



**STUDI KELAYAKAN TEKNIK *FUSED DEPOSITION MODELLING*
3D PRINTING DENGAN FILAMEN
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL UNTUK PRODUK HELM**

SKRIPSI

Oleh

Syaiful Anam Yusfian Pratama

211910101046

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

2025



**STUDI KELAYAKAN TEKNIK *FUSED DEPOSITION MODELLING*
3D PRINTING DENGAN FILAMEN
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL UNTUK PRODUK HELM**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar sarjana pada
program studi S1 Teknik Mesin*

SKRIPSI

Oleh

Syaiful Anam Yusfian Pratama

211910101046

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

2025

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya yang tiada henti, sehingga proses penyusunan tugas akhir ini dapat berjalan lancar hingga selesai. Dengan kerendahan hati dan penuh rasa syukur, saya persembahkan skripsi ini kepada:

1. Terima kasih kepada Ayah saya, Masruhan Khoiri dan ibu saya Yuni Setiana, atas doa, dukungan, dan semangat yang selalu menjadi inspirasi dalam hidup saya, dan menjadi kekuatan saya. Skripsi ini adalah wujud kecil dari rasa terima kasih saya atas segala pengorbanan dan cinta yang telah diberikan.
2. Kepada diri saya Syaiful Anam YP yang telah berusaha dan pantang menyerah. Semoga ini menjadi awal yang baik menuju masa depan yang lebih cerah dan pengingat bahwa tekad akan membawa hasil.
3. Kepada keluarga besar Bapak Khusnandi dan seluruh saudara, terima kasih atas semangat, kebersamaan, dan dukungan yang telah diberikan sepanjang waktu.
4. Kepada seluruh dosen di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membimbing dan memberikan ilmu. Khususnya kepada Bapak Prof. Ir. Mahros Darsin S.T., M.Sc., Ph.D., IPM. serta Ibu Ir. Intan Hardiatama S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing, terimakasih atas kesabaran, bimbingan, serta ilmunya selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Kepada Ir. Dedi Dwilaksana S.T., M.T. dan Ir. Franciscus Xaverius Kristianta M.Eng.,IPM. Selaku dosen penguji skripsi saya, yang telah memberikan saran dan masukan yang sangat berharga, sehingga skripsi ini menjadi lebih baik dari sebelumnya.
6. Kepada sahabat Desy, Gilang, Celin dan teman-teman seperjuangan M23 atas dukungan, kebersamaan, doa, dan semangat.
7. Tim riset 3D *print* yang telah bekerja sama dan saling mendukung hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang, kecuali menurut kesanggupannya.”

(QS. Al-Baqarah : 286)

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.”

(QS. Al-Insyirah : 5-6)

“Janganlah takut jatuh, karena yang tidak pernah memanjatlah yang tidak pernah jatuh. Dan jangan takut gagal, karena yang tidak pernah gagal hanyalah orang-orang yang tidak pernah melangkah. Dan jangan takut salah, karena dengan kesalahan yang pertama kita dapat menambah pengetahuan untuk mencari jalan yang benar untuk langkah yang kedua.”

(Buya Hamka)

PERNYATAAN ORISINILITAS

Saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Syaiful Anam Yusfian Pratama

NIM : 211910101046

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: “Studi Kelayakan Teknik *Fused Deposition Modeling* 3D *Printing* Dengan Filamen *Polyethylene Terephthalate Glycol* Untuk Produk Helm” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan skripsi ilmiah yang harus dijunjung tinggi. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 17 Januari 2025

Yang menyatakan

(Syaiful Anam Yusfian Pratama)

NIM 211910101046

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul “Studi Kelayakan Teknik *Fused Deposition Modeling* 3D Printing Dengan Filamen *Polyethylene Terephthalate Glycol* Untuk Produk Helm” telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Jumat

Tanggal : 17 Januari 2025

Tempat : Fakultas Teknik, Universitas Jember

Pembimbing	Tanda Tangan
1. Pembimbing Utama Nama : Prof. Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM NIP 197003221995011001	(.....)
2. Pembimbing Anggota Nama : Ir. Intan Hardiatama S.T., M.T. NIP 198904282019032021	(.....)
Penguji	
1. Penguji Utama Nama : Ir.Dedi Dwilaksana S.T., M.T. NIP 196912011996021001	(.....)
2. Penguji Anggota Nama : Ir.Franciscus Xaverius Kristianta M.Eng.,IPM NIP 196501202001121001	(.....)

ABSTRAK

Helm adalah alat pelindung kepala yang harus memenuhi standar SNI. Teknologi 3D *printing* metode FDM, merupakan salah satu teknik additive manufacturing yang populer. Dalam metode ini, material dicetak lapis demi lapis menggunakan kontrol komputer untuk membentuk struktur tiga dimensi (3D). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter pencetakan FDM optimal, seperti suhu nozzle, kecepatan cetak, dan suhu bed, untuk meningkatkan kekuatan impact helm berbahan PETG dengan metode Taguchi. Eksperimen dilakukan menggunakan desain matriks orthogonal array L4 (2^3) dengan tiga kali pengulangan untuk setiap percobaan. Prosesnya meliputi desain model 3D, pencetakan spesimen menggunakan printer FDM, uji impact metode Charpy, analisis ANOVA, dan perhitungan biaya. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan impact terkecil sebesar 2,39 kJ/m², dan nilai kekuatan impact terbesar mencapai 3,34 kJ/m² pada suhu nozzle 230°C, kecepatan cetak 40 mm/s, dan suhu bed 80°C. Berdasarkan analisis ANOVA, hanya suhu nozzle yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan impact pada tingkat kepercayaan 95%, dengan kontribusi 74,03%. Kecepatan cetak dan suhu bed masing-masing hanya memberikan kontribusi sebesar 7,54% dan 0,06%.

Kata kunci : 3D *printing*, filamen PETG, *impact test*, *impact strength*

ABSTRACT

Helmets are head protective equipment that must meet SNI standards. 3D printing technology, FDM method, is one of the popular additive manufacturing techniques. In this method, materials are printed layer by layer using computer control to form a three-dimensional (3D) structure. This study aims to determine the optimal FDM printing parameters, such as nozzle temperature, print speed, and bed temperature, to improve the impact strength of PETG-based helmets using the Taguchi method. Experiments were conducted using an $L_4(2^3)$ matrix orthogonal array design with three repetitions for each experiment. The process includes 3D model design, specimen printing using FDM printer, Charpy method impact test, ANOVA analysis, and cost calculation. The results showed that the smallest impact strength was 2.39 kJ/m^2 , and the largest impact strength value reached 3.34 kJ/m^2 at a nozzle temperature of 230°C , printing speed of 40 mm/s , and bed temperature of 80°C . Based on ANOVA analysis, only nozzle temperature significantly influenced impact strength at the 95% confidence level, with a contribution of 74.03%. Molding speed and bed temperature only contributed 7.54% and 0.06%, respectively.

Keywords: 3D printing, PETG filament, impact test, impact strength

RINGKASAN

STUDI KELAYAKAN TEKNIK *FUSED DEPOSITION MODELLING 3D PRINTING* DENGAN FILAMEN *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL* UNTUK PRODUK HELM; Syaiful Anam Yusfian Pratama, 211910101046, 2025; 38 Halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember

Helm adalah alat pelindung kepala yang wajib memenuhi standar SNI, umumnya terbuat dari polimer polypropylene dengan teknik *injection molding*. Sebagai alternatif, teknologi 3D *printing* metode FDM merupakan salah satu teknik *additive manufacturing* yang mencetak material secara lapis demi lapis menggunakan kontrol komputer untuk membentuk struktur tiga dimensi (3D). Namun, penerapan teknologi FDM 3D *print* masih membutuhkan penelitian lebih lanjut. Proses pencetakan dilakukan dengan memvariasikan parameter seperti suhu *nozzle*, kecepatan cetak, dan suhu *bed* untuk meningkatkan kekuatan impact helm berbahan PETG. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk menghasilkan produk berkualitas.

Penelitian ini menggunakan metode Taguchi, dengan eksperimen dilakukan menggunakan desain matriks orthogonal array L4 (2^3) dengan tiga kali pengulangan untuk setiap percobaan. Metode Taguchi memungkinkan perancangan eksperimen dengan jumlah uji yang lebih sedikit tetapi tetap memberikan hasil yang informatif. Pendekatan ini membantu perancang mengidentifikasi faktor-faktor utama yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas produk. Prosesnya meliputi desain model 3D, pencetakan spesimen menggunakan printer FDM, uji impact metode Charpy, analisis ANOVA, dan perhitungan biaya.

Kombinasi parameter optimal yang menghasilkan kekuatan impact tertinggi sebesar 3,64 kJ/m² adalah suhu *nozzle* pada level 1 (230°C), kecepatan cetak level 1 (40 mm/s), dan suhu *bed* level 2 (80°C). Kontribusi masing-masing faktor terhadap kekuatan impact adalah suhu *nozzle* 74,03%, sedangkan kecepatan cetak dan suhu *bed* masing-masing berkontribusi 7,54% dan 0,06%.

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Kelayakan Teknik *Fused Deposition Modeling* 3D *Printing* Dengan Filamen *Polyethylene Terephthalate Glycol* Untuk Produk Helm”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi jenjang Strata Satu (S-1) pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi.

1. Kepada kedua orang tua saya, Ayah Masruhan Khoiri dan Ibu Yuni Setiana, yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, kasih sayang, serta doa tulus yang tidak pernah terputus.
2. Bapak Ir. Danang Yudistiro, S.T., M.T., Ph.D., selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.
3. Bapak Prof. Ir. Mahros Darsin S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Dosen Pembimbing Utama saya, serta Ibu Ir. Intan Hardiatama S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota, yang telah memberikan bimbingan, ilmu, motivasi, dan masukan berharga selama proses penelitian berlangsung.
4. Bapak Ir. Dedi Dwilaksana S.T., M.T., selaku Dosen Penguji Utama, dan Bapak Ir. Franciscus Xaverius Kristianta M.Eng.,IPM., selaku Dosen Penguji Anggota, yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta saran konstruktif dalam penyelesaian penelitian ini.
5. Seluruh dosen pengajar dan staf akademik Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, yang telah berbagi ilmu pengetahuan dan selalu memberikan layanan terbaik kepada para mahasiswa.
6. Tim riset 3D *print* yang telah bekerja sama dan saling mendukung hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

7. Teman-teman seperjuangan M23 (Teknik Mesin Angkatan 2021) yang terus memberikan semangat, dukungan, dan doa selama perjalanan ini.



DAFTAR ISI

	Halaman
COVER JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINILITAS	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACK	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR ISTILAH	xvi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Terdahulu	4
2.2 Helm SNI	4
2.3 3D Printing Fused Deposition Modeling (FDM)	5
2.3.1 Desain <i>Software</i> (CAD)	6
2.3.2 Pemrograman	7
2.3.3 Pencetakan	7
2.4 Parameter	7

2.5	Filamen	7
2.6	Uji Impak Charpy	8
2.7	Metode Taguchi	10
2.8	Hipotesis	11
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN		12
3.1	Metode Penelitian	12
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian	12
3.3	Alat dan Bahan	12
3.4	Alat dan Bahan	12
3.4.1	Variabel Bebas	12
3.4.2	Variabel Kontrol	13
3.4.3	Variabel Terikat	13
3.4.4	Matriks Penelitian	13
3.5	Metode Pelaksanaan	14
3.5.1	<i>Software Prusa Slicer</i>	14
3.5.2	Pembuatan Model Spesimen	14
3.5.3	Slicing Data dan Pencetakan	14
3.5.4	Pengujian Impak Metode <i>Charpy</i>	14
3.6	Analisis Data	15
3.7	Perhitungan Biaya	15
3.8	Diagram Alir	15
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN		17
4.1	Analisis Sifat Mekanis	17
4.1.1	Hasil dan Analisis Kekuatan Impak	17
4.1.2	Perhitungan <i>Ratio S/N</i> Terhadap Kekuatan Impak	19
4.1.3	Kombinasi Faktor Optimal Kekuatan Impak	20
4.1.4	Perhitungan ANOVA Terhadap Kekuatan Impak	22
4.1.5	Uji F	24
4.1.6	Persen Kontribusi Terhadap Kekuatan Impak	25
4.1.7	Prediksi Respon terhadap Nilai Kekuatan Impak	26
4.2	Analisis Pengaruh Parameter	27

