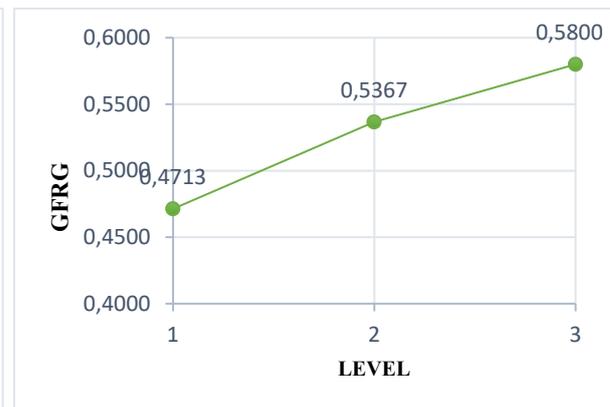
Berdasarkan perhitungan optimasi dengan metode Taguchi-Grey-Fuzzy, nilai tekanan injeksi optimal terdapat pada level satu, yaitu sebesar 9 MPa. Untuk nilai tekanan *holding* optimal terdapat pada level tiga, yaitu sebesar 9 MPa. Pada gambar 4.7 dapat dilihat pengaruh tiap variabel proses terhadap GFRG dalam bentuk grafik.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan GFRG

No	GRC		GFRG
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	
1	0,495	0,455	0,47
2	0,689	0,390	0,533
3	0,466	1,000	0,727
4	0,641	0,372	0,506
5	1,000	0,333	0,659
6	0,489	0,450	0,466
7	0,457	0,400	0,438
8	0,502	0,350	0,418
9	0,333	0,810	0,547
Rata-rata			0,5293

Tabel 4.7 Nilai Rata-rata Multirespon GFRG pada setiap Level Variabel Proses

Level	Variabel Proses	
	Tekanan injeksi	Tekanan <i>holding</i>
1	<u>0,577</u>	0,471
2	0,544	0,537
3	0,468	<u>0,580</u>
Selisih	0,1090	0,1087
Rank	2	1
Rata-rata	0,529	



Gambar 4.7 (a) Pengaruh Tekanan Injeksi terhadap Respon GFRG dan (b) Pengaruh Tekanan *Holding* terhadap Respon GFRG

4.3.4 ANOVA

ANOVA diawali dengan menghitung nilai *degree of freedom* (DF), dilanjutkan dengan menghitung *sum of square* (SS), *mean square* (MS), *F-value*, *P-value*, dan diakhiri dengan menghitung persen kontribusi berdasarkan tabel 2.7. Di bawah ini merupakan tahapan ANOVA dari penelitian ini.

1. Degree of Freedom

Degree of Freedom atau derajat kebebasan dari tiap variabel proses dihitung dengan mengurangi jumlah level yang diteliti dengan 1. Berikut ini merupakan perhitungan derajat kebebasan dari variabel tekanan *holding*.

$$\begin{aligned}DF_B &= k_A - 1 \\DF_B &= 3 - 1 = 2\end{aligned}$$

Untuk derajat kebebasan total dihitung dengan mengurangi jumlah eksperimen yang dilakukan dengan 1.

$$\begin{aligned}DF_T &= N - 1 \\DF_T &= 9 - 1 = 8\end{aligned}$$

Untuk derajat kebebasan *error* dihitung dengan mengurangi derajat kebebasan total dengan jumlah dari derajat kebebasan variabel proses.

$$\begin{aligned}DF_E &= DF_T - DF_A - DF_B \\DF_E &= 8 - 4 = 4\end{aligned}$$

2. Sum of Square

Perhitungan *sum of square* dari tekanan *holding* dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$\begin{aligned}SS_B &= a \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y})^2 \\SS_B &= 3 \times [(0,4713 - 0,529)^2 + (0,5367 - 0,529)^2 + (0,58 - 0,529)^2] \\SS_B &= 0,01795\end{aligned}$$

Untuk perhitungan *sum of square* total penelitian dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$\begin{aligned}SS_T &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y})^2 \\SS_T &= (0,47 - 0,529)^2 + (0,533 - 0,529)^2 + (0,727 - 0,529)^2 + (0,506 - 0,529)^2 \\&\quad + (0,659 - 0,529)^2 + (0,466 - 0,529)^2 + (0,438 - 0,529)^2 \\&\quad + (0,418 - 0,529)^2 + (0,547 - 0,529)^2 \\SS_T &= 0,08502\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}SS_E &= SS_T - SS_{Tr} \\SS_E &= 0,08502 - (0,01875 + 0,01795) \\SS_E &= 0,04832\end{aligned}$$

