OPTIMASI PARAMETER PROSES 3D *PRINTING* TERHADAP AKURASI DIMENSI FILAMEN PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) PADA ULIR LUAR

PROYEK AKHIR

Laporan akhir ini dibuat dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan Sarjana Terapan/Diploma IV Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Disusun Oleh:

Sherin Ferninda Putri NIM. 1042127

POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANGKA BELITUNG

2024

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PARAMETER PROSES 3D *PRINTING* TERHADAP AKURASI DIMENSI FILAMEN PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) PADA ULIR LUAR

Oleh:

SHERIN FERNINDA PUTRI / NIM. 1042127

Laporan ini telah diajukan dan disahkan sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Terapan/Diploma IV Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Menyetujui,

Pembimbing 1	Pembimbing 2
(Pristiansyah, S.S.T., M.Eng)	(Zulfitriyanto, S.S.T., M.T)
Penguji 1	**Penguji 2**
(Husman, S.S.T., M.T)	(Zaldy Sirwansyah Suzen, S.S.T., M.T)

ii

PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa	: Sherin Ferninda Putri NIM. 1042127
Dengan Judul	: Optimasi Parameter Proses 3D *Printing* Terhadap Akurasi Dimensi Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) Pada Ulir Luar

Menyatakan bahwa laporan akhir ini adalah hasil kerja saya sendiri dan bukan merupakan plagiat. Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan bila ternyata dikemudian hari ternyata melanggar pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi yang berlaku.

Sungailiat, 20 Januari 2025

Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
Sherin Ferninda Putri	

ABSTRAK

Teknologi 3D printing membuka peluang baru dalam produksi baut yang sebelumnya hanya dibuat secara konvensional. Baut oli gearbox rentan terhadap pelonggaran akibat getaran mesin yang dapat menyebabkan kegagalan dan risiko keselamatan. Keamanan dan ketahanan baut sangat bergantung pada presisi dan akurasi pembuatannya. Penelitian ini menggunakan filamen PETG dengan teknologi 3D printing FDM untuk membuat baut. Tujuannya adalah mendapatkan parameter proses 3D printing yang berpengaruh dan optimal dalam hal akurasi dimensi objek hasil cetak. Metode yang digunakan adalah Taguchi L_9 (3^3) OA dengan parameter nozzle temperature, layer height, dan infill overlap percentage. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nozzle temperature merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap keakuratan dimensi. Untuk keakuratan dimensi diameter luar, parameter optimal adalah layer height 0,20 mm, nozzle temperature 250℃, dan infill overlap percentage 70% menghasilkan nilai uji rata-rata 15,81 mm. Sementara untuk keakuratan dimensi tinggi, parameter optimal adalah nozzle temperature 250℃, infill overlap percentage 60%, dan layer height 0,15 mm dengan nilai uji rata-rata 20,01 mm.

Kata Kunci: 3D Printing, Akurasi Dimensi, FDM, PETG, Parameter

ABSTRACT

3D printing technology opens up new opportunities in the production of bolts that were previolusly only made conventionally. Gerbox oil bolts are prone to loosening due to engine vibration which can lead to failure and safety risks. The safety and durability of bolts depend heavily on their manufacturing precision and accuracy. This research uses PETG filament with FDM 3D printing technology to make bolts. The goal is to obtain the influential and opyimal 3D printing process parameters in terms of dimensional accuracy of the printed object. The method used is Taguchi L_9 (3^3) OA with parameters of nozzle temperature, layer height, and infill overlap percentage. The result showed that nozzle temperature was the most influential parameters on dimensional accuracy. For the accuracy of the outer diameter dimension, the optimal parameters are layer height 0.20 mm, nozzle temperature 250℃, and infill overlap percentage 70%, resulting in an average test value of 15.81 mm. As for the accuracy of the height dimendion, the optimal parameters were nozzle temperature 250℃, infill overlap percentage 60%, and layer height 0.15 mm with an average test value of 20.01 mm.

Keywords: 3D Printing, Dimensional Accuracy, FDM, PETG, Parameters

KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan kesehatan yang diberikan sehingga laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Pendidikan Diploma IV di politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Judul laporan ini adalah "OPTIMASI PARAMETER PROSES 3D *PRINTING* TERHADAP AKURASI DIMENSI FILAMEN PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) PADA ULIR LUAR". Laporan ini disusun untuk memenuhi pemahaman mengenai beberapa persyaratan program studi dan diserahkan kepada departemen Teknik Mesin dan Manufaktur di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Allah SWT. yang selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini serta Nabi Muhammad saw. yang menjadi sumber inspirasi bagi penulis dalam berbuat kebaikan.
2. Orang tua dan saudara-saudara tercinta yang selalu memberikan kasih sayang, doa, dukungan, dan nasihat sehingga proses penyusunan proposal ini dapat berjalan hingga selesai.
3. Bapak Pristiansyah, S.S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Polman Babel dan pembimbing utama Tugas Akhir, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan kepada penulis.
4. Bapak Zulfitriyanto, S.S.T., M.T., sebagai dosen pembimbing pendamping yang juga telah memberikan bimbingan, arahan dan masukan kepada penulis.
5. Bapak Boy Rollastin, S.Tr., M.T., selaku Kepala Program Studi D-IV Teknik Mesin dan Manufaktur.
6. Dosen-dosen Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu dan pengajaran selama penulis menempuh pendidikan di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.