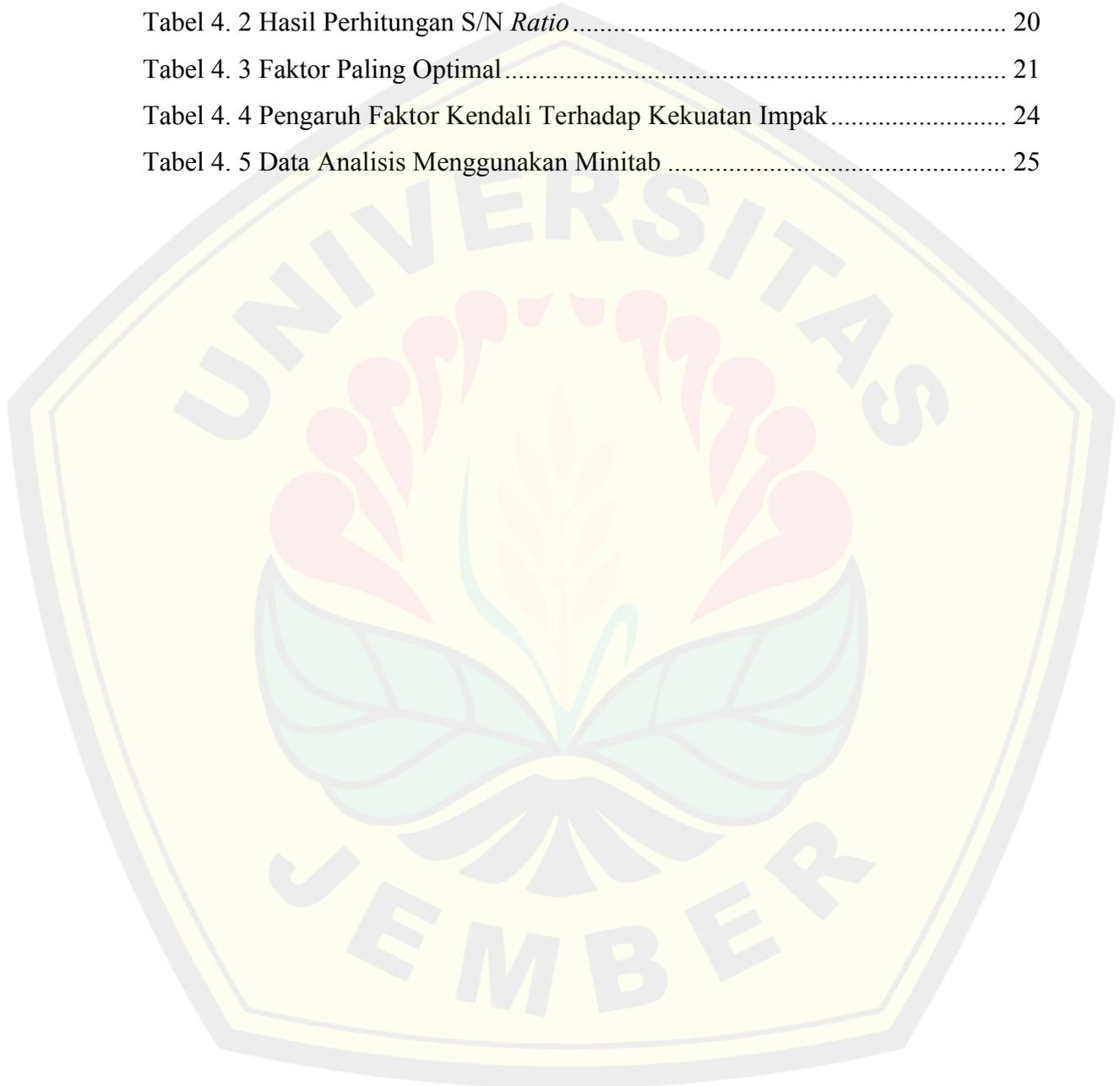
4.2.1	Pengaruh <i>Nozzle Temperature</i>	27
4.2.2	Pengaruh <i>Printing Speed</i>	27
4.2.3	Pengaruh <i>Bed Temperature</i>	28
4.3	Foto Mikro	28
4.4	Analisis Kelayakan Helm	29
4.5	Desain dan Manufaktur Helm	30
4.5.1	Desain Cangkang Helm.....	30
4.5.2	Proses Manufaktur Cangkang Helm	31
4.6	Perhitungan Biaya	32
BAB 5. PENUTUP		34
5.1	Kesimpulan	34
5.2	Kesimpulan	34
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Helm Standar SNI (Simanjuntak, 2017)	5
Gambar 2. 2 Mesin 3D Print FDM (Tunçel, 2024).....	6
Gambar 2. 3 Uji Impak Charpy (Tunçel, 2024).....	9
Gambar 2. 4 Skema Uji Impak Charpy (PUTP ATMI)	9
Gambar 2. 5 Rumus Mencari Nilai Impak (PUTP ATMI)	9
Gambar 3. 1 Spesimen ISO 179-1.....	14
Gambar 3. 2 Diagram Alir	16
Gambar 4. 1 Spesimen Sebelum Dilakukan Pengujian.....	17
Gambar 4. 2 Validasi <i>Nozzle Temperature</i> dan <i>Bed Temperature</i>	18
Gambar 4. 3 Spesimen Setelah Pengujian Impak	18
Gambar 4. 4 Rata-rata <i>S/N Ratio</i> Menggunakan Minitab.....	21
Gambar 4. 5 Spesimen 1 (a) Permukaan Atas dan (b) Patahan Uji	29
Gambar 4. 6 Spesimen 4 (a) Permukaan Atas dan (b) Patahan Uji	29
Gambar 4. 7 Gambar Kerja Produk Cangkang Helm	31
Gambar 4. 8 Rescale Cangkang Helm Hasil FDM 3D Print Filamen PETG	32

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Orthogonal Array</i> L4 (2^3) (Vemanaboina et al., 2018)	11
Tabel 3. 1 Variabel Bebas	13
Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Impak	19
Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan <i>S/N Ratio</i>	20
Tabel 4. 3 Faktor Paling Optimal	21
Tabel 4. 4 Pengaruh Faktor Kendali Terhadap Kekuatan Impak	24
Tabel 4. 5 Data Analisis Menggunakan Minitab	25



DAFTAR NOTASI

- $^{\circ}\text{C}$: Derajat celcius
 μ : Rata-rata prediksi
 ρ : Persen kontribusi
A : Luas penampang
DoF : Derajat kebebasan total
DoF_A : Derajat kebebasan tiap faktor
DoF_E : Derajat kebebasan *error*
mm : Milimeter
SS_A : Jumlah kuadrat tiap faktor
SS_E : Rata-rata jumlah kuadrat *error*
SS_M : Jumlah kuadrat *means*
SS_T : Jumlah kuadrat total
MS_A : Rata-rata kuadrat tiap faktor
MS_E : Rata-rata kuadrat *error*

DAFTAR ISTILAH

<u>Singkatan/istilah</u>	<u>Arti dan keterangan</u>
ANOVA	<i>Analysys of Variance</i>
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
STL	<i>Standart Triangle Language</i>
IsDB	<i>Islamic Development Bank</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>
S/N	<i>Signal/Noise</i>

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Helm adalah alat pelindung kepala yang berfungsi untuk melindungi saat berkendara untuk mencegah terjadinya cedera saat terjadi benturan. Penggunaan helm diwajibkan bagi pengendara motor dan sepeda sesuai dengan ketentuan UU No. 22 tahun 2009 tentang lalu lintas dan angkutan jalan, pasal 57 ayat 1 dan 2. Pasal 106 ayat 8 menyatakan bahwa helm yang digunakan harus memenuhi standar SNI, yaitu SNI 1811-2007. Cangkang helm dibuat dari material yang kokoh, tahan benturan, tidak berbahan logam, tidak mudah berubah bentuk, dan tahan terhadap pengaruh cairan pembersih (Mayleni et al., 2021). Polimer polypropelene pada umumnya digunakan sebagai bahan membuat helm standar SNI (Fadllu et al., 2014). *Ijection molding* sering digunakan dalam perancangan helm modern dengan bahan seperti polimer termoplastik dan thermoset (Fahmi et al., 2022).

Salah satu solusi yang tepat selain menggunakan proses injection molding adalah 3D *print* (Darsin et al., 2024). Teknologi 3D *printing* adalah salah satu bentuk *additive manufacturing*, di mana material disusun lapis demi lapis dengan kontrol komputer untuk membentuk struktur tiga dimensi (3D) (Andriyansyah et al., 2021). Di antara berbagai teknik pencetakan 3D, *fused deposition modeling* (FDM) menjadi salah satu yang paling populer. Teknik ini memiliki konsep yang sederhana, tidak membutuhkan pelarut atau lem yang berpotensi berbahaya bagi kesehatan, dan yang terpenting, memiliki biaya operasional rendah dan berukuran kecil (Mazzanti et al., 2019).

Teknologi 3D *printing* FDM beroperasi dengan melelehkan filamen termoplastik melalui nosel panas pada suhu tertentu, kemudian menyusunnya lapis demi lapis untuk membentuk objek yang diinginkan (Darsin et al., 2024). Teknologi FDM (*fused deposition modeling*) memiliki kelemahan karena proses pencetakannya yang berlapis-lapis, sehingga garis-garis antar lapisan terlihat jelas. Kelemahan terbesar dari *printer* 3D tipe FDM adalah sering terjadi kesalahan dalam proses pencetakan. Hasil akhir dari proses 3D printing sering kali tidak sesuai

dengan desain awal, seperti ketidaksesuaian dimensi, kualitas permukaan yang kurang baik, retakan, dan lain-lain (Zakaria et al., 2022).

Saat ini, *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) merupakan salah satu polimer yang umum digunakan dalam proses pencetakan 3D. PETG memiliki densitas $1,38 \text{ g/cm}^3$, dengan suhu pencetakan antara 230°C - 265°C dan suhu bed di atas 60°C . Beberapa keunggulan PETG termasuk ketahanan yang baik terhadap cuaca, tidak rusak atau pudar akibat paparan sinar UV, tidak menghasilkan bau selama pencetakan, memiliki sifat adhesi yang sangat baik sehingga dapat menempel dengan kuat pada meja pemanas, serta memiliki tingkat penyusutan termal yang rendah (Hidayat et al., 2018).

Menurut (Darsin et al., 2024), filamen PETG menunjukkan nilai kekuatan impact tertinggi sebesar $1,20 \text{ kJ/m}^2$ pada ketebalan lapisan $0,3 \text{ mm}$. Di sisi lain, filamen TPU memiliki tegangan sekitar 10 MPa ketika diregangkan hingga panjang 200 mm , tanpa terpengaruh oleh ketebalan lapisan. Sifat PETG yang tahan benturan dan cuaca, serta kemampuannya untuk melekat dengan baik, menjadikannya pilihan ideal untuk mencetak produk. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh (Prihandaru, 2024), nilai uji impact filamen PETG tertinggi dengan nilai uji impact sebesar $3,64 \text{ kJ/m}^2$. Penelitian ini bertujuan untuk memperdalam tentang upaya dan pengaruh variasi parameter cetak untuk meningkatkan kekuatan impact dalam pencetakan 3D produk helm kendaraan motor menggunakan filamen PETG sesuai spesifikasi helm SNI.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan dilakukannya penelitian ini, dapat ditemukan rumusan masalah sebagai berikut:

- 1 Apa saja parameter yang mempengaruhi sifat mekanis FDM 3D *printing* filamen PETG terhadap kekuatan impact?
- 2 Apa pengaruh parameter pada proses manufaktur saat pencetakan menggunakan FDM 3D *printing*?
- 3 Bagaimana analisis biaya produksi helm motor menggunakan filamen PETG dengan proses FDM 3D *printing*?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi parameter paling optimal yang dapat meningkatkan karakteristik mekanis material PETG, terutama dalam hal kekuatan impact menggunakan mesin pencetakan FDM 3D *printing*.
2. Memaksimalkan proses manufaktur untuk menghasilkan produk dengan sifat mekanis yang unggul serta meningkatkan efisiensi dalam produksi.
3. Efisiensi biaya produksi helm motor, sehingga dapat mengambil keputusan dalam melakukan proses produksi.

1.4 Manfaat

Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan akan diperoleh manfaat sebagai berikut:

1. Dapat digunakan untuk mengetahui kelayakan penggunaan filamen PETG pada FDM 3D printing dalam pembuatan produk helm, dengan pada analisis sifat mekanik kekuatan uji impact, kualitas manufaktur, dan perbandingan biaya produksi antara 3D printing dan metode manufaktur tradisional.
2. Diharapkan penelitian ini bisa dikembangkan lagi pada proses 3D printing dengan filamen PETG dengan kombinasi parameter yang berbeda untuk menghindari penurunan kualitas spesimen yang akan dicetak.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini difokuskan hanya pada filamen PETG.
2. Penelitian ini tidak membahas faktor lain, seperti suhu ruangan, kelembapan, dan jenis mesin pencetakan 3D.
3. Kelayakan produk akhir dinilai berdasarkan hasil uji kekuatan impact.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Balint et al., 2021) melakukan studi yang membandingkan kekuatan tarik antara filamen PLA dan PETG dengan parameter cetak yang berbeda. Untuk PLA, digunakan *layer height* 0,3 mm, *fill percentage* 100%, *heated bed* 55°C, *hot end layer* 205°C, dan kecepatan cetak 50 mm/s. Sementara itu, untuk PETG, parameter yang digunakan adalah *layer height* 0,3 mm, *fill percentage* 100%, *heated bed* 90°C, *hot end layer* 240°C, dan kecepatan cetak 50 mm/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa filamen PETG memiliki kekuatan tarik rata-rata 49,84 MPa, yang lebih tinggi dibandingkan PLA dengan kekuatan tarik rata-rata 45,46 MPa. Penelitian ini mengindikasikan bahwa PETG memiliki ketahanan tarik yang lebih baik dibandingkan PLA.

Dan (Hsueh et al., 2021) juga melakukan eksperimen untuk mengukur kekuatan tarik material PLA dan PETG. Variasi yang digunakan meliputi suhu cetak dan kecepatan cetak, dengan densitas infill sebesar 20%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi untuk filamen PLA diperoleh pada suhu cetak 220°C dan kecepatan cetak 45 mm/s, dengan nilai sebesar 30 MPa. Sementara itu, untuk filamen PETG, kekuatan tarik tertinggi ditemukan pada suhu cetak 245°C dan kecepatan cetak 25 mm/s, dengan nilai 18 MPa

Sedangkan menurut (Darsin et al., 2024), faktor yang mempengaruhi kekuatan impak hasil 3D printing menggunakan bahan TPU+PETG adalah tinggi lapisan sebesar 63,97%, temperatur nozzle sebesar 6,19%, kecepatan cetak sebesar 2,07%, dan temperatur bed sebesar 4,74%. Kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan kekuatan impak tertinggi adalah tinggi lapisan 0,2 mm, temperatur nozzle 220°C, kecepatan cetak 50 mm/s, dan temperatur bed 75°C.

2.2 Helm SNI

Helm adalah alat pelindung penting yang dirancang untuk melindungi kepala saat berkendara, sehingga mengurangi risiko cedera akibat benturan. Pemakaian helm diwajibkan bagi pengendara motor maupun sepeda, sesuai dengan UU No. 22

Tahun 2009 tentang Lalu lintas dan angkutan jalan, pasal 57 ayat 1 dan ayat 2. Pasal 106 ayat 8 juga menetapkan bahwa helm yang digunakan harus memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI), yaitu SNI 1811-2007 Bagian cangkang helm merupakan komponen penting untuk keselamatan, terbuat dari material kuat, tahan benturan, non-logam, dan tahan terhadap cairan pembersih. Helm umumnya terbuat dari polimer polipropilena, yang memiliki sifat isolasi termal dan listrik yang baik tetapi rentan pada suhu rendah (Mayleni et al., 2021).