3. Mean Square

Mean square dihitung dengan membagi nilai *sum of square* dengan derajat kebebasan dari variabel tersebut. Contoh perhitungan dari *mean square* pada tekanan *holding* dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$\begin{aligned}MS_B &= \frac{SS_B}{DF_B} \\MS_B &= \frac{0,01795}{2} \\MS_B &= 0,008977\end{aligned}$$

4. F Statistik

Perhitungan nilai F pada tiap variabel proses dilakukan dengan membagi nilai *mean square* pada variabel dengan nilai *mean square error*. Contoh perhitungan nilai F pada tekanan *holding* dapat dilihat pada perhitungan berikut.

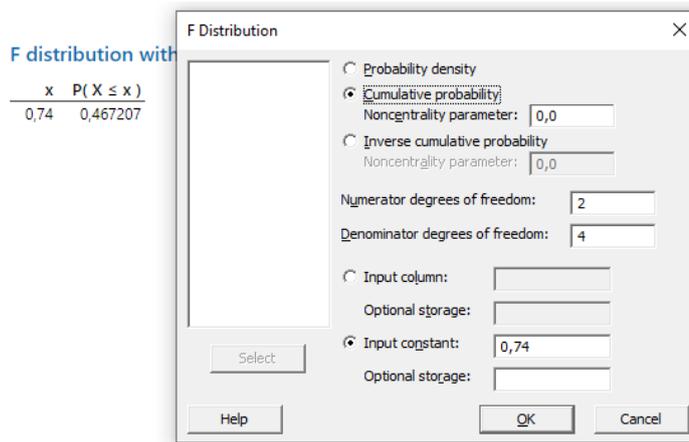
$$F = \frac{MS_B}{MS_E}$$

$$F = \frac{0,008977}{0,012081}$$

$$F = 0,74$$

5. P-value

Perhitungan *p-value* dilakukan dengan bantuan *software* Minitab. Langkah awal untuk menghitung *p-value* adalah memilih tab “*Calc*”, kemudian pilih “*Probability Distributions*”, lalu pilih “*F*”. Nilai yang diperlukan untuk perhitungan yaitu derajat kebebasan dari variabel proses, derajat kebebasan *error*, dan nilai F yang telah dihitung. Nilai *p-value* yang didapatkan sebesar $1-P(x)$, hal ini dikarenakan perhitungan menggunakan *right-tail*. Perhitungan *p-value* pada Minitab dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perhitungan *P-value* dengan Minitab

Setelah seluruh tahapan ANOVA dilakukan, hasil akhir dari ANOVA dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil ANOVA Penelitian

Parameter	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>	Kontribusi (%)
Tekanan Injeksi	2	0,01875	0,009373	0,78	0,519	22,054
Tekanan <i> Holding</i>	2	0,01795	0,008977	0,74	0,532	21,113
<i>Error</i>	4	0,04832	0,012081			56,834
Total	8	0,08502				100

6. Uji Hipotesis

Berdasarkan nilai yang telah didapatkan dari ANOVA, maka dapat dilakukan uji hipotesis dengan kesimpulan perhitungan sebagai berikut.

1. Variabel proses tekanan injeksi memiliki nilai *p-value* sebesar 0,519 Berdasarkan kriteria penolakan yang telah dibuat, maka dapat disimpulkan bahwa tekanan injeksi tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan dengan nilai kontribusi sebesar 22,054%.
2. Variabel proses tekanan *holding* memiliki nilai *p-value* sebesar 0,532 Berdasarkan kriteria penolakan yang telah dibuat, maka dapat disimpulkan bahwa tekanan *holding* tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan dengan nilai kontribusi sebesar 21,113%.

Hasil perhitungan yang telah dilakukan pada tahapan pengolahan data disimpulkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Akhir Optimasi Data

Variabel Proses	Parameter Optimal	Persen Kontribusi	<i>P-value</i>
Tekanan Injeksi	9 MPa	22,054%	0,519
Tekanan <i> Holding</i>	9 MPa	21,113%	0,532

4.4 Uji Konfirmasi

Sebelum melakukan uji konfirmasi, perlu dihitung terlebih dahulu nilai GFRG prediksi menggunakan parameter optimal yang telah didapatkan pada perhitungan sebelumnya. Prediksi nilai GFRG dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.29.