7. Kepada semua teman, sahabat, serta pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah setia memberikan dukungan, doa, motivasi, dan kontribusi dalam penulisan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki banyak kekurangan dan belum sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik, saran, dan masukan yang konstruktif untuk perbaikan di masa mendatang. Dengan demikian, laporan ini disusun dengan harapan dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan.

Sungailiat, 27 Juli 2024

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman
LEMBAR PENGESAHAN .....**Error! Bookmark not defined.**
PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT iii
ABSTRAK iv
ABSTRACT v
KATA PENGANTAR vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR LAMPIRAN xv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
BAB II DASAR TEORI 4
2.1 3D *Printing* 4
2.2 Prinsip Dasar/Prinsip Kerja 3D *Printer* 4
2.3 Tipe 3D *Printer* FDM 5
2.4 Keuntungan dan Kerugian 3D *Printing* 6
2.5 Mekanisme Proses 3D *Printing* 7
2.5.1 Model Objek 3D 7
2.5.2 Proses Pencetakan 7
2.5.3 Proses *Finishing* 7
2.6 Parameter Proses 7
2.6.1 *Print Temperature* 8
2.6.2 *Layer Height* 8
2.6.3 *Infill Overlap Percentage* 8
2.6.4 *Print Speed* 8

2.6.5 *Build Plate Temperature* 8
2.7 Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) 8
2.8 Pengujian Akurasi Dimensi 10
2.9 Metode Taguchi 10
2.10 Desain Eksperimental Taguchi 11
2.11 *Software* Minitab 13
2.12 Penelitian Terdahulu 14
BAB III METODE PELAKSANAAN 15
3.1 Metodologi Penelitian 15
3.2 Studi Literatur 16
3.3 Persiapan Alat dan Bahan 16
3.3.1 Alat Penelitian 16
3.3.2 Bahan Penelitian 21
3.4 Menentukan Parameter Proses 22
3.4.1 *Design of Experiment* (DoE) 22
3.4.2 Penentuan Faktor dan Level Eksperimen 22
3.4.3 Variabel Respon 22
3.4.4 Pemilihan Matriks Orthogonal 23
3.5 Desain Taguchi L_9 23
3.5.1 Desain Faktorial 24
3.6 Desain Bentuk Spesimen 24
3.7 *Slicing File* STL Spesimen 25
3.8 Proses Pencetakan Spesimen 26
3.9 Replikasi Spesimen 29
3.10 Pengujian Akurasi Dimensi 30
3.10.1 Pengujian Akurasi Dimensi pada Diameter Luar Spesimen 31
3.10.2 Pengujian Akurasi Dimensi pada Tinggi Spesimen 32
3.10.3 Pengujian Akurasi Dimensi pada Diameter Dalam Bagian Atas dan Bawah Spesimen 33
3.10.4 Pengujian Akurasi Dimensi Ulir 34
BAB IV PEMBAHASAN 36

4.1 Data Hasil Eksperimen 36
4.2 Pengolahan Data Hasil Eksperimen 40
4.2.1 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Luar Spesimen 40
4.2.2 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Tinggi Spesimen 42
4.2.3 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen 43
4.2.4 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 44
4.2.5 S/N Ratio "Nominal is Best" Go dan No Go 45
4.2.6 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 47
4.3 Uji Konfirmasi 48
4.4 Analisa Hasil 50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 52
5.1 Kesimpulan 52
5.2 Saran 52
DAFTAR PUSTAKA 54
LAMPIRAN 57

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

2.1 Spesifikasi Filamen PETG 10
3.1 Parameter Proses dan Level Eksperimen yang Diuji 22
3.2 Derajat Kebebasan 23
3.3 Desain Faktorial 24
4.1 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Diameter Luar Spesimen 36
4.2 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Tinggi Spesimen 37
4.3 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen 38
Tabel 4.4 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 38
4.5 Data Hasil Uji GO dan NO GO Spesimen 39
4.6 Hasil S/N Ratio Diameter Luar Spesimen 41
4.7 Hasil S/N Ratio Tinggi Spesimen 42
4.8 Hasil S/N Ratio Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen 44
4.9 Hasil S/N Ratio Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 45
4.10 Hasil S/N Ratio Go dan No Go 46
4.11 Hasil S/N Ratio Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 47
4.12 Hasil Uji Konfimasi Diameter Luar Spesimen 48
4.13 Hasil Uji Konfirmasi Tinggi Spesimen 49
4.14 Hasil Uji Konfimasi Diameter Dalam Bagian Atas 49
4.15 Hasil Uji Konfirmasi Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 49
4.16 Hasil Kombinasi Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 50
4.17 Parameter Proses Optimal Diameter Luar 50
4.18 Parameter Proses Optimal Tinggi Spesimen 51
4.19 Parameter Proses Optimal Diameter Dalam Bagian Atas 51

4.20 Parameter Proses Optimal Diameter Dalam Bagian Bawah 51
4.21 Parameter Proses Optimal Kombinasi Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah..... 51