Injection molding merupakan proses manufaktur yang digunakan untuk memproduksi barang jadi dengan cara menyuntikkan bahan cair ke dalam cetakan. Proses ini dapat menggunakan berbagai jenis bahan, terutama polimer termoplastik dan termoset. Desain helm yang lebih modern dapat dirancang dengan bantuan simulasi *injection molding* berbasis komputer, yang memungkinkan hasil produksi yang lebih optimal (Fahmi et al., 2022). Ilustrasi helm SNI disajikan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2. 1 Helm Standar SNI (Simanjuntak, 2017)

2.3 3D Printing Fused Deposition Modeling (FDM)

Teknologi 3D printing merupakan bagian dari metode manufaktur modern yang dikenal sebagai *additive manufacturing*. Metode ini bekerja dengan menumpuk lapisan material secara bertahap hingga membentuk objek tiga dimensi. Salah satu keunggulan dari teknologi ini adalah kemampuannya untuk mencetak objek dengan cepat, bahkan pada tahap awal desain atau prototyping, yang sering disebut sebagai rapid prototyping. Seiring perkembangannya, *3D printing* tidak hanya terbatas pada pembuatan prototipe, tetapi juga mampu menghasilkan produk fungsional. Prosesnya juga menggunakan komponen yang lebih sederhana sehingga lebih

hemat energi. Selain itu, metode ini memungkinkan pembuatan objek dengan tingkat kompleksitas yang tinggi namun tetap dengan biaya yang relatif lebih rendah (Andriyansyah et al., 2021).

Di antara berbagai teknik cetak 3D, *fused deposition modeling* (FDM) adalah yang paling umum digunakan. Teknologi ini memiliki konsep sederhana, tidak memerlukan pelarut atau perekat berbahaya, dan yang terpenting, peralatan cetaknya terjangkau serta berukuran kecil sehingga bisa diletakkan di atas meja. Walaupun FDM memiliki banyak keunggulan, ada juga beberapa keterbatasan. Misalnya, suhu filamen sangat mempengaruhi viskositas filamen cair. Suhu ini tidak boleh terlalu tinggi agar aliran lancar melalui nozzle, namun juga tidak boleh terlalu rendah agar filamen yang dihasilkan cukup kuat untuk menopang lapisan berikutnya. Tantangan utama lainnya adalah sifat mekanis dari produk akhir yang dihasilkan (Mazzanti et al., 2019). Pada Gambar 2.2 dapat dilihat ilustrasi mesin 3D printing FDM.



Gambar 2. 2 Mesin 3D Print FDM (Tunçel, 2024)

Proses pencetakan objek menggunakan 3D printing relatif sederhana, setidaknya ada tiga langkah utama:

2.3.1 Desain *Software* (CAD)

Langkah pertama dalam proses pembuatan objek dengan mesin 3D printing adalah merancang desain menggunakan software (CAD) khusus, seperti Autodesk Inventor, Fusion 360, AutoCad, dan lainnya. Setelah desain selesai, file disimpan dalam format stl untuk proses pencetakan selanjutnya.

2.3.2 Pemrograman

Proses pemrograman parameter dilakukan untuk menentukan berbagai aspek penting dari objek yang akan dicetak, seperti ketebalan lapisan, *infill density*, *infill patern*, *printing speed*, *layer high*, *bed temperature*, *nozzle temperature*, *fan speed*, dan lainnya. Pengaturan ini biasanya dilakukan melalui perangkat lunak seperti Ultimaker Cura.

2.3.3 Pencetakan

Proses pencetakan menggunakan data desain yang telah dibuat sebelumnya, biasanya diunggah ke mesin 3D *printing* melalui *flashdisk* atau kartu memori, tergantung jenis mesin yang digunakan. Mesin 3D *printing* dilengkapi dengan panel kontrol yang memungkinkan pengoperasian serta pengaturan parameter yang dapat disesuaikan. Selama pencetakan, mesin bekerja dengan menambahkan material secara bertahap, lapis demi lapis, hingga objek terbentuk sepenuhnya, sehingga dikenal sebagai *additive manufacturing* (Oropallo & Piegl, 2016).

2.4 Parameter

Pada proses 3D *printing*, diperlukan penyesuaian pengaturan yang tepat untuk memastikan objek yang dihasilkan memiliki karakteristik sesuai keinginan pengguna serta meningkatkan efisiensi produksi. Penyesuaian ini dilakukan melalui perangkat lunak *licer* sebelum pencetakan dimulai. Beberapa faktor kunci yang perlu diperhatikan antara lain ketebalan lapisan, sudut raster, orientasi pencetakan, kepadatan pengisi, kecepatan cetak, pola pengisi, suhu ekstrusi, lebar raster, diameter *nozzle*, lebar kontur, jarak antar kontur, jumlah kontur, serta celah udara, dan lain-lain (Solomon et al., 2020).

2.5 Filamen

Dalam proses pembuatan objek menggunakan teknologi pencetakan 3D, diperlukan bahan penyusun yang dikenal sebagai filamen. Filamen ini tersedia dalam berbagai jenis, umumnya terbuat dari polimer atau logam, dan memiliki

parameter pencetakan yang berbeda, seperti suhu nozzle dan suhu bed. Penelitian ini akan memfokuskan pada material PETG.

PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) adalah salah satu jenis polimer dengan densitas $1,38 \text{ g/cm}^3$ yang memiliki berbagai keunggulan. Di antara keunggulan tersebut adalah ketahanannya terhadap cuaca, kemampuannya untuk tidak pudar atau rusak ketika terpapar sinar UV, serta tidak menghasilkan bau selama proses pencetakan. Selain itu, PETG memiliki sifat adhesif yang baik, memungkinkan filamen ini menempel dengan kuat pada permukaan meja pemanas, dan memiliki faktor penyusutan termal yang rendah. Polimer ini banyak digunakan dalam pencetakan 3D dengan suhu pencetakan berkisar antara 230°C hingga 265°C , serta suhu *bed* di atas 60°C (Riza et al., 2020).

2.6 Uji Impak *Charpy*

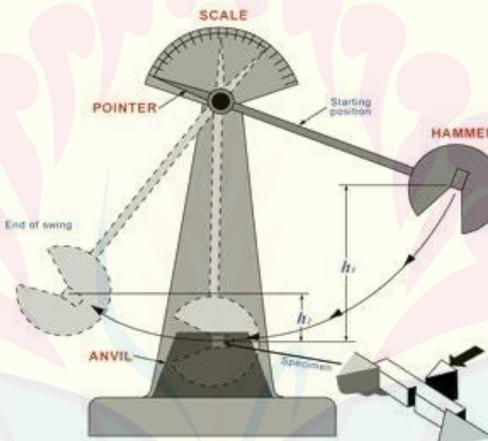
Uji impak adalah suatu pengujian yang bertujuan untuk mengukur ketangguhan suatu spesimen terhadap beban secara tiba-tiba melalui proses tumbukan. Ketangguhan ini diukur dengan energi yang diperlukan untuk mematahkan atau merusak bahan, yang ditentukan dari luas daerah di bawah kurva tegangan regangan. Uji impak digunakan untuk menentukan material yang rapuh atau ulet akibat gerak benda berdasarkan sifat ketangguhannya (Kumar et al., 2017).

Pengujian Impak dilakukan untuk mengukur respons material terhadap beban yang dapat menyebabkan deformasi mendadak atau kerusakan total, serta untuk menentukan energi yang diserap. Energi patah biasanya diukur dengan melepaskan palu berat di ujung pendulum yang bertumbukan dengan spesimen yang ditopang pada perlengkapan uji (Tunçel, 2024). Uji impak *charpy* disajikan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Uji Impak Charpy (Tunçel, 2024)

Skema dan persamaan energi potensial untuk menghitung energi yang diserap material dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 4 Skema Uji Impak Charpy (PUTP ATMI)

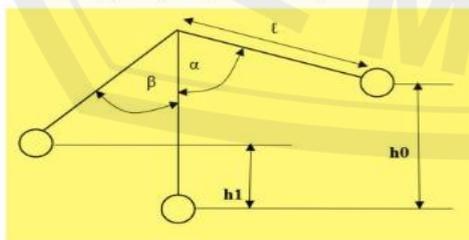
Mencari nilai kekuatan Impak

putp | PUSAT UNGGULAN
TEKNOLOGI PLASTIK



Energi yang diserap
 $= E_p - E_m$
 $= m \cdot g (h_1 - h_2)$
 $= m \cdot g (\lambda (1 - \cos \alpha) - \lambda (\cos \beta - \cos \alpha))$
 $= m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha)$

- Energi yang diserap (Joule)
 E_p = Energi Potensial
 E_m = Energi Mekanik
 m = massa pendulum (kg)
 g = gravitasi (m/s^2)
 h_1 = ketinggian mula-mula pendulum dengan spesimen (m)
 h_2 = ketinggian akhir pendulum dengan spesimen (m)
 λ = jarak lengan pengayun (m)
 α = sudut posisi awal pendulum
 β = sudut posisi akhir pendulum



Gambar 2. 5 Rumus Mencari Nilai Impak (PUTP ATMI)

Dalam pengujian ini, kondisi operasional material yang seringkali melibatkan beban mendadak disimulasikan. Uji impak yang akan digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada standar ISO 179-1 untuk kekuatan impak plastik material dengan tipe pengujian metode *charpy* serta spesimen diberi takikan di bagian tengah sedalam 0.2 mm V notch A sebagai standar dalam pengujian. Pada uji impak spesimen ini memakai metode *charpy*. Sesuai standar ISO 179-1, ukuran spesimen uji impak memiliki panjang 80 mm, lebar 10 mm dan ketebalan 4 mm (Kumar et al., 2017).

2.7 Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah pendekatan baru dalam teknik yang bertujuan meningkatkan kualitas produk dan proses, sekaligus mengurangi biaya dan penggunaan sumber daya secara efisien. Pendekatan ini membuat produk atau proses lebih tahan terhadap gangguan (*noise*), sehingga sering disebut sebagai desain yang kokoh (*robust design*) (Soejanto, 2009).

Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh berbagai parameter proses terhadap spesimen dengan mengelompokkan hasil eksperimen secara statistik berdasarkan sumber-sumber variasi. Faktor-faktor utama dalam pengelompokan analisis ANOVA meliputi nilai Mq , SqA (kuadrat rata-rata untuk setiap faktor), St (total *sum of squares*), rasio F (*F-ratio*), Df (derajat kebebasan), Sq' (kuadrat rata-rata sisa), p -value (nilai signifikansi), dan $\rho\%$ (persentase kontribusi) (Riza et al., 2020).

Dengan menggunakan desain eksperimen yang terencana secara cermat, metode ini memanfaatkan susunan ortogonal dan analisis rasio sinyal terhadap *noise* (S/N) untuk mengevaluasi hasil. Pendekatan ini memungkinkan penentuan tingkat parameter optimal dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit, sehingga efisiensi dalam proses eksperimen dapat ditingkatkan (Vemanaboina et al., 2018). Eksperimen Taguchi $L4$ (2^3) dilakukan dalam proses pencetakan 3D, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 *Orthogonal Array* L4 (2^3) (Vemanaboina et al., 2018)

<i>Trails</i>	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

2.8 Hipotesis

Penelitian ini membahas mengenai analisis kekuatan impak filamen PETG dari hasil pencetakan mesin FDM 3D *print*. Dengan tinjauan literatur diatas, di dapat perkiraan sementara. Berdasarkan penelitian yang dikatakan oleh (Riza et al., 2020), suhu cetak filamen PETG berkisar antara 230°C hingga 265°C, serta suhu *bed* di atas 60°C. Menurut (Miazio, 2019) kecepatan cetak yang optimal berkisar antara 30 sampai 60 mm/s. Sedangkan menurut (Darsin et al., 2024), faktor yang mempengaruhi kekuatan impak hasil 3D printing menggunakan bahan TPU+PETG adalah tinggi lapisan sebesar 63,97%, temperatur *nozzle* sebesar 6,19%, kecepatan cetak sebesar 2,07%, dan temperatur *bed* sebesar 4,74%. Berdasarkan literatur yang dikaji, diperoleh indikasi bahwa suhu *nozzle* yang optimal untuk proses pencetakan berada pada rentang 230°C hingga 265°C, dengan suhu *bed* lebih dari 60°C, serta kecepatan pencetakan berkisar antara 30 mm/detik hingga 60 mm/detik. Faktor-faktor yang memengaruhi hasil pencetakan secara berurutan adalah suhu *nozzle*, diikuti oleh kecepatan pencetakan, dan terakhir suhu *bed*.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Langkah pertama adalah merancang model 3D dengan perangkat lunak, kemudian mencetak spesimen untuk diuji. Setelah itu, dilakukan uji dampak untuk mengukur kekuatan material PETG, diikuti analisis data ANOVA dengan menggunakan *control chart* untuk menilai pengaruh variasi parameter optimal terhadap kekuatan uji dampak.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Gedung IsDB Laboratorium Proses Manufaktur Fakultas Teknik, Universitas Jember. Kecamatan Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur. Penelitian ini dilaksanakan pada November 2024 s.d Januari 2025.

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Alat

Laptop dengan *Software Solidworks*, software *prusa slicer*, mesin uji dampak, mesin 3d print, jangka sorong, kapi, tang potong, penggaris, feller gauge, *software* minitab 19.1.1.0, adata usb 3.0.

b. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) berwarna merah dengan berat 1 kg. Adapun filamen yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran 1.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas ini ditetapkan oleh peneliti sebagai acuan dalam melakukan penelitian. Variabel bebas dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Variabel Bebas

Parameter	Setting	
	1	2
<i>Nozzle Temperature</i> (°C)	230	240
<i>Printing Speed</i> (mm/s)	40	50
<i>Bed Temperature</i> (°C)	70	80

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik kekuatan uji impact helm motor. Pemilihan parameter *nozzle temperature* 230°C dan 240°C ; *bed temperature* 70°C, 80°C, menurut penelitian (Riza et al., 2020) suhu cetak filamen PETG berkisar antara 230°C hingga 265°C, serta suhu *bed* di atas 60°C. Sedangkan pemilihan *printing speed* 40mm/s, 50mm/s, menurut (Miazio, 2019) kecepatan cetak yang optimal berkisar antara 30 sampai 60 mm/s.