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

$$\hat{\gamma} = 0,529 + (0,58 - 0,529) + (0,5767 - 0,529)$$

$$\hat{\gamma} = 0,628$$

Untuk membuat batas toleransi dari GFRG prediksi tersebut, dilakukan perhitungan interval keyakinan berdasarkan persamaan 2.30.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;v1,v2} MS_E \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)}$$

$$CI = \sqrt{7,71 \cdot 0,012081 \cdot \left(\frac{5}{27} + \frac{1}{3} \right)}$$

$$CI = \pm 0,219$$

$$CI_{atas} = 0,847$$

$$CI_{bawah} = 0,409$$

Setelah menentukan nilai GFRG prediksi beserta rentang interval keyakinannya, eksperimen uji konfirmasi dapat dilakukan. Hasil eksperimen uji konfirmasi dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Eksperimen Uji Konfirmasi

Variabel Proses	Nomor	Variabel Respon	
		Perubahan Dimensi (%)	Kebulatan (mm)
Tekanan Injeksi 9 MPa Tekanan <i> Holding</i> 9 MPa	1	0,784	0,0813
	2	0,699	0,0986
	3	0,814	0,1013

Setelah data eksperimen uji konfirmasi didapatkan, perhitungan dilakukan seperti pada tahap sebelumnya. Sehingga nilai GFRG dapat diketahui. Hasil perhitungan GFRG dari uji konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan GFRG Uji Konfirmasi

	Rasio S/N	Normalisasi Rasio S/N	<i>Deviation Sequence</i>	GRC	GFRG
Perubahan dimensi	2,302	1,000	0	1	0,691
Kebulatan	20,523	0,255	0,745	0,402	

Dari hasil perhitungan GFRG uji konfirmasi, diketahui bahwa nilai GFRG tersebut berada di dalam rentang interval keyakinan yang dapat dilihat pada tabel 4.12, maka dapat disimpulkan bahwa perhitungan nilai optimal dari kedua variabel respon adalah valid.

Tabel 4.12 Hasil Uji Konfirmasi

Hasil Perhitungan	Nilai
Batas Atas GFRG	0,847
Batas Bawah GFRG	0,409
Nilai GFRG Konfirmasi	<u>0,691</u>

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Berdasarkan hasil ANOVA didapatkan nilai persen kontribusi dari tekanan injeksi terhadap perubahan dimensi dan kebulatan sebesar 22,054%. Berdasarkan uji hipotesis, tekanan injeksi tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil berbahan *stainless steel* 304L/PA-6 dikarenakan *p-value* bernilai 0,519 (lebih besar dari 0,05). Perhitungan optimasi dengan metode Taguchi-Grey-Fuzzy menunjukkan bahwa tekanan injeksi sebesar 9 MPa merupakan nilai optimal untuk menghasilkan perubahan dimensi dan kebulatan terendah.
2. Berdasarkan hasil ANOVA didapatkan nilai persen kontribusi dari tekanan *holding* terhadap perubahan dimensi dan kebulatan sebesar 21,113%. Berdasarkan uji hipotesis, tekanan *holding* tidak berpengaruh terhadap perubahan dimensi dan kebulatan proyektil berbahan *stainless steel* 304L/PA-6 dikarenakan *p-value* bernilai 0,532 (lebih besar dari 0,05). Perhitungan optimasi dengan metode Taguchi-Grey-Fuzzy menunjukkan bahwa tekanan *holding* sebesar 9 MPa merupakan nilai optimal untuk menghasilkan perubahan dimensi dan kebulatan terendah.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan agar pada penelitian selanjutnya didapatkan hasil yang lebih baik, antara lain:

1. Pembuatan *feedstock* menggunakan variabel yang optimal agar material yang digunakan homogen.
2. Kualitas pemanas yang digunakan pada mesin injeksi ditingkatkan agar temperatur pada *barrel* dan cetakan tidak berfluktuatif.
3. Penggunaan sistem kontrol yang lebih baik agar saat perubahan fase injeksi menjadi fase *holding* lebih stabil.
4. Penggunaan mekanisme proses injeksi yang lebih baik agar *repeatability* dari hasil injeksi juga bernilai baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Anugraha, V. G., & Widyastuti. (2014). Pengaruh Komposisi Sn dan Variasi Tekanan Kompaksi terhadap Densitas dan Kekerasan Komposit Cu-Sn untuk Aplikasi Proyektil Peluru Frangible dengan Metode Metalurgi Serbuk. *JURNAL TEKNIK POMITS*, 3(1), 102–107.
- Autodesk. (2021). *Moldflow Adviser Support and Learning*. <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/MoldflowAdviser-CLC-Results/files/Fill-or-flow-results/GUID-4F115A68-4469-4414-BB62-80B341FAC3AF.html>
- BASF. (2021). *Ultramid® B29 09 Product Information*. BASF. www.basf.com
- Bélanger, G., Germain-De-Grantham, Potvin, M., & Bélair, V. (1993). *Frangible Practice Ammunition* (Patent No. 5237930).
- Benini, J. C. (2000). *Frangible Metal Bullets, Ammunition and Method of Making Such Articles* (Patent No. 6,090,178).
- Bhattacharya, D., & Bepari, B. (2014). Feasibility study of recycled polypropylene through multi response optimization of injection moulding parameters using grey relational analysis. *Procedia Engineering*, 97, 186–196. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.241>
- Blank, L. T. (1980). *Statistical Procedures for Engineering, Management, and Science*. McGraw-Hill.
- Bramfitt, B. L. (2015). *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Engineering Mechanics* (M. Kutz, Ed.; 4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering An Introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, M. Y., Tzeng, H. W., Chen, Y. C., & Chen, S. C. (2008). The application of fuzzy theory for the control of weld line positions in injection-molded part. *ISA Transactions*, 47(1), 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2007.07.001>
- Das, B., Roy, S., Rai, R. N., & Saha, S. C. (2016). 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>
- ENGEL. (2022, July 10). *Engel Insert Catalog Product*. https://www.engelglobal.com/fileadmin/master/Downloads/Broschueren/ENGEL_insert_en.pdf
- Fischer, J. M. (2003). *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. Plastics Design Library/William Andrew Pub.
- Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems* (J. Brady, Ed.; 7th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Jonas, M. T. (2017). *Studi Rancang Bangun Dan Temperatur Zona Continuous Furnace Sintering Material Frangible Cu-5wt%Sn*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Joys, J., Anshutz, B., & Ramsey, K. C. (2012). *Lead Free Frangible Bullets* (Patent No. US 20120294751A1).
- Kazmer, David. (2007). *Injection Mold Design Engineering*. Hanser.
- 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>

- Komenda, J., Bui, X. S., Vitek, R., & Jedlička, L. (2017). Evaluation method of frangible bullets frangibility. *Advances in Military Technology*, 12(2), 185–193. <https://doi.org/10.3849/aimt.01169>
- Kurt, M., Kaynak, Y., Kamber, O. S., Mutlu, B., Bakir, B., & Koklu, U. (2009). Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5–8), 571–578. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2149-x>
- Kusić, D., & Hančić, A. (2016). Influence of molding conditions on the shrinkage and warpage behavior of standardized test specimens. *AIP Conference Proceedings*, 1779. <https://doi.org/10.1063/1.4965468>
- Lin, C.-M., & Chen, Y.-J. (2021). Taguchi Optimization of Roundness and Concentricity of a Plastic Injection Molded Barrel of a Telecentric Lens. *Polymers*, 13(19), 3419. <https://doi.org/10.3390/polym13193419>
- Lin, J. L., & Lin, C. L. (2002). The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. In *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (Vol. 42).
- Luca, A., Siesenis, H., & Riemer, O. (2018). Prediction of shrinkage and warpage effects of a micro component via injection molding process simulation. 167–170. https://doi.org/10.3850/978-981-11-2728-1_08
- Mahesh Naik, R., Shetty, P. B., Kotresh, K., & Avinash, L. (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>
- Mates, S. P., Rhorer, R., Banovic, S., Whinton, 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>
- Moayyedean, M., & Mamedov, A. (2019). Multi-objective optimization of injection molding process for determination of feasible moldability index. *Procedia CIRP*, 84, 769–773. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.213>
- Nakazawa, M. (2011). *Mold Basic Design Textbook*. IMDIA.
- Ozcelik, B., Ozbay, A., & Demirbas, E. (2010). Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9), 1359–1365. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.001>
- Pal, S. K., & Majumder, D. K. D. (1989). *FUZZY: Pendekatan Matematik untuk Pengenalan Pola* (1st ed.). Universitas Indonesia.
- Pomerleau, J., & Sanschagrin, B. (2006). Injection molding shrinkage of PP: Experimental progress. *Polymer Engineering and Science*, 46(9), 1275–1283. <https://doi.org/10.1002/pen.20595>
- Rosato, D. v., Rosato, M. G., & Rosato, D. v. (2000). Injection Molding Handbook. In *Injection Molding Handbook* (3rd ed.). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4597-2>
- Ross, P. J. (1989). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill.
- SAAMI. (2015). *Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Centerfire Pistol and Revolver Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers*. Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute, Inc.
- Sharma, S., Tamang, S., Devarasiddappa, D., & Chandrasekran, M. (2014). Fuzzy Logic Modeling and Multiple Performance Optimization in Turning GFRP Composites Using