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

2.1 Ilustrasi Proses FDM (Sumber: M. Habib, 2023) 6
2.2 Filamen PETG (Sumber: esun3dstore.com) 9
3.1 Flowchart 15
3.2 Flowchart 16
3.3 3D Printer Creality Ender 3 Pro (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 17
3.4 Laptop (Sumber: JKT Gadget)..... 17
3.5 Jangka Sorong Digital (Sumber: mitutoyo.com) 18
3.6 Sisir Ulir (Sumber: mitutoyo.com) 18
3.7 Mur Logam (Sumber: Dokumentasi Pribadi) 19
3.8 Software Fusion 360 (Sumber: Wikipedia)..... 20
3.9 Software Creality Slicer (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 20
3.10 Software Minitab 19 (Sumber: OS Berkualitas)..... 21
3.11 Filamen PETG (Sumber: esun3dstore.com) 21
3.12 Desain Spesimen dengan Autodesk Fusion 360 (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 25
3.13 Slicing pada Creality Slicer (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 26
3.14 Input Memory Card ke Mesin (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 26
3.15 Menyalakan 3D Printer (Sumber: Rosalina, 2024)..... 27
3.16 Memasang Filamen (Sumber: Rosalina, 2024)..... 27
3.17 Kalibrasi Bed Mesin (Sumber: Rosalina, 2024) 28
3.18 Mengatur Suhu Bed (Sumber: Dokumentasi Pribadi) 28
3.19 Proses Pencetakan Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi) 29
3.20 Hasil Cetak Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi) 29
3.21 Replikasi Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 30
3.22 Titik Uji Akurasi Dimensi Spesimen (a) Diameter Luar, (b) Tinggi, (c) Diameter Dalam Bagian Atas, dan (d) Diameter Dalam Bagian Bawah (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 31

3.23 Pengukuran Diameter Luar Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 32
3.24 Pengukuran Tinggi Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi) 33
3.25 Pengukuran Diameter Dalam Bagian Atas dan Bawah Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)..... 34
3.26 Pengujian GO atau NO GO Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi) 35
4.1 Grafik S/N Ratio Diameter Luar Spesimen 41
4.2 Grafik S/N Ratio Tinggi Spesimen 42
4.3 Grafik S/N Ratio Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen..... 43
4.4 Grafik S/N Ratio Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen..... 44
4.5 Grafik S/N Ratio Go dan No Go 46
4.6 Grafik S/N Ratio Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen 47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Daftar Riwayat Hidup..... 58

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi percetakan tiga dimensi (3D *printing*), juga dikenal sebagai manufaktur aditif, merupakan perkembangan yang relatif baru dibidang teknologi. 3D *printing* adalah metode percetakan objek dengan tiga dimensi yang berasal dari CAD atau model 3D digital dengan cara melapisi lapisan satu demi satu, sehingga memungkinkan terciptanya berbagai detail pola pencetakan [1].

Rapid prototyping merupakan komponen mekanis yang menggunakan volume dan teknik produksi yang efisien untuk menghasilkan prototipe dengan cepat. Teknologi ini dikenal sebagai *Fused Deposition Modeling* (FDM), dan prinsip kerjanya adalah dengan cara memanaskan material termoplastik menggunakan *nozzle* yang panas sesuai *melting temperature* tertentu, kemudian produk dicetak lapis demi lapis [2].

Kemajuan dalam teknologi manufaktur aditif terutama *printer* 3D, telah menghadirkan cara baru dalam memproduksi berbagai komponen termasuk baut berulir. Sebelumnya, baut merupakan elemen penting dalam konstruksi dan perakitan hanya dibuat melalui metode tradisional seperti pemesinan dan pengecoran. Namun, kini tersedia pilihan metode produksi alternatif. Penerapan teknologi ini menghadapi beberapa kendala teknik seperti yang terlihat pada penggunaan baut oli *gearbox*. Getaran yang dihasilkan dari kerja mesin dan motor dapat menyebabkan baut menjadi longgar secara mendadak. Kondisi ini tidak hanya berpotensi merusak mesin, tetapi juga menimbulkan risiko keselamatan. Tingkat presisi dan akurasi dalam proses pembuatan baut memiliki hubungan yang signifikan dengan faktor keamanan dan kemungkinan terjadinya kelonggaran pada sambungan [3].

Walaupun teknologi *printer* 3D memberikan fleksibilitas dalam proses produksi, pembuatan komponen dengan detail kompleks dan bentuk berongga seperti ulir masih menghasilkan dimensi yang kurang presisi dibandingkan dengan

metode tradisional seperti *rolling* dan *machining*. Meskipun memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dimensi, banyak produsen masih memilih menggunakan teknologi FDM untuk memproduksi komponen berulir. Sementara itu, para peneliti akademis melihat potensi teknologi manufaktur aditif dalam menciptakan struktur yang lebih efisien melalui berbagai metode , termasuk optimasi topologi [4].

Referensi [5] melakukan penelitian mengenai optimasi parameter 3D *printing* menggunakan material PLA telah menemukan kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan lubang dengan diameter 20 mm yang presisi. Parameter tersebut mencakup *nozzle temperature* pada 200℃, *bed temperature* pada 62℃, *room temperature* pada 34℃, *infill percentage* sebesar 40%, *layer height* 0,25 mm, dan *print speed* 20 mm/s. Penelitian ini menggunakan metode Taguchi untuk menganalisis data yang terbukti efektif dalam mengurangi penyimpangan dari nilai yang ditargerkan sehingga dapat mencapai kualitas produk yang maksimal.