3.4.2 Variabel Kontrol

Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah: *Infill density* 100% , *nozzle diameter* 0,4 mm, *fan speed* 100%, *infill patern concentric*, filamen diameter 1,75 mm, *layer height* 0,2 mm.

3.4.3 Variabel Terikat

Variabel terikat yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah merupakan uji impact metode *charpy*.

3.4.4 Matriks Penelitian

Dalam penelitian ini, matriks ortogonal array L4 (2^3) dirancang dengan tiga kali replikasi spesimen uji. Dengan total spesimen yang akan diuji dalam penelitian ini berjumlah 12.

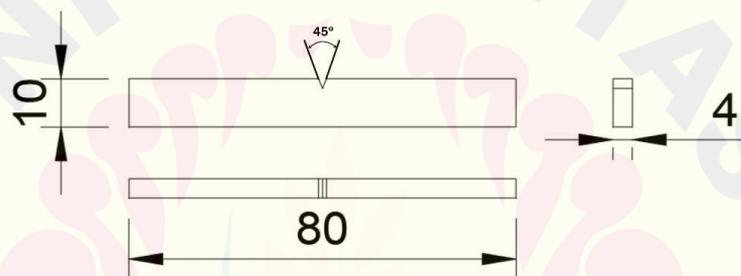
3.5 Metode Pelaksanaan

3.5.1 *Software Prusa Slicer*

Software slicer creality digunakan untuk memasukkan parameter dan menghasilkan file G-code yang digunakan untuk mengoperasikan mesin cetak 3D yang sesuai dengan ketentuan peneliti inginkan.

3.5.2 Pembuatan Model Spesimen

Model spesimen uji dibuat menggunakan aplikasi Autodesk Inventor. Dengan spesimen pengujian impact standar ISO 179-1, dengan ukuran dimensi panjang 80 mm, lebar 10 mm, dan ketebalan 4 mm. Spesimen standar ISO 179-1 dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Spesimen ISO 179-1

3.5.3 Slicing Data dan Pencetakan

Proses *slicing* data dilakukan menggunakan aplikasi prusa slicer untuk mengkonversi file model (STL) menjadi file (*G-code*) yang siap untuk dicetak. Setelah mendapatkan *G-code*, spesimen kemudian dicetak menggunakan filamen PETG sesuai dengan parameter proses yang telah ditentukan.

3.5.4 Pengujian Impact Metode *Charpy*

Pada penelitian ini pengujian impact menggunakan spesimen dengan standar ISO 179-1, dimana takik ditempatkan berlawanan dengan arah pendulum yang akan mengenai spesimen. Gambar dan rumus terdapat pada Lampiran 2.

3.6 Analisis Data

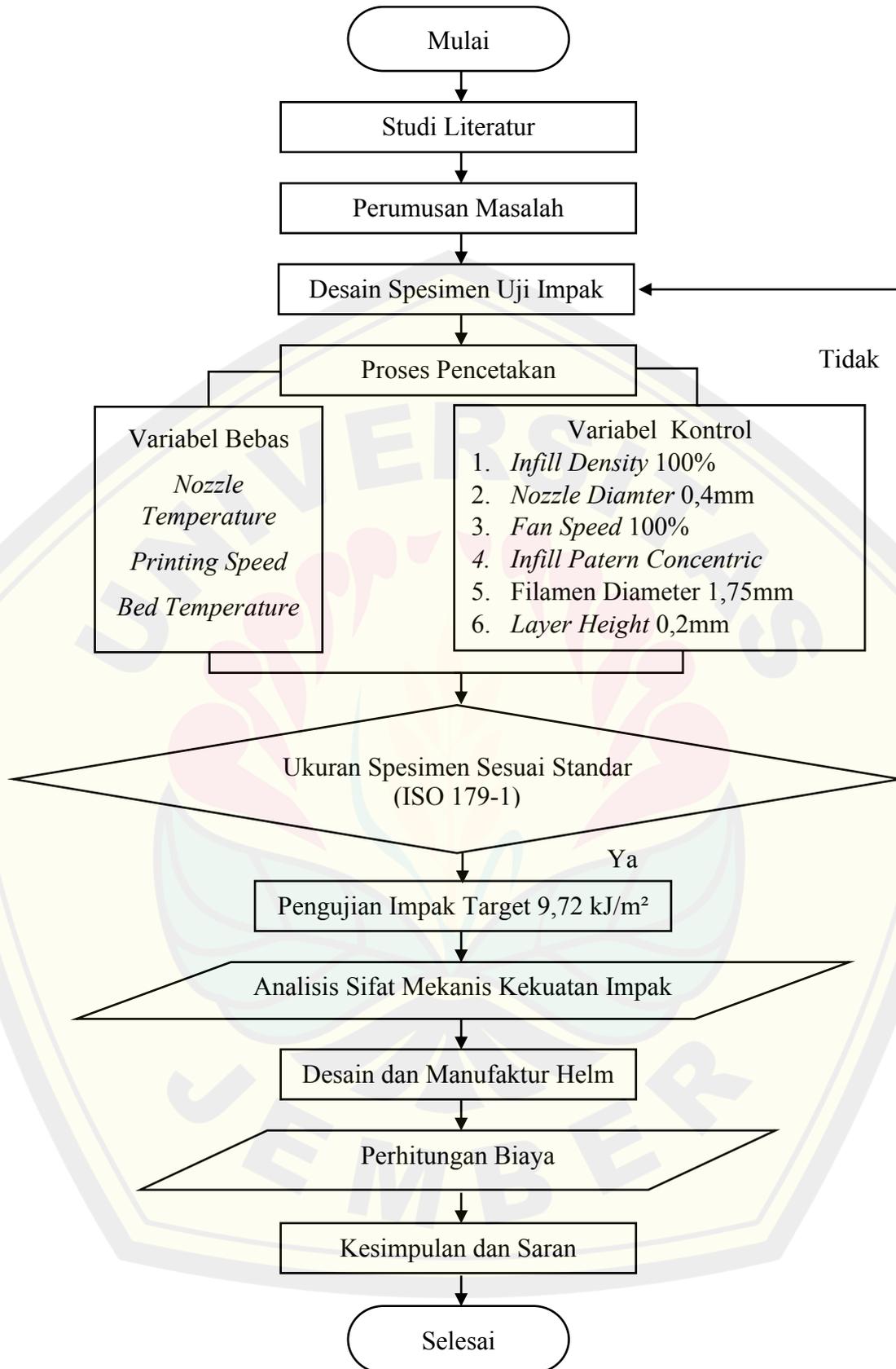
Metode analisis yang digunakan adalah *analysis of variance* (ANOVA) dengan tahapan sebagai berikut : Pengambilan data kekuatan impact dilakukan dengan menentukan nilai rata-rata kekuatan impact tertinggi berdasarkan desain *orthogonal array* L4 (2^3), menentukan S/N *ratio* digunakan untuk menganalisis dan menentukan level faktor yang mempengaruhi hasil eksperimen, ANOVA untuk mengidentifikasi faktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja produk menggunakan *ratio* S/N, uji F digunakan untuk menentukan apakah suatu faktor memiliki pengaruh signifikan terhadap respon, persen kontribusi digunakan untuk mengetahui perbandingan pengaruh faktor dalam penelitian percobaan.

3.7 Perhitungan Biaya

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan biaya meliputi : Perhitungan biaya bahan baku/material, dan alat/konsumsi daya listrik saat proses pencetakan 3D.

3.8 Diagram Alir

Gambar diagram alir digunakan sebagai gambaran langkah yang diambil untuk mendukung proses penelitian. Sehingga penelitian dapat berjalan dengan lebih terstruktur. Diagram alir disajikan pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 Diagram Alir

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Sifat Mekanis

4.1.1 Hasil dan Analisis Kekuatan Impak

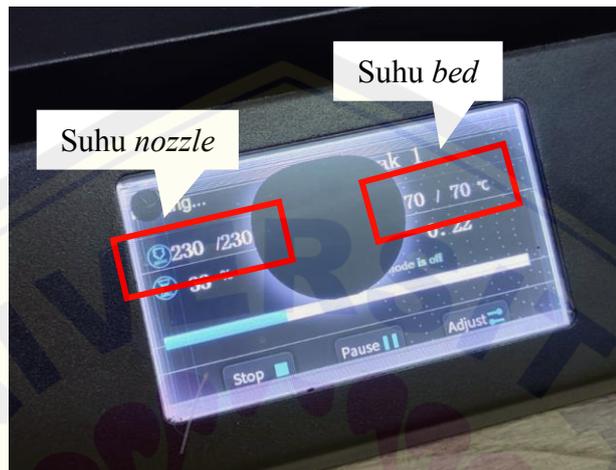
Pada penelitian ini proses pengambilan data dilakukan dengan pengujian impact pada spesimen hasil dari pencetakan FDM 3D *print* filamen PETG. Pengujian impact dilakukan di Lab. PUTP, Politeknik ATMI Surakarta, Jl Mojo No.1, Karangasem, Kecamatan Laweyan, Surakarta, Jawa Tengah. Proses pengujian menggunakan mesin uji impact Zwick/Roell. Metode yang diterapkan adalah uji impact *Charpy* dengan satu titik benturan di bagian belakang takikan. Spesimen menerima benturan pada bagian tengah hingga mengalami patahan. Hal ini disebabkan karena konsentrasi beban yang diberikan pada titik tengah spesimen, seperti ditunjukkan dalam Lampiran 3. Gambar 4.1 merupakan spesimen uji impact ISO 179-1 sebelum dilakukan pengujian impact.



Gambar 4. 1 Spesimen Sebelum Dilakukan Pengujian

Pada Gambar 4.1 menunjukkan spesimen uji impact ISO 179-1 sebelum dilakukan pengujian. Spesimen mempunyai dimensi panjang total 80 mm, lebar 10 mm, tebal 4 mm, dan takikan di bagian tengah sedalam 0.2 mm V notch A. Dengan 4 variasi parameter dalam tiap variasi dilakukan sebanyak 3 kali replikasi, dengan total spesimen dicetak sebanyak 12 spesimen. Parameter yang digunakan dalam

proses pencetakan FDM 3D *print* menggunakan variasi *nozzle temperature* 230°C, 240°C ; *printing speed* 40mm/s, 50mm/s ; *bed temperature* 70°C, 80°C. Dapat dilihat pada Gambar 4.2 merupakan validasi suhu *nozzle* dan *bed temperature* yang digunakan saat pencetakan spesimen 3D *print*.



Gambar 4. 2 Validasi *Nozzle Temperature* dan *Bed Temperature*

Data hasil pengujian impact yang diperoleh dari Laboratorium PUTP, Politeknik ATMI Surakarta, merupakan data mentah yang siap untuk diolah. Pada Gambar 4.3 dapat dilihat spesimen ISO 179-1 yang telah dilakukan proses pengujian impact. Disajikan pada Tabel 4.1 merupakan data hasil pengujian impact metode *charpy* dan pada Lampiran 4 merupakan hasil resmi pengujian impact.



Gambar 4. 3 Spesimen Setelah Pengujian Impact

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Impak

No.	Faktor Kendali			Hasil Kekuatan Impak (kJ/m ²)			Rata-Rata	S/N Ratio
	<i>Nozzle Temperature</i> (°C)	<i>Printing Speed</i> (mm/s)	<i>Bed Temperature</i> (°C)	1	2	3		
1	230	40	70	2,82	2,94	3,34	3,03	9,57
2	230	50	80	2,83	2,96	2,90	2,90	9,23
3	240	40	80	2,64	2,53	2,56	2,58	8,22
4	240	50	70	2,39	2,44	2,41	2,41	7,65
Total Rata-Rata							2,73	

Dapat dilihat pada Tabel 4.1 di atas data hasil nilai rata-rata kekuatan impak tertinggi adalah 3,03 kJ/m² pada kombinasi parameter 1 sedangkan data kekuatan impak terendah didapatkan nilai 2,39 kJ/m² pada kombinasi parameter 4, dan didapat rata-rata total dengan nilai 2,73 kJ/m².

4.1.2 Perhitungan *Ratio* S/N Terhadap Kekuatan Impak

S/N ratio (signal to noise) adalah ukuran yang membandingkan tingkat sinyal (yang dapat dikendalikan) dengan derau (yang tidak dapat dikendalikan). *Ratio* digunakan untuk menilai tingkat kinerja suatu sistem dengan mempertimbangkan tingkat gangguan yang memengaruhinya. Dalam evaluasi, *S/N ratio* mengukur stabilitas dan konsistensi karakteristik output yang dihasilkan. Berdasarkan metode ini, kinerja dapat ditentukan dengan beberapa pendekatan, yaitu semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik, atau berfokus pada nilai target tertentu.

Dalam penelitian ini, metode *S/N ratio* dengan karakteristik *larger is better* dipilih. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa semakin tinggi nilai kekuatan impak yang dihasilkan, semakin baik kualitas produk yang dihasilkan. Sebagai ilustrasi, perhitungan *S/N ratio* untuk kekuatan impak pada kombinasi parameter pertama dapat dijelaskan sebagai berikut.

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

$$\frac{S}{N} \text{ Ratio} = -10 \log \left[\frac{1}{3} \left(\frac{1}{(2,82)^2} + \frac{1}{(2,94)^2} + \frac{1}{(3,34)^2} \right) \right]$$

$$S/N \text{ Ratio} = 9,57$$

Perhitungan rasio S/N di atas juga dapat diterapkan pada parameter kedua, ketiga, dan keempat menggunakan metode yang serupa.