- Desirability Function Analysis. *Procedia Materials Science*, 6, 1805–1814. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.211>
- Soejanto, I. (2009). *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi* (1st ed.). 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>
- 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>
- Tsany, R. B. S. (2017). *Studi Eksperimental Variabel Proses Injeksi dan Pengaruh Komposisi Material Biokomposit (Serat Sisal, Maleic Anhydride Polipropylene, Polypropylene) terhadap Kekuatan Tarik dan Impak*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Yanis, M. (2010). Analisis Profil Kebulatan untuk Menentukan Kesalahan Geometrik pada Pembuatan Komponen Menggunakan Mesin Bubut CNC. *Jurnal Rekayasa Sriwijaya*, 19(1), 50–58.

LAMPIRAN

A. Spesifikasi Bahan dan Mesin

Tabel A.1 Spesifikasi Material *Stainless Steel 304L*

Sifat	Keterangan
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

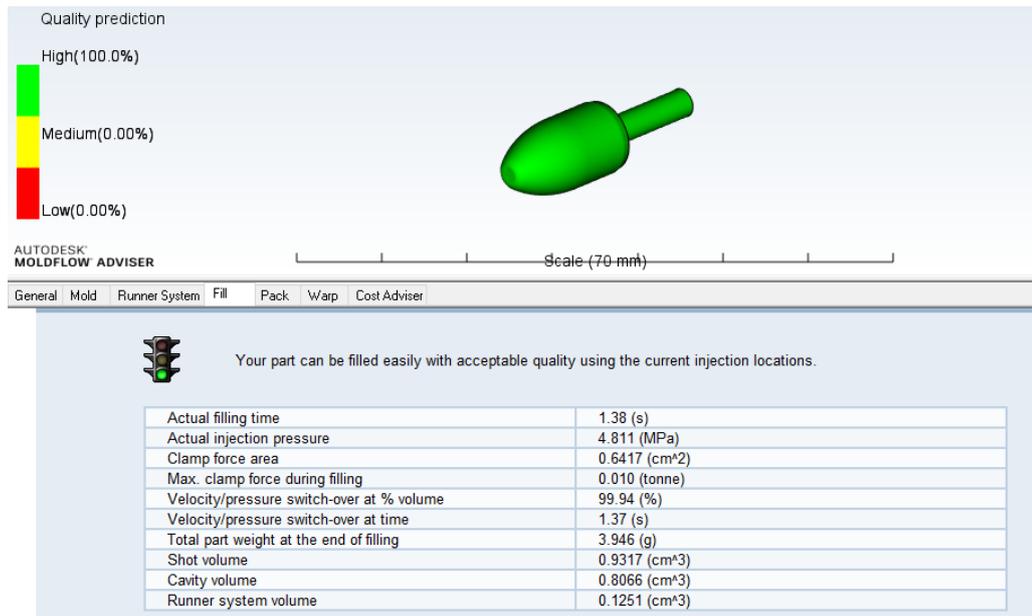
Tabel A.2 Spesifikasi Material Poliamida-6

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
Temperatur Transisi Gelas (°C)	41
Temperatur Leleh (°C)	228