Penelitian terkait pengaruh parameter proses 3D *printing* terhadap akurasi dimensi menggunakan material PETG. Melalui analisis menggunakan metode Taguchi L_{27} OA, ditemukan parameter-parameter optimal yang memengaruhi ketinggian spesimen. Parameter tersebut terdiri dari *nozzle temperature* level satu pada 235℃, *bed temperature* level tiga pada 100℃, *infill density* level dua sebesar 25%, *infill overlap* level sau sebesar 10%, *layer height* level tiga 30 mm, *print speed* level satu 40 mm/s, *infill speed* level satu 40 mm/s, dan *flowrate* level satu sebesar 90% [6].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian yang akan dilakukan yaitu optimasi parameter proses 3D *printing* terhadap akurasi dimensi filamen PETG dengan menggunakan metode Taguchi L_9 dalam menganalisis hasil cetak produk. Berdasar acuan sumber penelitian terdahulu, metode Taguchi dapat memecahkan permasalahan untuk menentukan nilai parameter yang optimal guna membantu analisis mutu kualitas dari hasil cetak produk 3D *printing*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dari penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana mendapatkan parameter optimum mesin 3D *printing* terhadap tingkat keakuratan dimensi hasil cetak 3D *printing* menggunakan filamen PETG?
2. Parameter apa saja yang paling berpengaruh terhadap akurasi dimensi ulir luar?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian di atas berdasarkan rumusan masalah adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan parameter optimum mesin 3D *printing* terhadap keakuratan dimensi dari filamen PETG pada ulir luar.
2. Mendapatkan parameter yang paling berpengaruh terhadap keakuratan dimensi hasil cetak 3D *printing* pada ulir luar menggunakan filamen PETG.

BAB II
DASAR TEORI

2.1 3D *Printing*

Suatu metode untuk memproduksi komponen dari data model tiga dimensi dikenal sebagai 3D *printing*. Dengan menggunakan proses aditif, pembuatan objek 3D dapat dicapai. Dalam proses aditif, objek dibentuk dengan mengaplikasikan material secara bertahap, lapisan demi lapisan, hingga objek terbentuk sepenuhnya. Lapisan per lapisan pada pembuatan benda 3D ditafsirkan sebagai penampang melintang tipis dari suatu benda. Hal ini menunjukkan bahwa mencetak lapisan material yang terorganisir secara *bottom-up* atau sebaliknya adalah dasar dari proses 3D *printing*, sehingga proses desain dan produksi dapat diselesaikan lebih cepat dan fleksibel dengan pendekatan manufaktur ini. Selain itu, dibandingkan dengan metode manufaktur subtraktif, 3D *printing* memungkinkan pengguna untuk membuat bentuk yang kompleks dengan bahan baku yang lebih sedikit [7] [8].

2.2 Prinsip Dasar/Prinsip Kerja 3D *Printer*

Prinsip dasar 3D *printer*, juga dikenal sebagai *additive manufacturing*, melibatkan pembuatan objek tiga dimensi dengan menambahkan material lapis demi lapis berdasarkan model digital. Mesin ini menggunakan kontrol komputer untuk menggerakkan *nozzle* atau sumber energi dalam tiga sumbu (X,Y,Z), mendepositkan material dengan presisi tinggi. Setiap lapisan yang ditambahkan memadat atau mengeras sebelum lapisan berikutnya diaplikasikan dengan adhesi antar lapisan yang kuat untuk membentuk objek solid. Proses ini sering memerlukan struktur pendukung untuk bagian yang menggantung. Berbagai teknologi seperti FDM (*Fused Deposition Modeling*), SLA (*Stereolithography*), dan SLS (*Selective Laser Sintering*) menggunakan prinsip dasar ini, meskipun dengan variasi dalam metode deposisi dan solidifikasi material [9].

Prinsip kerja 3D *printer* melibatkan pembuatan objek tiga dimensi melalui deposisi material lapis demi lapis. Mesin ini menggunakan model digital sebagai

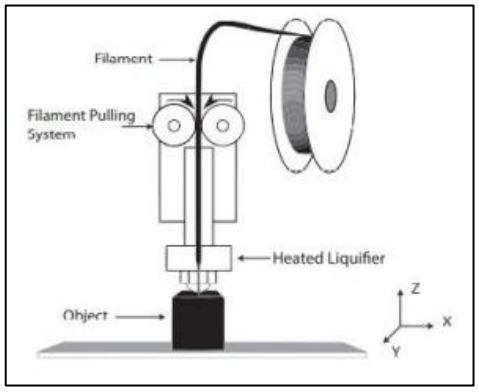
panduan, biasanya dalam formal STL, yang dikonversi menjadi serangkaian instruksi lapisan tipis. *Printer* kemudian mengikuti instruki ini, mengerakkan kepala cetak atau sumber energi dalam tiga dimensi untuk mendepositkan atau memadatkan material dengan presisi. Setiap lapisan melekat pada lapisan sebelumnya dan mengeras sebelum penambahan lapisan berikutnya. Proses ini berulang hingga objek selesai, sering kali memerlukan struktur pendukung untuk bagian yang menggantung. Kontrol suhu, kalibrasi yang akurat, dan pemilihan material yang tepat adalah kunci untuk menghasilkan objek yang berkualitas tinggi [10].

2.3 Tipe 3D *Printer* FDM

Teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) diciptakan oleh S. Scott Crump di penghujung tahun 1980-an dan kemudian dipatenkan oleh Stratasys pada tahun 1990. Setelah masa paten berakhir, teknologi ini berkembang pesat melalui komunitas *open source* dan menghasilkan berbagai varian *printer* 3D komersial, yang menyebabkan penurunan harga teknologi FDM hingga 50% dari harga awalnya.