4.1.3 Kombinasi Faktor Optimal Kekuatan Impak

Dalam perancangan eksperimen menggunakan metode Taguchi, tujuan utamanya adalah menentukan kombinasi faktor dan level yang menghasilkan kinerja paling optimal. Optimalisasi ini dilakukan dengan menghitung nilai S/N *ratio* untuk setiap level faktor, termasuk level 1 pada parameter *nozzle temperature* sebagai berikut.

$$\bar{A} = \frac{9,57 + 9,23}{2}$$

$$\bar{A} = \frac{18,8}{2}$$

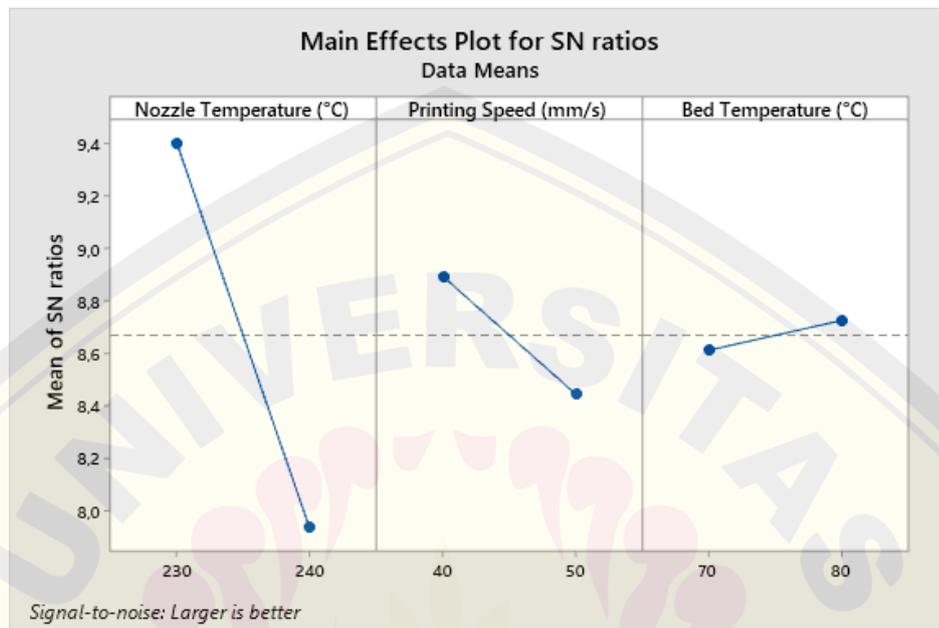
$$\bar{A} = 9,4$$

Hasil perhitungan *ratio* S/N terhadap nilai kekuatan impak dari masing-masing faktor dengan delta merupakan selisih hasil S/N *ratio* tertinggi dan terendah dengan delta tertinggi 1,46 pada parameter *nozzle temperature* yang menempati *rank* 1 dan delta terendah 0,11 pada *bed temperature* dengan menempati *rank* 3, disajikan pada Tabel 4. 2 sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan S/N *Ratio*

Level	<i>Nozzle Temperature</i>	<i>Printing Speed</i>	<i>Bed Temperature</i>
1	9,40	8,89	8,61
2	7,93	8,44	8,72
Delta	1,46	0,45	0,11
Rank	1	2	3

Rata-rata nilai *S/N ratio* untuk setiap level dari berbagai parameter yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *nozzle temperature*, *printing speed*, dan *bed temperature*, disajikan pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 Rata-rata *S/N Ratio* Menggunakan Minitab

Pada Gambar 4.4 memperlihatkan level terbaik untuk setiap variasi faktor berdasarkan nilai *S/N ratio*. Level optimal tersebut ditunjukkan pada grafik *S/N ratio* di atas. Kombinasi level optimal untuk masing-masing faktor dalam proses pencetakan 3D dapat dilihat pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4. 3 Faktor Paling Optimal

Faktor Kendali	Level	Nilai
Nozzle Temperature	1	230 °C
Printing Speed	1	40 mm/s
Bed Temperature	2	80 °C

4.1.4 Perhitungan ANOVA Terhadap Kekuatan Impak

ANOVA (*Analysis of Variance*) adalah metode yang digunakan untuk menghitung dan mengestimasi kontribusi masing-masing faktor terhadap variabilitas respons secara kuantitatif. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis varians dua arah, yang melibatkan dua atau lebih faktor dengan dua atau lebih level. Tabel ANOVA dua arah mencakup informasi seperti derajat kebebasan, jumlah kuadrat, rata-rata jumlah kuadrat, dan rasio F (*F-ratio*). Penting untuk dicatat bahwa perhitungan ANOVA ini didasarkan pada data rata-rata. Pada penelitian ini, ANOVA dua arah diterapkan untuk menganalisis hasil pengujian impact.

a. Derajat kebebasan total (*degree of freedom*)

$$\text{DoF total} = (n \times r) - 1$$

$$\text{DoF total} = (4 \times 3) - 1$$

$$\text{DoF total} = 12 - 1 = 11$$

b. Derajat kebebasan *error*

$$\text{DoF}_E \text{ total} = (n \times r) - n$$

$$\text{DoF}_E \text{ total} = (4 \times 3) - 4$$

$$\text{DoF}_E \text{ total} = 12 - 4 = 8$$

c. Derajat kebebasan tiap *factor* (faktor A: *nozzle temperature*)

$$\text{DoF}_A \text{ total} = l - 1$$

$$\text{DoF}_A \text{ total} = 2 - 1$$

$$\text{DoF}_A \text{ total} = 1$$

d. Jumlah kuadrat total (*sum of square*)

$$SS_T = \sum y^2$$

$$SS_T = 2,82^2 + 2,94^2 + 3,34^2 + 2,83^2 + 2,96^2 + 2,90^2 + 2,64^2 + 2,53^2 + 2,56^2 + 2,39^2 + 2,44^2 + 2,41^2$$

$$SS_T = 90,33$$

e. Jumlah kuadrat *means*

\bar{y}^2 = rata-rata total hasil kekuatan impact

$$SS_M = n \times \bar{y}^2$$

$$SS_M = 12 \times (2,73)^2$$

$$SS_M = 12 \times 7,45$$

$$SS_M = 89,43$$

- f. Jumlah kuadrat tiap faktor (faktor A: *nozzle temperature*)

Total A1 = Total respon level 1 dari faktor A

Total A2 = Total respon level 2 dari faktor A

$n_1 = n_2$ = Jumlah pengulangan per level, masing-masing 6 kali pengulangan

$$SS_A = \left[\frac{\text{Total A1}}{n_1} \right]^2 + \left[\frac{\text{Total A2}}{n_2} \right]^2 - \left[\frac{\text{Total A}}{n_1+n_2} \right]^2$$

$$SS_A = \left[\frac{17,79}{6} \right]^2 + \left[\frac{14,97}{6} \right]^2 - \left[\frac{32,76}{12} \right]^2$$

$$SS_A = 52,75 + 37,35 - 89,43$$

$$SS_A = 0,67$$

Dengan cara yang sama, diperoleh hasil perhitungan SS_B sebesar 0,06 dan SS_C sebesar 0,00.

- g. Rata-rata jumlah kuadrat *error*

$$SS_E = SS_T - (SS_M + SS_A + SS_B + SS_C)$$

$$SS_E = 90,33 - (89,43 + 0,67 + 0,06 + 0,00)$$

$$SS_E = 0,17$$

- h. Rata-rata kuadrat tiap *factor* (faktor A: *nozzle temperature*)

$$MS_A = \frac{SS_A}{DoF_A}$$

$$MS_A = \frac{0,67}{1}$$

$$MS_A = 0,67$$

- i. Rata-rata kuadrat *error*

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

$$MS_E = \frac{0,17}{8}$$

$$MS_E = 0,02$$

- j. Rasio F (faktor A: *nozzle temperature*)

$$F_{\text{rasio}} = \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$F_{\text{rasio}} = \frac{0,67}{0,02}$$

$$F_{\text{rasio}} = 33,5$$

Perhitungan ANOVA dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Untuk menentukan nilai F tabel, dapat mengacu pada Tabel Distribusi F yang tersedia pada Lampiran 5. Pada tingkat kepercayaan 95%, nilai F tabel tersebut adalah 4,07. Analisis menunjukkan bahwa nilai F untuk parameter *nozzle temperature* lebih besar dibandingkan nilai F tabel dengan tingkat kesalahan 5%, sehingga nilai P menunjukkan hasil yang signifikan. Sebaliknya, untuk parameter *printing speed* dan *bed temperature*, nilai F lebih kecil daripada F tabel, sehingga dinyatakan tidak signifikan. Dengan taraf signifikansi $\alpha = 0,05$, hanya satu parameter yang dinyatakan signifikan. Selain itu, analisis varians dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab, dengan hasil yang dapat dilihat pada Lampiran 6. Hasil perhitungan ANOVA yang secara menyeluruh menggambarkan pengaruh faktor kendali terhadap kekuatan impact disajikan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Pengaruh Faktor Kendali Terhadap Kekuatan Impact

Control Factor	DF	SS	MS	F	P
<i>Nozzle Temperature</i>	1	0,66	0,66	32,34	Signifikan
<i>Printing Speed</i>	1	0,06	0,06	3,28	Tidak signifikan
<i>Bed Temperature</i>	1	0,00	0,00	0,03	Tidak signifikan
<i>Error</i>	8	0,16	0,02		
Total	11				

4.1.5 Uji F

Uji F adalah metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Teknik ini dilakukan dengan membandingkan nilai F hasil perhitungan (F hitung) dengan nilai F tabel. Dalam penelitian ini, nilai F tabel diambil pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, yang setara dengan tingkat kepercayaan sebesar 95%. Selain itu, analisis varian juga

dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab, menghasilkan data yang disajikan pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Data Analisis Menggunakan Minitab

<i>Source</i>	DF	Seq SS	<i>Contribution</i>	Adj SS	Adj MS	F- Value	P- Value
<i>Nozzle Temperature</i>	1	0,66	74,03%	0,66	0,66	32,24	0,00
<i>Printing Speed</i>	1	0,06	7,54%	0,06	0,06	3,28	0,10
<i>Bed Temperature</i>	1	0,00	0,06%	0,00	0,00	0,03	0,87
<i>Error</i>	8	0,16	18,37%	0,16	0,02		
Total	11	0,73	100%				

4.1.6 Persen Kontribusi Terhadap Kekuatan Impak

Persen kontribusi digunakan untuk menggambarkan seberapa besar setiap faktor memberikan kontribusi terhadap total variasi. Jika nilai persen kontribusi error $\leq 15\%$, ini menunjukkan bahwa tidak ada faktor yang terabaikan. Namun, jika persentase kontribusi error $\geq 50\%$, hasil tersebut dianggap tidak dapat dipercaya. Sementara itu, jika nilai error berada di kisaran $\geq 15\%$, hal ini mengindikasikan adanya variabel penting yang seharusnya dimasukkan dalam penelitian tetapi terabaikan (Soejanto, 2009). Dengan menganalisis persentase kontribusi, dapat diketahui sejauh mana pengaruh masing-masing faktor terhadap respons yang diamati. Sebagai contoh, berikut ini merupakan perhitungan persentase kontribusi untuk parameter *nozzle temperature*.

$$\rho_A = \frac{SS_A}{SS_T} \times 100\% \quad (1)$$

$$\rho_A = \frac{0,66}{90,33} \times 100\%$$

$$\rho_A = 74,03\%$$

Dengan metode yang serupa, diperoleh hasil kontribusi ρ_B , ρ_C , dan ρ_D masing-masing sebesar 7,54%, 0,06%, dan 18,37%. Hasil analisis kontribusi persentase terhadap nilai kekuatan impak berdasarkan faktor *printing speed* dan *bed temperature*, yang menggunakan pendekatan serupa, dapat dilihat pada Tabel 4.5 diatas kolom ke 4.

4.1.7 Prediksi Respon terhadap Nilai Kekuatan Impak

Pada Tabel 4.3 sebelumnya, terdapat nilai yang menunjukkan kombinasi faktor yang dapat menghasilkan kekuatan impak optimal. Dari tabel tersebut, dapat diketahui bahwa kombinasi faktor yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap nilai uji impak tertinggi adalah sebagai berikut.

- Nozzle temperature* (°C) pada level 1
- Printing speed* (mm/s) pada level 1
- Bed temperature* (°C) pada level 2

Selanjutnya adalah menghitung rata-rata prediksi (μ) untuk menentukan nilai kekuatan impak optimal berdasarkan kombinasi parameter optimal yang telah diperoleh. Nilai rata-rata prediksi ini dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\mu = \gamma_m + \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma_m)$$

$$\mu = 2,73 + (2,97 - 2,73) + (2,80 - 2,73) + (2,72 - 2,73)$$

$$\mu = 2,73 + (0,24) + (0,07) + (-0,01)$$

$$\mu = 3,03 \text{ kJ/ m}^2$$

Hasil perhitungan rata-rata prediksi dengan parameter optimal diperoleh sebesar 3,03 kJ/m². Selanjutnya, interval kepercayaan untuk rata-rata prediksi nilai kekuatan impak dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$N_{\text{eff}} = \frac{\text{Jumlah total eksperimen}}{1 + \text{derajat kebebasan}}$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{12}{1 + (1+1+1)}$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{12}{4}$$

$$N_{\text{eff}} = 3$$

Perhitungan interval kepercayaan (*confidence interval*) untuk rata-rata prediksi nilai kekuatan impak optimal dapat dilakukan sebagai berikut:

Diketahui: $F_{0,05;3;8} = 4,07$ dan $MSe = 0,02$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F(0,05;3;8)MSe}{N_{\text{eff}}}}$$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{4,07 \times 0,02}{3}}$$

$$CI = 0,16$$

Dengan demikian, *confidence interval* untuk rata-rata kekuatan impak pada tingkat kepercayaan 95% dapat dihitung sebagai berikut:

$$\mu_{\text{prediksi}} - CI \leq \mu_{\text{prediksi}} \leq \mu_{\text{prediksi}} + CI$$

$$3,03 - 0,16 \leq 3,03 \leq 3,03 + 0,16$$

$$2,87 \leq 3,03 \leq 3,19$$

4.2 Analisis Pengaruh Parameter

4.2.1 Pengaruh *Nozzle Temperature*

Suhu *nozzle* dalam pencetakan 3D memengaruhi hasil kekuatan cetakan uji impak. Jika suhu terlalu rendah, adhesi antar lapisan menjadi kurang kuat sehingga cetakan mudah retak atau pecah. Sebaliknya, jika suhu terlalu tinggi, filamen dapat menjadi terlalu cair, yang menyebabkan material berlebih keluar dari *nozzle* dan menurunkan kualitas cetakan. Menurut penelitian (Riza et al., 2020) suhu cetak filamen PETG berkisar antara 230°C hingga 265°C untuk menghasilkan produk yang optimal. Dalam penelitian ini, suhu *nozzle* 230°C menghasilkan nilai kekuatan impak tertinggi sebesar 3,34 kJ/m². Parameter suhu *nozzle* menunjukkan pengaruh yang signifikan pada tingkat kepercayaan α 0,05, dengan kontribusi sebesar 74,03% terhadap total persentase kontribusi parameter.