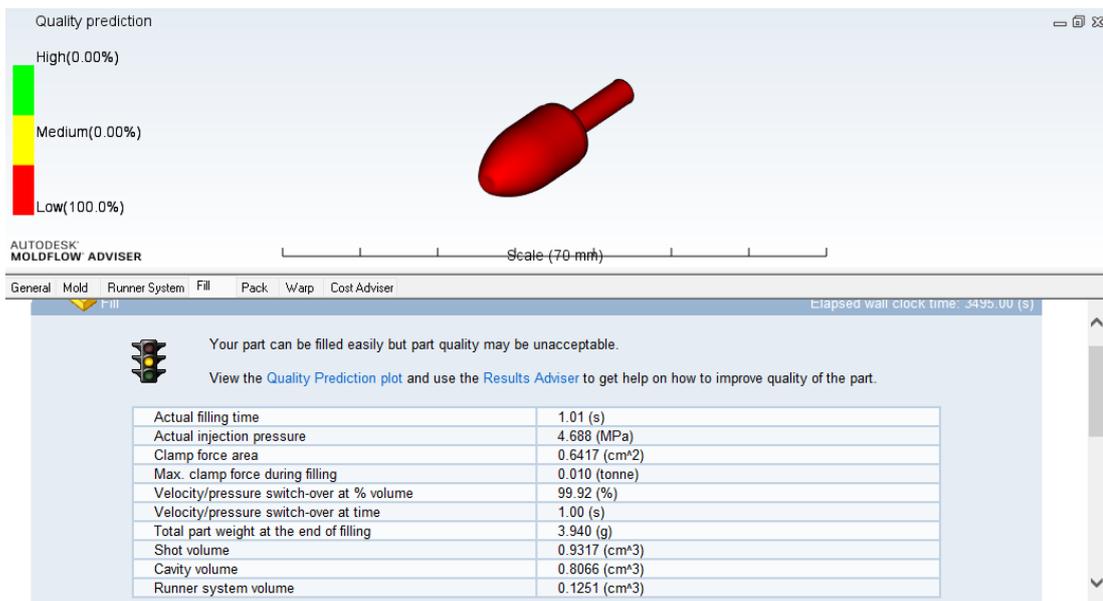
Tabel A.3 Spesifikasi Mesin Injeksi

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.	<i>Displacement Oil Pump</i> (L/s)	2,04
6.	Viskositas kinematik minyak (cSt)	10-860
7.	Daya (W)	4,08 (3 fasa)
8.	Dimensi mesin (mm)	900x400x1764,9

B. Hasil Simulasi Injeksi Proyektil Autodesk Moldflow Adviser 2021



Gambar B.1 Prediksi Kualitas Injeksi dengan Parameter Optimal Hasil Analisis “*Molding Window*”



Gambar B.2 Prediksi Kualitas Injeksi dengan Parameter Rekomendasi Material yang Digunakan pada Eksperimen

C. Hasil Perhitungan Optimasi Data Pengukuran

Tabel C.1 Perhitungan Optimasi Data

No	Loss Function		Rasio S/N		Normalisasi S/N		Deviation Sequence		GRC		GFRG
	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	Perubahan Dimensi	Kebulatan	
1	0,750	0,008	1,249	21,147	0,490	0,400	0,510	0,600	0,495	0,455	0,47
2	0,695	0,009	1,579	20,367	0,775	0,219	0,225	0,781	0,689	0,390	0,533
3	0,763	0,004	1,176	23,727	0,428	1,000	0,572	0,000	0,466	1,000	0,727
4	0,705	0,010	1,516	20,089	0,720	0,154	0,280	0,846	0,641	0,372	0,506
5	0,654	0,011	1,841	19,425	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,333	0,659
6	0,753	0,008	1,234	21,095	0,478	0,388	0,522	0,612	0,489	0,450	0,466
7	0,767	0,009	1,151	20,507	0,406	0,252	0,594	0,748	0,457	0,400	0,438
8	0,747	0,011	1,265	19,731	0,504	0,071	0,496	0,929	0,502	0,350	0,418
9	0,855	0,005	0,679	23,224	0,000	0,883	1,000	0,117	0,333	0,810	0,547
10	0,589	0,009	2,302	20,523	1,000	0,255	0,000	0,745	1,000	0,402	0,691

BIODATA PENULIS



Muhammad Rafii Pratama Wibowo dilahirkan di Tangerang pada 11 Februari 1999 dan merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan di SD Islamic Village (2005-2011), SMP Negeri 1 Tangerang (2011-2014), dan SMA Negeri 7 Tangerang (2014-2017). Setelah lulus dari bangku SMA, penulis melanjutkan pendidikannya di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember sebagai mahasiswa S1 (2018-2022).

Selain menempuh pendidikan di bangku kuliah, penulis juga mengikuti kegiatan non-akademik seperti organisasi dan kepanitiaan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis terdaftar sebagai Wakil Ketua LKKI Ash-Shaff 2020/2021. Dalam kepanitiaan, penulis pernah mengikuti kepesertaan panitia pada acara yang diadakan oleh Himpunan Mahasiswa Mesin. Selain itu, penulis juga terdaftar sebagai asisten praktikum Mekanika Fluida I (2021) dan Perpindahan Panas (2021). Pada tahun ketiga, penulis berkesempatan untuk melakukan kerja praktik di PT Pertamina International Shipping selama dua bulan pada Fungsi COA & *Non-fuel Operation*. Penulis dapat dihubungi melalui email rafiipra@gmail.com.