Prinsip kerja FDM melibatkan proses ekstruksi material termoplastik yang mengeras membentuk lapisan-lapisan kecil. Material berupa filamen atau kawat termoplastik yang digulung dalam bentuk koil disuplai ke *nozzle* ekstruksi. *Nozzle* ini memanaskan material hingga temperaturtertentu dan mengatur alirannya. Pergerakan *nozzle* secara horizontal dan vertikal dikendalikan oleh motor *stepper*, sementara arah-Z dan laju aliran disesuaikan dengan kebutuhan. Seluruh proses ini diatur oleh perangkat lunak *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) yang dijalankan melalui mikrokontroler.

FDM merupakan salah satu dari beberapa teknologi manufaktur aditif yang ada, bersama dengan *Stereolithography* (SL), dan *Selective Laser Sintering* (SLS). Teknologi-teknologi ini menggunakan prinsip pembangunan komponen secara bertahap dengan menambahkan material [11].



Gambar 2.1 Ilustrasi Proses FDM (Sumber: M. Habib, 2023)

2.4 Keuntungan dan Kerugian 3D *Printing*

Teknologi 3D *printing* menawarkan sejumlah keuntungan signifikan dalam dunia manufaktur antara lain [12]:

1. Kemampuan membuat desain kompleks yang sulit dicapai melalui teknik konvensional.
2. Kustomisasi produk yang fleksibel dan dapat memproduksi sesuai permintaan.
3. Pengurangan limbah produksi.
4. Meminimalkan biaya untuk pembuatan dalam jumlah terbatas.
5. Pembuatan prototipe juga menjadi lebih efisien.

Selain memiliki keuntungan, 3D *printing* juga memiliki kekurangan antara lain:

1. Investasi awal untuk peralatan cenderung tinggi.
2. Terdapat batasan dalam ukuran objek yang dapat diproduksi.
3. Kecepatan produksi yang relatif lambat untuk volume besar.
4. Variasi material yang dapat digunakan terbatas, tidak dapat menggunakan lebih dari satu material dalam satu produksi yang sama.
5. Kualitas permukaan produk sering kali membutuhkan proses *finishing* tambahan.
6. Masalah hak cipta dan regulasi.

2.5 Mekanisme Proses 3D *Printing*

Mekanisme proses pada mesin 3D *printing* adalah sebagai berikut [13].

2.5.1 Model Objek 3D

Sebelum memulai ke proses pencetakan, model objek 3D dibuat terlebih dahulu menggunakan *software* khusus untuk *modelling* desain tiga dimensi berupa CAD (*Computer Aided Design*). *Software* yang dapat digunakan untuk membuat gambar CAD, antara lain Autocad, Solidworks, Fusion 360, dan lain sebagainya. Gambar CAD nantinya akan disimpan menjadi format STL.

2.5.2 Proses Pencetakan

Desain yang sudah dibuat selanjutnya akan ditransfer ke *software slicer* untuk mendapatkan *g-code*. Sebelum pencetakan oleh mesin dilakukan, data *g-code* dimasukkan ke *memory card* sehingga mesin dapat membaca kode program dari desain yang akan dicetak. Proses pencetakan desain berbeda-beda antara desain satu dengan yang lainnya. Desain, ukuran, volume, kerumitan desain dan lainnya menjadi beberapa faktor yang memengaruhi proses pencetakan. Prinsip dasar proses pencetakan dilakukan dengan *additive layer*. Serangkaian *g-code* yang di-*input* akan dibaca oleh mesin kemudian memulai pencetakan selapis demi selapis secara berurutan membuat susunan lengkap dan utuh menjadi sebuah objek 3D.

2.5.3 Proses *Finishing*

Langkah terakhir adalah *finishing*. Pada proses ini dapat menyempurnakan bagian yang tidak sesuai atau kurang sempurna dari hal yang diharapkan, misalnya ukuran yang berbeda atau bentuk yang sedikit kurang rapi. Teknik *multiple* material dapat digunakan untuk menyempurnakan proses ini, misalnya permukaan objek mungkin perlu dihaluskan dengan amplas atau *treatment* kimia.

2.6 Parameter Proses

Proses 3D *printing* memiliki beberapa jenis parameter, antara lain sebagai berikut [14].

2.6.1 *Print Temperature*

Suhu cetak, juga dikenal sebagai suhu ekstruksi atau ekstruksi, adalah suhu dimana filamen plastik dipanaskan di ujung panas (bagian atas) *printer* 3D sebelum pemotongan *nozzle*.

2.6.2 *Layer Height*

Layer height adalah ketebalan vertikal dari masing-masing lapisan yang dicetak *printer* 3D ketika membuat objek. Ketebalan layer yang digunakan dapat memengaruhi dimensi dan kekerasan permukaan produk.

2.6.3 *Infill Overlap Percentage*

Infill overlap percentage merupakan persentase tumpang tindih isi (*layer*) pada saat proses pencetakan. *Infill overlap percentage* menentukan seberapa jauh *infill* melewati batas antara *infill* dan perimeter dalam, dinyatakan sebagai persentase dari lebar ekstrusi.

2.6.4 *Print Speed*

Print speed merupakan kecepatan dari pergerakan *nozzle* saat meletakkan material. Kecepatan yang lebih tinggi dapat meningkatkan kinerja, tetapi juga dapat menurunkan kualitas dan kepresisian produk. Kecepatan cetak yang lebih rendah biasanya menghasilkan hasil yang lebih berkualitas, tetapi juga membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih lama.