4.2.2 Pengaruh *Printing Speed*

Printing speed memengaruhi kualitas, kekuatan, dan efisiensi hasil kekuatan impak cetakan 3D. Kecepatan tinggi mempercepat proses tetapi dapat menurunkan presisi, adhesi lapisan, dan meningkatkan risiko cacat. Sebaliknya, kecepatan rendah menghasilkan kualitas dan kekuatan cetakan yang lebih baik, namun memakan waktu lebih lama. Menurut (Miazio, 2019) kecepatan cetak yang optimal berkisar antara 30 sampai 60 mm/s. Parameter *printing speed* memberikan pengaruh yang tidak signifikan pada tingkat kepercayaan α 0,05 dengan kontribusi sebesar

7,54%. Dalam penelitian ini, kekuatan impact tertinggi dicapai pada kecepatan cetak 40 mm/s dengan kombinasi suhu *nozzle* 230°C.

4.2.3 Pengaruh *Bed Temperature*

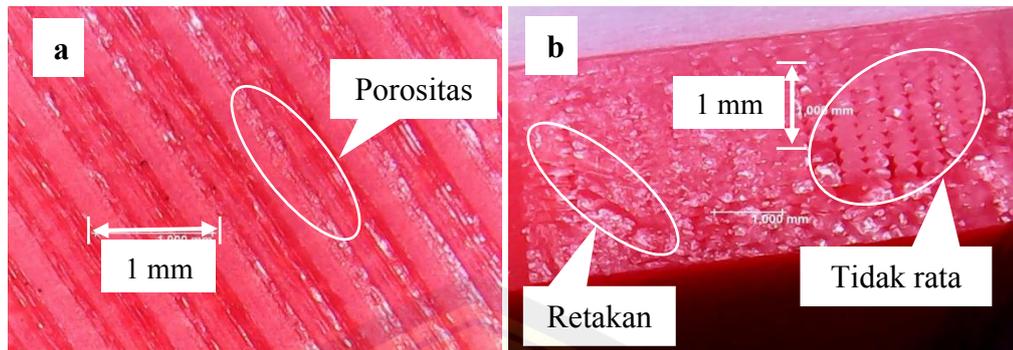
Suhu bed juga dapat mempengaruhi hasil kekuatan impact cetakan 3D. Karena berperan dalam memastikan lapisan pertama menempel dengan kuat dan mencegah *warping* yang dapat menyebabkan bagian tepi cetakan melengkung. Suhu yang tepat membantu filamen melekat dengan baik, mengurangi kemungkinan terjadinya delaminasi atau cacat lainnya. Menurut (Riza et al., 2020) suhu *bed* di atas 60°C merupakan pilihan optimal untuk filamen PETG. Menurut (Darsin et al., 2024), suhu *bed* 75°C merupakan suhu ideal untuk memastikan cetakan menempel dengan baik selama proses pencetakan, sekaligus mencegah terjadinya deformasi yang tidak diinginkan. Parameter suhu *bed* menunjukkan pengaruh yang tidak signifikan pada tingkat kepercayaan α 0,05, dengan kontribusi sebesar 0,06% dari total kontribusi parameter. Suhu *bed* optimal yang ditemukan dalam penelitian ini adalah 80°C.

4.3 Foto Mikro

Pengambilan foto makro pada spesimen bertujuan untuk mengidentifikasi, dan menganalisis morfologi pada setiap lapisan layer spesimen. Sampel diambil sebanyak 2 kali yaitu pada spesimen yang menghasilkan kekuatan impact tertinggi dan terendah dengan menggunakan mikroskop digital skala 1mm. Hasil foto mikro spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 berikut.

a. Parameter 1 replikasi ke 3

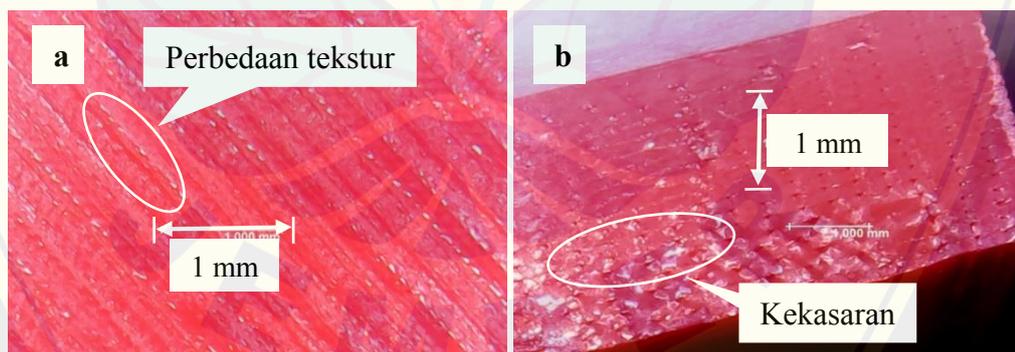
Pada Gambar 4.5 merupakan hasil uji mikro spesimen uji impact parameter 1 replikasi 3. Pada gambar (a) dengan perbesaran 35 kali, permukaan material terlihat rapat tetapi terdapat celah atau porositas antar lapisan yang bisa menjadi titik lemah pada material. Sementara itu, pada gambar (b) dengan perbesaran 20 kali, permukaan tampak tidak rata dan menunjukkan adanya retakan mikro atau kerusakan mekanis. Terlihat juga fragmen kecil atau area kasar yang mengindikasikan kemungkinan kegagalan material selama pengujian impact.



Gambar 4. 5 Spesimen 1 (a) Permukaan Atas dan (b) Patahan Uji

b. Parameter 4 replikasi ke 1

Pada Gambar 4.6 merupakan hasil uji mikro spesimen uji impact parameter 4 replikasi 1. Pada gambar (a) dengan perbesaran 35 kali, terlihat bahwa permukaan spesimen cukup merata, meskipun terdapat sedikit perbedaan tekstur. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh ketidakkonsistenan dalam laju ekstrusi filamen atau proses pendinginan yang tidak seragam. Sementara itu, pada gambar (b) dengan perbesaran 23 kali, tampak adanya kekasaran pada area antar lapisan. Kekasaran ini berpotensi memengaruhi sifat mekanik, seperti kekuatan impact. Selain itu, terdapat indikasi celah kecil atau area dengan ikatan antar lapisan yang kurang optimal, yang biasanya disebabkan oleh pengaturan parameter cetak yang belum sepenuhnya sesuai.



Gambar 4. 6 Spesimen 4 (a) Permukaan Atas dan (b) Patahan Uji

4.4 Analisis Kelayakan Helm

Helm merupakan salah satu perlengkapan wajib bagi pengendara sepeda motor yang berfungsi melindungi kepala dari benturan saat terjadi kecelakaan sesuai

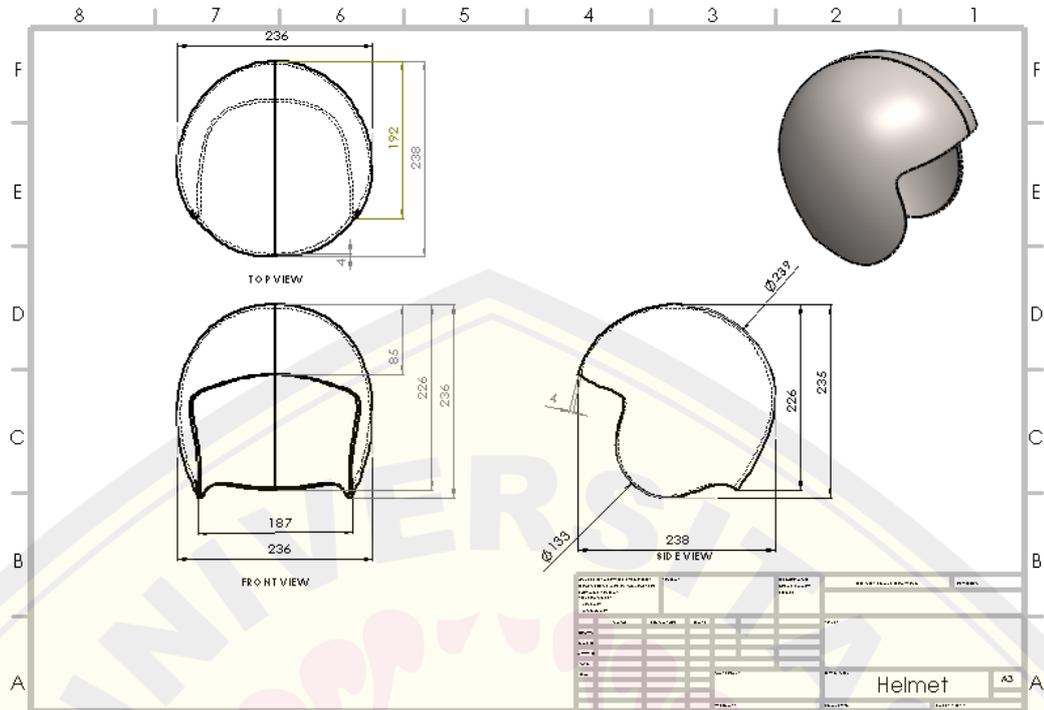
standar SNI, yang pada umumnya terbuat dari polimer *polypropylene*. Helm juga berperan sebagai pelindung dari partikel seperti debu, pasir, dan benda kecil lainnya yang dapat membahayakan pengendara saat di jalan. Pada penelitian ini, bertujuan untuk menggantikan material helm yang sebelumnya polimer *polypropylene* menggunakan bahan PETG. Menurut (Darsin et al., 2024), polipropilena memiliki kekuatan dampak sebesar 7,00 kJ/m². Penelitian yang dilakukan oleh (Mulyo & Yudiono, 2019), mengungkapkan bahwa pengujian dampak pada sampel helm berstandar SNI menunjukkan kekuatan dampaknya hanya mencapai 9,72 kJ/m².

Pada penelitian ini nilai kekuatan uji dampak terkecil adalah 2,39 kJ/m² pada variasi 4 replikasi 1, dan nilai kekuatan dampak terbesar jatuh pada variasi 1 replikasi 3 sebesar 3,34 kJ/m². Pada penelitian ini hasil kekuatan spesimen uji dampak lebih kecil dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Prihandaru, 2024). Salah satu faktor penyebab yaitu adanya perbedaan variasi parameter yang digunakan dalam proses pencetakan spesimen 3D *print* filamen PETG. Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa produk helm dari pencetakan FDM 3D *print* berbahan PETG tidak layak dijadikan sebagai material pengganti produk helm SNI dengan bahan polimer *polypropylene*.

4.5 Desain dan Manufaktur Helm

4.5.1 Desain Cangkang Helm

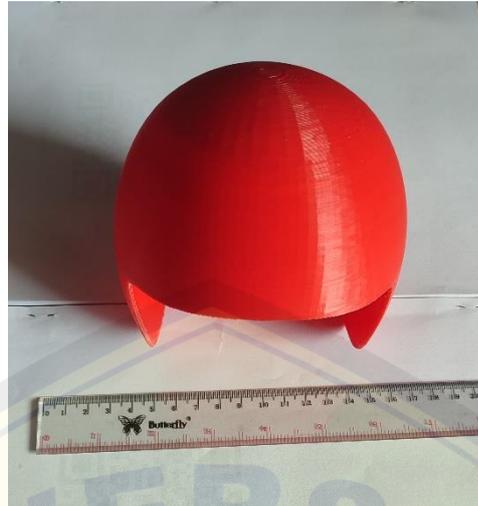
Desain cangkang helm dibuat menggunakan *software Solidworks*. Dimensi cangkang helm mengacu pada ukuran standar yang telah ada di pasaran dengan ketebalan 4 mm. Detail ukuran dimensi cangkang helm disajikan dalam gambar kerja pada Gambar 4.7 dan Lampiran 7.



Gambar 4. 7 Gambar Kerja Produk Cangkang Helm

4.5.2 Proses Manufaktur Cangkang Helm

Proses manufaktur cangkang helm dibuat menggunakan teknik FDM 3D *printing*. Proses diawali dengan membuat desain menggunakan *software Solidworks*, kemudian dilakukan pengaturan parameter dan pembuatan *G-code* menggunakan perangkat lunak *Prusa slicer*. Pada penelitian ini, *setting* parameter yang digunakan adalah nozzle temperature 230°C, printing speed 40 mm/s, dan bed temperature 80°C. Setelah parameter dikonversi ke dalam bentuk *G-code*, file tersebut dipindahkan ke *microSD* untuk proses pencetakan menggunakan mesin 3D *printer*. Pada penelitian ini, pencetakan dilakukan menggunakan 3D *printer Creality CR-10S Pro V2*, dengan skala perbandingan 1:2 dan membutuhkan waktu pencetakan 34 jam. Proses dan hasil pencetakan 3D disajikan pada Gambar 4.8 dan Lampiran 8.



Gambar 4. 8 *Rescale* Cangkang Helm Hasil FDM 3D *Print* Filamen PETG

4.6 Perhitungan Biaya

Dalam produksi manufaktur, perhitungan biaya memiliki peranan penting untuk memastikan setiap tahap proses cetak 3D dikelola dengan efisien. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi sekaligus memperoleh keuntungan yang maksimal. Penelitian ini mencakup perhitungan biaya berdasarkan sejumlah data harga yang diperoleh dari pasaran, dengan rincian sebagai berikut.

Diketahui :

- Harga filamen per Kg : Rp. 200.000 (Harga filamen di Shopee)
- Berat filamen dibutuhkan : 253 gram = 0,253 Kg
- Daya mesin 3D *print* : 350 watt = 0,35 kW
- Waktu pencetakan : 34 jam
- Tarif listrik Rp/kWh : Rp.1,444,70 (Data menurut PT PLN)

1. Biaya bahan baku atau material

Total biaya bahan baku = harga filamen per kg × berat filamen yang dibutuhkan

$$= \text{Rp. } 200.000 \times 0,253 \text{ Kg} = \text{Rp. } 50.600$$

2. Konsumsi Daya Listrik

Total biaya listrik = daya kW × waktu operasi per jam × tarif listrik Rp/kWh

$$\begin{aligned} &= 0,35 \text{ kW} \times 34 \text{ jam} \times 1.444,70/\text{kWh} \\ &= \text{Rp.17.191} \end{aligned}$$

Total biaya proses manufaktur menggunakan teknologi FDM 3D *printing* dengan filamen PETG untuk pembuatan produk cangkang helm adalah sebesar Rp67.791. Jumlah tersebut mencakup pengeluaran untuk bahan baku dan konsumsi listrik dengan skala perbandingan produk 1:2 diperkecil dari produk yang ada di pasaran. Tetapi belum termasuk biaya lain, seperti penyusutan alat, tenaga kerja, dan proses *finishing*. Dibandingkan dengan teknik *injection molding*, metode FDM 3D *printing* cenderung lebih mahal. Hal ini karena biaya yang dihitung belum mencakup elemen tambahan seperti pengecatan, pemasangan busa, kaca, tali, dan lain sebagainya. Menurut (Mazzanti et al., 2019), keunggulan teknologi pencetakan 3D memungkinkan pembuatan objek dengan bentuk rumit atau dengan tingkat ketebalan yang tinggi biasanya sulit dicapai melalui metode manufaktur polimer konvensional. Kustomisasi yang ditawarkan juga dapat dimanfaatkan secara optimal di bidang material.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, penelitian mengenai studi kelayakan teknik FDM 3D *printing* menggunakan filamen PETG untuk produk helm menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter pencetakan 3D, seperti suhu *nozzle*, kecepatan pencetakan, dan suhu bed, memengaruhi kekuatan impak filamen PETG. Nilai kekuatan impak tertinggi, yaitu 3,34 kJ/m², diperoleh pada suhu *nozzle* 230°C, kecepatan pencetakan 40 mm/s, dan suhu bed 80°C.
2. Berdasarkan analisis ANOVA, diketahui bahwa hanya suhu *nozzle* yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan impak pada tingkat kepercayaan 95%, dengan kontribusi sebesar 74,03%. Sementara itu, kecepatan cetak dan suhu bed tidak menunjukkan pengaruh signifikan, masing-masing dengan kontribusi sebesar 7,54% dan 0,06%.
3. Kekuatan impak cangkang helm berbahan PETG lebih rendah dibandingkan helm berbahan *polypropylene* yang memenuhi standar SNI. Helm berbahan PETG dengan teknik FDM 3D *print* belum layak digunakan sebagai pengganti helm sesuai standar, dari segi biaya maupun kekuatan impaknya.

5.2 Kesimpulan

Saran yang dapat diberikan penulis setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya menggunakan teknik FDM 3D *printing* menggunakan filamen PETG sebagai material pengganti helm sesuai standar SNI.
2. Penggunaan material alternatif atau pengembangan komposit dengan sifat mekanik lebih unggul dapat menjadi solusi untuk memenuhi standar helm.

DAFTAR PUSTAKA

- Andriyansyah, D., Sriyanto, & Jamaldi, A. (2021). Perancangan Dan Pembuatan Mesin 3D Printer Tipe Cantilever. *Abdi Masya*, 1(2), 108–114. <https://doi.org/10.52561/abma.v1i2.139>
- Balint, T., Živčák, J., Hudák, R., Tóth, T., Kohan, M., & Lancoš, S. (2021). Destructive and non-destructive testing of samples from PLA and PETG materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1199(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012045>
- Darsin, M., Yoga Yulio, A., Syuhri, A., Edoward Ramadhan, M., & Made Ivan WCS, I. (2024). Characterization of FDM 3D Printed Parts Using TPU+PETG Filaments For Shin Guard Products. *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, 22(1). <http://ejurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Fadllu, A., Mukhammad, H., & Setyoko, D. B. (2014). Studi Kelayakan Mekanik Komposit Serat Rami Acak-Polyester Sebagai Bahan Helm Standar SNI. *TRAKSI*, 14(2), 1–11.
- Fahmi, A., Rusianto, T., & Saputra, H. (2022). Perancangan Helm Proyek Dengan Metode Injection Molding Plastik Menggunakan CAD. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*, 25–34.
- Hidayat, R. F., Nugroho, W., & Budiyanoro, C. (2018). Analisis Pengaruh Parameter Proses 3D-Printing Material PETG Terhadap Respon Akurasi Dimensi dan Kekuatan Tarik Menggunakan Metode Taguchi. *JMPM: Jurnal Material Dan Proses Manufaktur*, XXX, No.XXX, 1–12. <http://journal.umy.ac.id/index.php/jmpm>
- Hsueh, M. H., Lai, C. J., Wang, S. H., Zeng, Y. S., Hsieh, C. H., Pan, C. Y., & Huang, W. C. (2021). Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/polym13111758>
- Kumar, D., Siregar, A., Ramdan, D., Kunci, K., Alat Uji Impak, P., & Charpy, M. (2017). Perancangan Alat Uji Impak Charpy Sederhana Untuk Material

- Logam Baja St 30 Design Of Simple Charpy Impact Test For Steel Meterial Steel Materials. *JMEMME*, 1(1), 2017.
<http://ojs.uma.ac.id/index.php/jmemme>
- Mayleni, D., Rollastin, B., Mesin, T., & Manufaktur Negeri Bangka Belitung, P. (2021). Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan Analisis Kekuatan Impak Pada Material Komposit Berpenguat Limbah Filter Rokok Sebagai Bahan Dasar Pembuatan Cangkang Helm. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan*, 55–61.
- Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F. (2019a). FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. In *Polymers* (Vol. 11, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym11071094>
- Miazio, L. (2019). Impact of Print Speed on Strength of Samples Printed in FDM Technology. *Agricultural Engineering*, 23(2), 33–38.
<https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0014>
- Mulyo, B. T., & Yudiono, H. (2019). Toughness analysis of pineapple leaves fiber composite as alternative material for SNI helmet. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(4), 5961–5972.
<https://doi.org/10.15282/jmes.13.4.2019.16.0472>
- Oropallo, W., & Piegl, L. A. (2016). Ten Challenges in 3D Printing. *Engineering with Computers*, 135–148. DOI 10.1007/s00366-015-0407-0
- Prihandaru, H. (2024). *Pengaruh Variasi Parameter 3D Printer Terhadap Kekuatan Impak Menggunakan Filamen PETG*. Universitas Jember.
- Riza, E. I., Budiyanoro, C., Nugroho, A. W., Iqbal Riza, E., Budiyanoro, C., & Widyo Nugroho, A. (2020). Peningkatan Kekuatan Lentur Produk 3D Printing Material PETG Dengan Optimasi Parameter Proses Menggunakan Metode Taguchi. *Media Mesin : Majalah Teknik Mesin*, 2, 66–75.
- Simanjuntak, R. K. (2017). Uji Eksperimental Kekuatan Helmet Sepeda Motor SNI Akibat Dampak Benda Jatuh Bebas. *Jurnal Inotera*, 1–4.
- Soejanto, I. (2009). *Desain Eksperimen Dengan Metode Taguchi* (Edisi Pertama, Vol. 1). Graha Ilmu.

- Solomon, I. J., Sevel, P., & Gunasekaran, J. (2020). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 509–514. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>
- Tunçel, O. (2024). Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method. *Polymers*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/polym16040459>
- Vemanaboina, H., Edison, G., & Akella, S. (2018). Distortion Control in Multi Pass Dissimilar GTAW Process Using Taguchi ANOVA Analysis. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3), 1140. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.12607>
- Zakaria, S., Stighfarrinata, R., & Ma'rifatul Maghfiroh, A. (2022). Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Filament PETG Menggunakan Metode Taguchi. *JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri)*, 3(4), 538–545.

LAMPIRAN

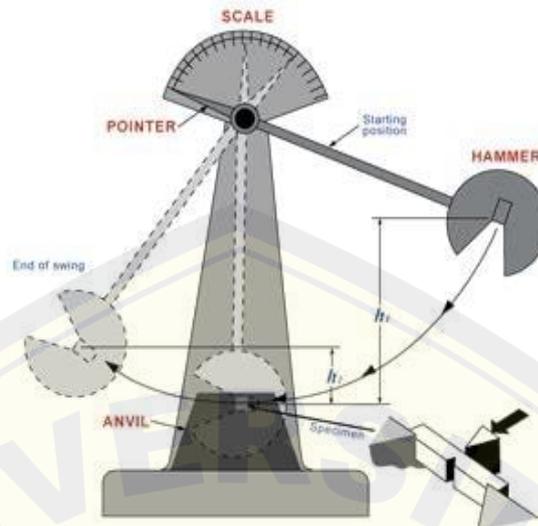


Lampiran 1. Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*)



Gambar A.1 Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) Solid Red

Lampiran 2. Skema Uji Impak Charpy dan Rumus Uji Impak



Gambar B.1 Skema Alat Uji Impak Charpy

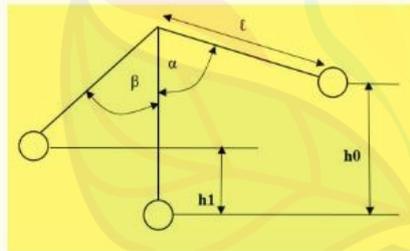
Mencari nilai kekuatan Impak

atp | PUSAT UNGGULAN TEKNOLOGI PLASTIK



Energi yang diserap
 = $E_p - E_m$
 = $m \cdot g (h_1 - h_2)$
 = $m \cdot g (\lambda (1 - \cos \alpha) - \lambda (\cos \beta - \cos \alpha))$
 = $m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha)$

- Energi yang diserap (Joule)
- E_p = Energi Potensial
 - E_m = Energi Mekanik
 - m = massa pendulum (kg)
 - g = gravitasi (m/s^2)
 - h_1 = ketinggian mula-mula pendulum dengan spesimen (m)
 - h_2 = ketinggian akhir pendulum dengan spesimen (m)
 - λ = jarak lengan pengayun (m)
 - α = sudut posisi awal pendulum
 - β = sudut posisi akhir pendulum



Gambar B.2 Rumus Mencari Nilai Impak

Mencari nilai kekuatan Impak

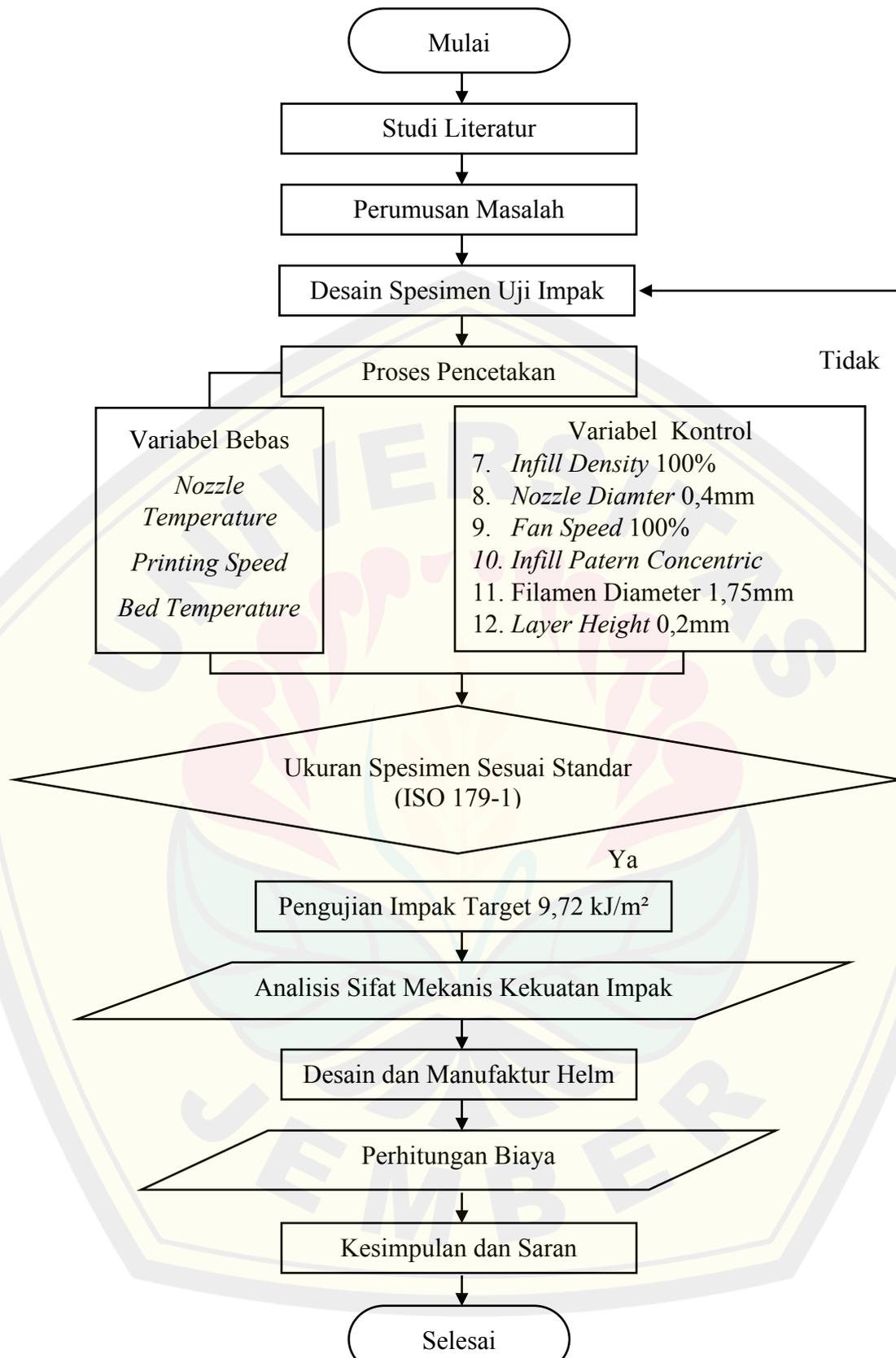
atp | PUSAT UNGGULAN TEKNOLOGI PLASTIK



Impact Strength

$$K = \frac{W}{A}$$

- K = kekuatan impact ($Kg\ m/mm^2$)
- w = usaha yang dilakukan untuk mematahkan benda uji ($Kg\ m$)
- A = luas penampang dibawah takikan (mm^2)