2.6.5 *Build Plate Temperature*

Build plate temperature juga dikenal sebagai suhu *bed*, adalah permukaan tempat objek 3D ditempatkan. Istilah "*build plate temperature*" mengacu pada suhu yang dijaga pada *platform* atau permukaan material selama proses 3D *printing*. *Build plate temperature* menentukan tingkat adhesi lapisan pertama ke permukaan cetak serta mencegah *warping* (melengkung) atau *shrinkage* (penyusutan) pada bagian bawah objek.

2.7 Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*)

PETG adalah bentuk modifikasi dari PET (Polietilena Tereftalat) yang biasanya digunakan dalam botol plastik. PETG juga merupakan filamen 3D *printing* termoplastik turunan yang memiliki karakteristik tertentu dengan adanya

penambahan glikol. Penambahan glikol membuatnya lebih mudah digunakan untuk permodelan 3D [7].

1. Kelebihan

a. Kekuatan dan ketahanan tinggi.
b. Fleksibilitas yang baik.
c. Tahan terhadap bahan kimia dan air
d. *Warping* minimal dibandingkan ABS.
e. Lebih mudah dicetak dibandingkan ABS.
f. Dianggap *food safe* (dengan catatan).
g. Tahan terhadap benturan.
h. Tidak berbau saat proses pencetakan.

2. Kekurangan

a. Dapat menyerap kelembaban udara.
b. Mungkin memerlukan pendinginan tambahan pada saat pencetakan.
c. Cenderung lebih mahal dari PLA.
d. Suhu pencetakan yang tinggi.
e. Bisa mengalami *stringing* (benang-benang halus) selama pencetakan.

Gambar 2.2 Filamen PETG (Sumber: esun3dstore.com)

Tabel 2.1 Spesifikasi Filamen PETG

Spesifikasi Filamen	
Filament Diameter	1,75 mm
Print Temperature	230-250℃
Print Bed Temperature	40-50℃
Hot Bed Temperature	>100℃
Roundeness Tolerance	0,01-0,02 mm
Infill Speed	20-50 mm/s
Net Weight	1 kg/*roll*

Tabel 2.1 menunjukkan spesifikasi dari filamen PETG yang menjadi acuan dalam proses pencetakan model 3D serta menentukan parameter proses yang paling optimal dari batas nilai ketentuan spesifikasi.

2.8 Pengujian Akurasi Dimensi

Pengujian akurasi dimensi adalah proses mengukur dan membandingkan dimensi objek yang dicetak dengan dimensi yang ditentukan dalam model CAD asli. Alat pengukuran yang digunakan pada penelitian adalah jangka sorong digital dengan ketelitian 0,01 mm, sisir ulir dan mur logam.

2.9 Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah pendekatan analisis yang dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi untuk optimasi kualitas produk [15]. Metode ini mengidentifikasi dan mengontrol faktor-faktor yang memengaruhi kualitas dengan fokus pada efisiensi biaya dan waktu. Pendekatan ini membedakan antara faktor yang dapat dikontrol dan faktor *noise* (gangguan) menggunakan *Signal to Noise Rasio* (S/N) dan ANOVA untuk menganalisis dampak setiap faktor *output* produk [16]. Tujuan utamanya adalah meningkatkan produktivitas sambil meminimalkan variasi dalam proses produksi [17].

Metode Taguchi unggul dalam menghasilkan desain eksperimen yang efektif dengan mempertimbangkan berbagai faktor secara simultan. Metode ini memungkinkan pencapaian kualitas produk yang tinggi dan konsisten, bahkan untuk aspek yang sulit dikontrol. Keunggulan utamanya terletak pada efisiensi analisis yang dapat mencakup berbagai faktor dan prespektif sekaligus.

2.10 Desain Eksperimental Taguchi

Desain eksperimen (DoE) merupakan metode untuk menganalisis bagaimana faktor-faktor yang berbeda memengaruhi karakteristik rata-rata produk [17]. DoE yang baik dicirikan oleh tingkat efisiensi tinggi dan kemampuan menghasilkan informasi yang optimal dalam proses evaluasi [18]. Desain eksperimen Taguchi memiliki tiga tahapan utama, antara lain [19]:

1. Tahapan Perencanaan

Tahap ini menghasilkan eksperimen yang memberikan hasil, baik yang menguntungkan maupun yang tidak menguntungkan melalui serangkaian langkah sistematis. Terdapat beberapa langkah dalam tahap ini antara lain:

a. Identifikasi Faktor (Variabel Bebas)

Faktor atau variabel bebas adalah variabel yang berubah secara independen dari variabel lainnya. Faktor-faktor dipilih untuk menguji pengaruhnya terhadap variabel respon, memungkinkan pelaksanaan eksperimen yang efektif dan efisien.

b. Variabel Respon

Variabel respon merupakan variabel yang nilainya dipengaruhi oleh perubahan variabel lain. Penentuan variabel respon yang jelas adalah hal krusial dalam eksperimen.

c. Pemilihan Matriks Orthogonal

Pemilihan matriks orthogonal digunakan untuk mengevaluasi berbagai variabel dengan jumlah percobaan minimal dan ditandai dengan simbol khusus. Berikut simbol yang ditunjukkan keterangannya.

$L_a(b^c)$

Keterangan:

L = Rancangan bujur sangkar latin

a = Banyak percobaan

b = Banyak level variabel

c = Banyak variabel

2. Tahap Pelaksanaan

Replikasi merupakan bagian dari tahap implementasi eksperimen. Replikasi adalah pengulangan eksperimen dalam kondisi yang sama untuk meningkatkan akurasi, mengurangi kesalahan, dan mendapatkan estimasi kesalahan yang lebih tepat.

3. Tahap Analisis

Tahap ini merupakan fase analisis data yang mencakup pengumpulan, pengolahan, dan pengujian statistik data eksperimen. Analisis utama menggunakan metode S/N *Ratio* (*Signal to Noise Ratio*) dalam metode Taguchi untuk mengidentifikasi level faktor yang optimal dan berpengaruh terhadap kualitas hasil. S/N *Ratio* berfungsi sebagai alat pengukur karakteristik kualitas dari hasil percobaan. Karakteristik kualitas dalam S/N *Ratio* terdiri dari:

a. *Smaller is Better*

Karakteristik "*Smaller is Better*" mengacu pada situasi dimana nilai yang lebih rendah menunjukkan hasil yang lebih baik. Parameter ini memiliki batasan nilai minimum nol dan harus positif, dengan nilai optimal yang mendekati nol. S/N *Ratio* untuk karakteristik ini dapat dihitung secara manual menggunakan rumus tertentu, yaitu:

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

Keterangan:

n = jumlah pengulangan yang dilakukan

y = data hasil percobaan

b. *Nominal is Best*

Nomial is Best adalah karakteristik kualitas yang mengarah pada nilai target spesifik yang bukan nol dan memiliki batasan. Kualitas terbaik dicapai ketika hasil mendekati nilai target yang sudah ditetapkan tersebut. Perhitungan S/N *Ratio* untuk

karakteristik ini dapat dilakukan secara manual. Nilai S/N untuk karakteristik *Nominal is Best* dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$\frac{S}{N} = -10\ log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_1-\bar{y})^2}{n}\right] \quad \text{.....(2)}$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan yang dilakukan

y = data hasil percobaan

c. *Large is Better*

Karakteristik "*Large is Better*" menunjukkan bahwa nilai yang lebih tinggi menghasilkan kualitas yang lebih baik. Parameter ini harus bernilai positif tanpa batas atas, dengan nilai optimal yang semakin besar. S/N *Ratio* untuk karakteristik ini dapat dihitung menggunakan perhitungan manual.

$$\frac{S}{N} = -10\ log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\frac{1}{y_i^2}}{n}\right] \quad \text{.....(3)}$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan yang dilakukan

y = data hasil percobaan

2.11 *Software* Minitab

Minitab merupakan perangkat lunak yang didesain untuk menganalisis dan mengolah data statistik secara khusus. Dikenal sebagai perangkat lunak statistik yang kuat. Minitab dapat digunakan untuk analisis univariat dan multivariat, serta dapat menangani data primer dan sekunder.

Minitab mengintegrasikan kemudahan penggunaan yang mirip dengan Microsoft Excel sekaligus menawarkan kemampuan untuk melakukan analisis statistik yang kompleks. Selain itu, Minitab juga menyediakan model statistik yang diperlukan dalam desain eksperimen, seperti model DoE dan Taguchi, serta mendukung pemodelan regresi nonlinier.

2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini tentang pengaruh parameter proses dalam pencetakan 3D memengaruhi akurasi dimensi filamen PETG, dengan menggunakan pendekatan metode Taguchi. Penelitian ini mengungkapkan dua kondisi optimal yang berbeda. Untuk pengukuran diameter, hasil optimum menggunakan desain faktorial L_9 dengan kombinasi parameter yaitu *nozzle temperature* (250℃), *infill overlap percentage* (50), dan *layer height* (0,10 mm). Kombinasi ini menghasilkan rata-rata diameter 40,07 mm. Sementara itu, untuk dimensi tinggi, kondisi optimal dicapai juga dengan desain faktorial L_9 namun dengan parameter yang berbeda yaitu *nozzle temperature* (245℃), *infill overlap percentage* (70%), dan *layer height* (0,15 mm). Pengaturan ini menghasilkan rata-rata tinggi 3,52 mm [12].