Gambar C.1 Diagram Alir

Lampiran 3. Dokumentasi Pengujian Impak

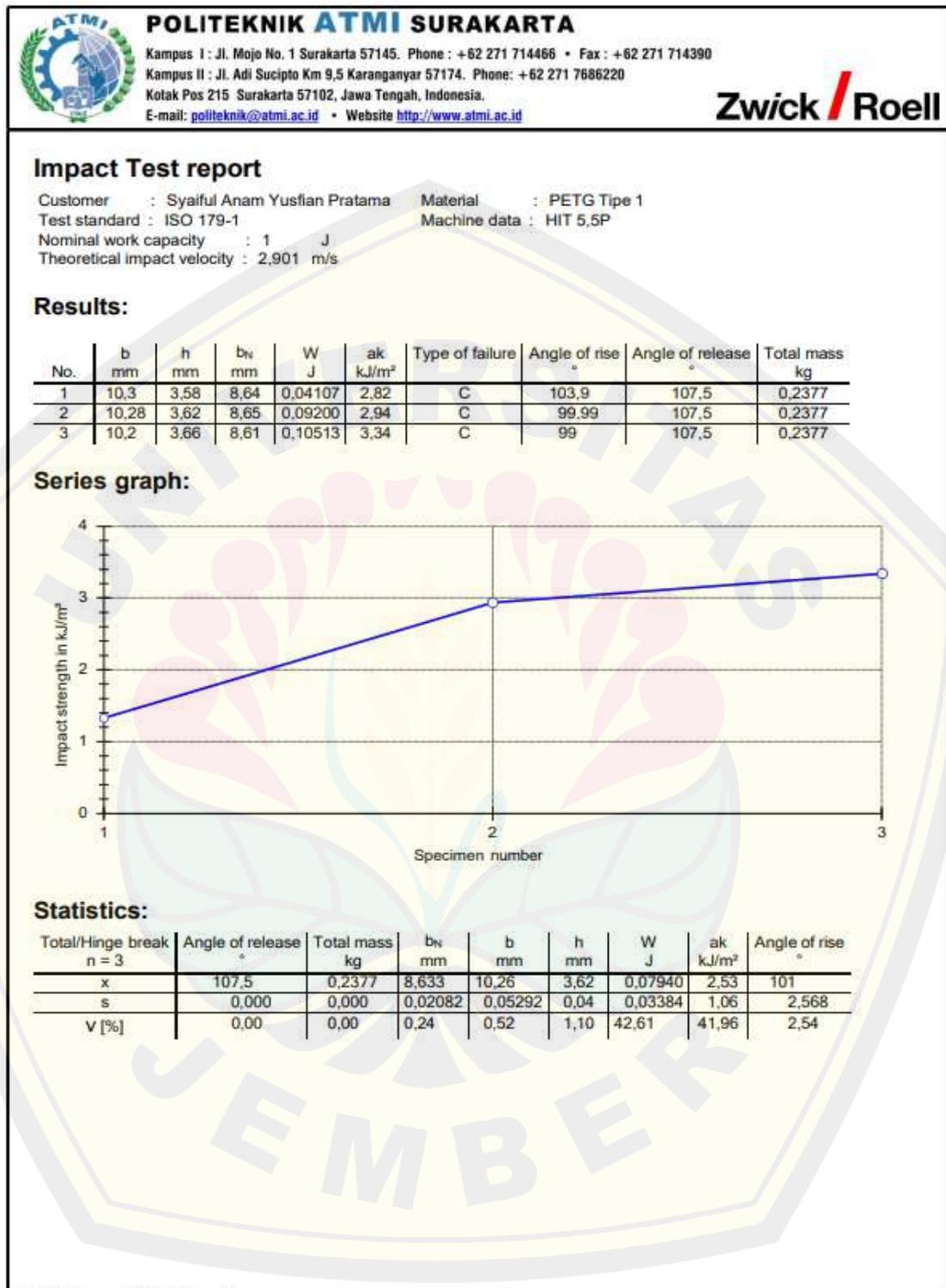


Gambar D.1 Proses Pengujian Impak



Gambar D.1 Spesimen Setelah Uji Impak

Lampiran 4. Data Hasil Spesimen Uji Impak



PETG 1 Impact ISO 179 .zs2

Gambar E.1 Data Hasil Uji Impak Spesimen 1

Lampiran 5. F tabel

$df1 = k - 1 \longrightarrow$ Variabel bebas + variabel terikat $- 1 \longrightarrow 4 - 1 = 3$

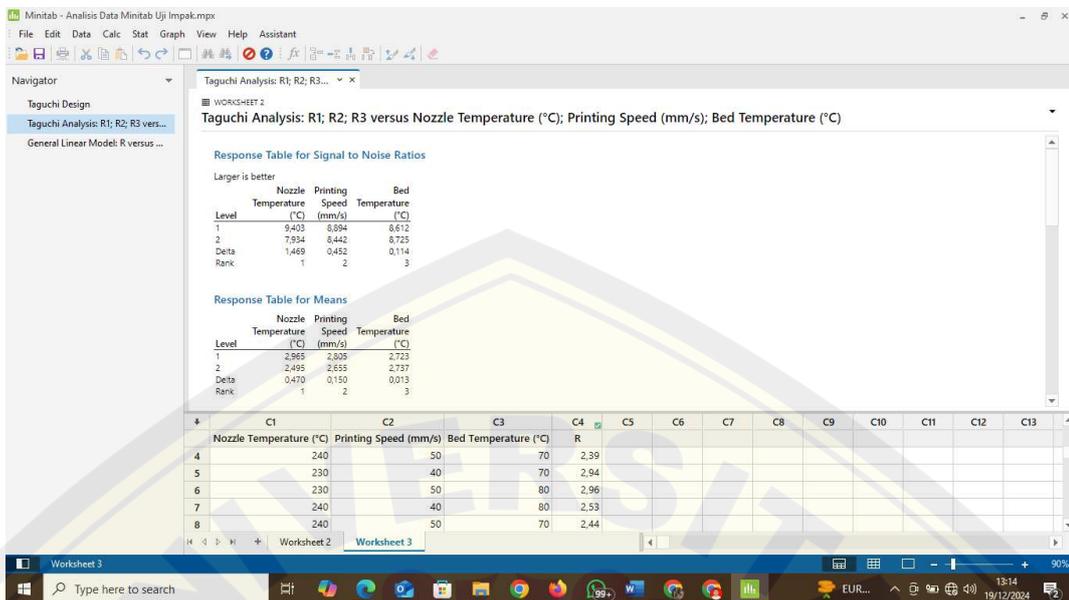
$df2 = n - k \longrightarrow$ Jumlah eksperimen atau sampel $- 4 \longrightarrow 12 - 4 = 8$

Titik Persentase Distribusi F untuk Probabilita = 0,05

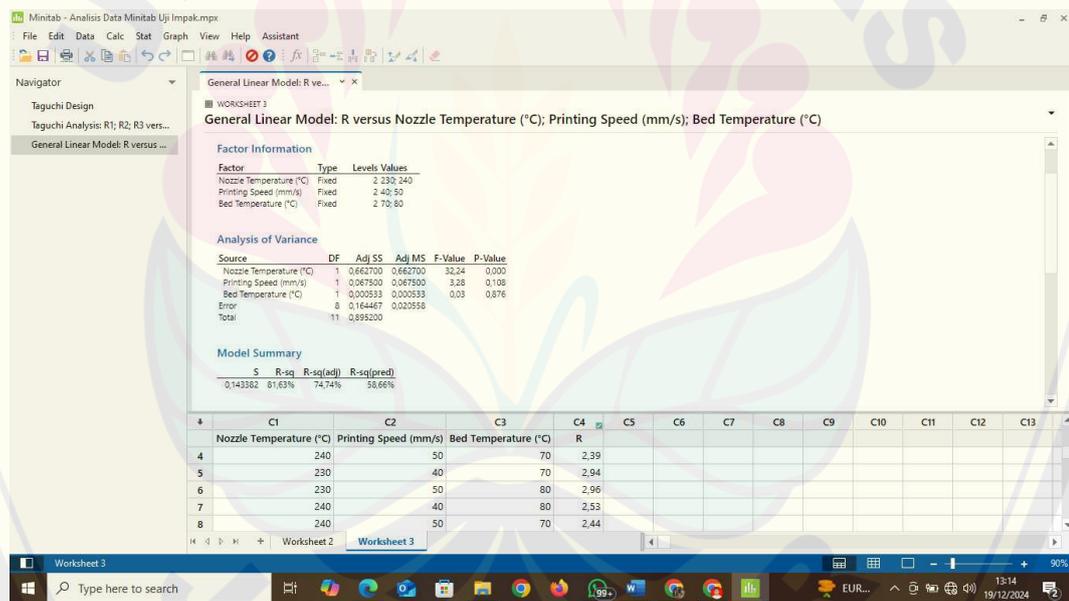
df untuk penyebut (N2)	df untuk pembilang (N1)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.42	19.43
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40

Gambar F.1 Tabel distribusi F

Lampiran 6. Perhitungan Data Minitab



Gambar G.1 Perhitungan Taguchi menggunakan *Software Minitab*

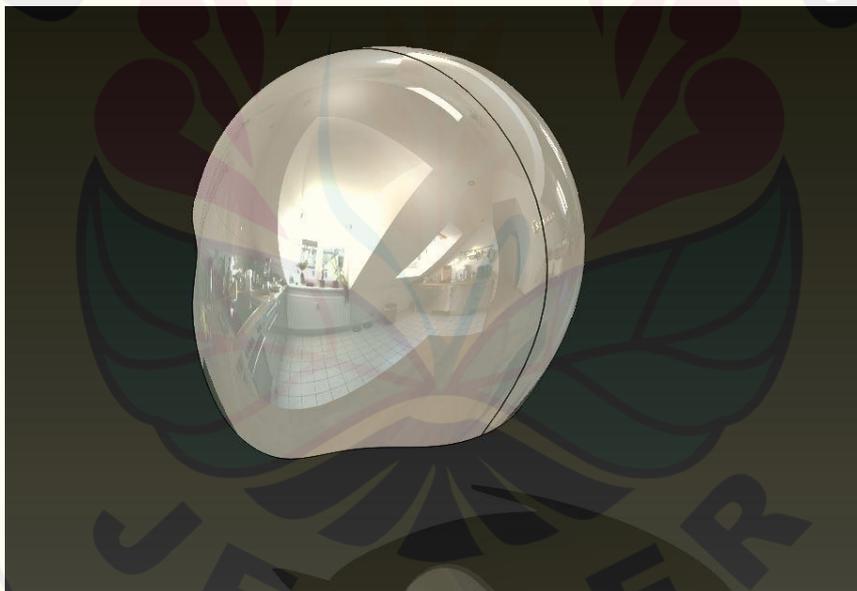


Gambar G.2 Perhitungan ANOVA menggunakan *Software Minitab*

Lampiran 7. Desain Cangkang Helm

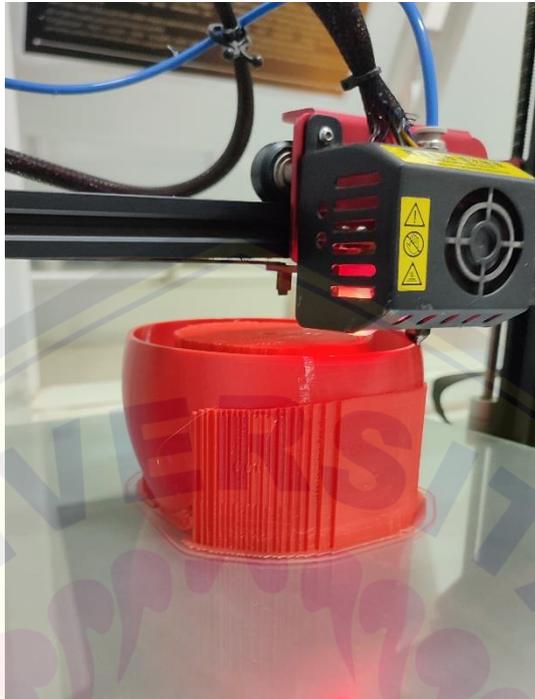


Gambar H.1 Desain Produk Helm Tampak Depan

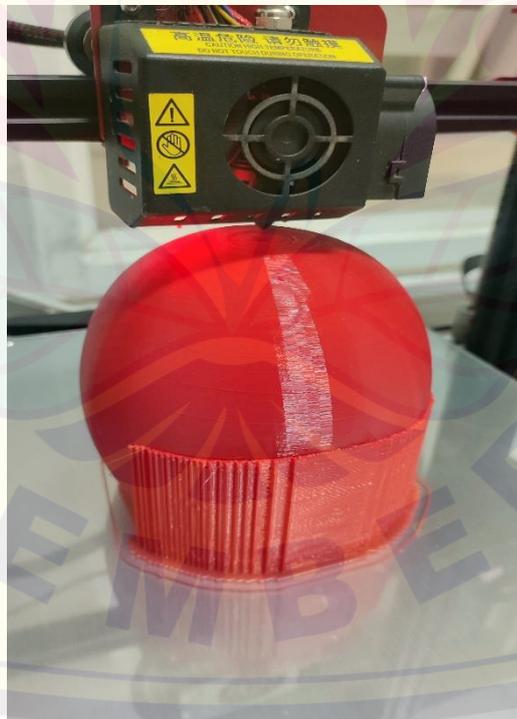


Gambar H.2 Desain Produk Helm Tampak Belakang

Lampiran 8. Proses Pencetakan *Prototipe* Cangkang Helm



Gambar H.1 Proses Pencetakan Produk Cangkang Helm 50%



Gambar H.2 Proses Pencetakan Produk Cangkang Helm 95%