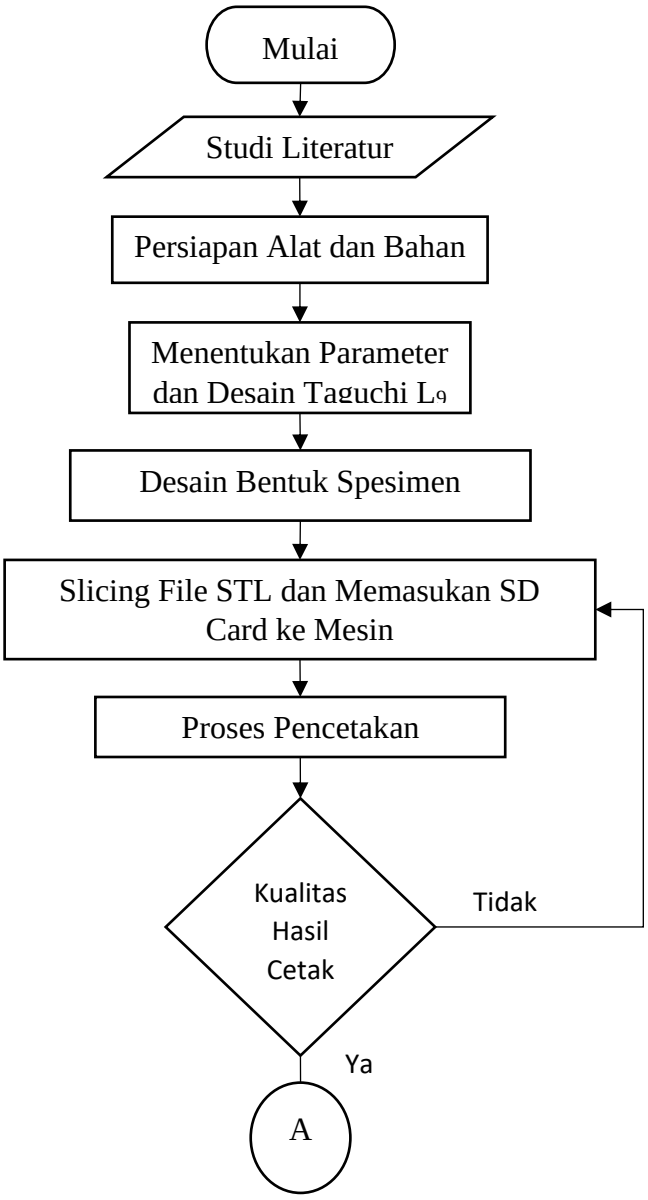
Penelitian tentang cara mengoptimalkan akurasi dimensi dalam pencetakan 3D menggunakan bahan plastik polipropilen (PP) daur ulang, dengan menerapkan metodologi Taguchi. Untuk menghasilkan produk berbentuk kubus dengan dimensi 20×20×20 mm, penelitian ini berhasil mengidentifikasi kombinasi parameter yang optimal, yaitu *printing temperature* diatur pada 260℃, *layer height* sebesar 0,16 mm, dan *print speed* ditetapkan pada 20 mm/s. Pengaturan parameter-parameter ini terbukti memberikan hasil terbaik dalam mencetak produk menggunakan material PP daur ulang [20].

Penelitian mengenai optimasi parameter pada 3D *printing* FDM terhadap akurasi dimensi menggunakan filamen PLA *food grade* yang dilakukan oleh [21]. Dengan mengaplikasikan metode Taguchi L_{27} *Orthogonal Array*, penelitian ini mengidentifikasi kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan akurasi dimensi tinggi spesimen yang terbaik. Studi tersebut menemukan bahwa hasil optimal dicapai dengan menggunakan lima parameter proses yang spesifik, yaitu *nozzle temperature* (185℃), *layer height* (0,20 mm), *print speed* (40 mm/s), *infill rate* (8), dan *temperature based plate* (40℃).

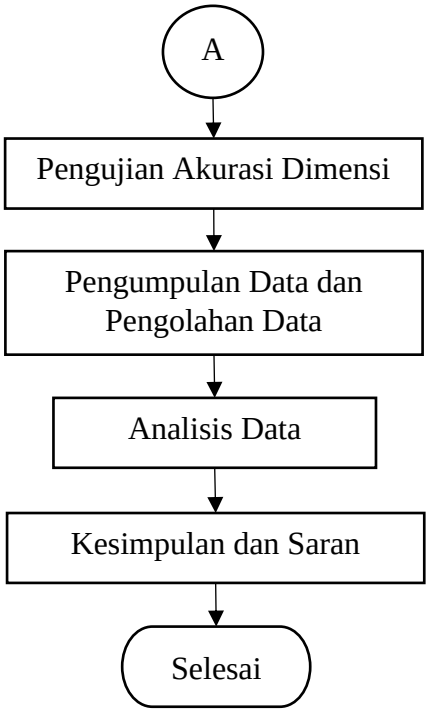
BAB III
METODE PELAKSANAAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metode penyelesaian yang digunakan dalam proyek akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3.1 *Flowchart*



Gambar 3.2 *Flowchart*

Tahapan proses penelitian yang akan dilakukan berdasarkan *flowchart* di atas adalah sebagai berikut.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses sistematis yang meliputi pengumpulan, analisis, dan pengolahan data dari berbagai sumber tertulis seperti buku, artikel, jurnal akademis, dan publikasi umum yang relevan dengan tujuan penelitian.

3.3 Persiapan Alat dan Bahan

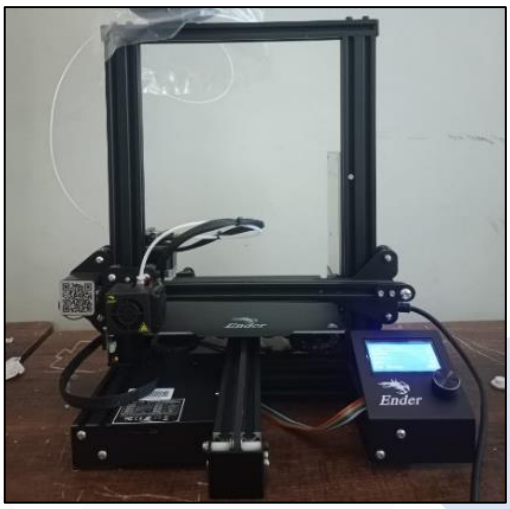
3.3.1 Alat Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. 3D *Printer* FDM

Pada penelitian ini mesin yang digunakan untuk mencetak spesimen uji, yaitu mesin 3D *printing* FDM Creality Ender 3 Pro dengan dimensi 220×220×250 mm

dan *single nozzle*. Mesin 3D *printer* Creality Ender 3 Pro ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 3D *Printer* Creality Ender 3 Pro (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

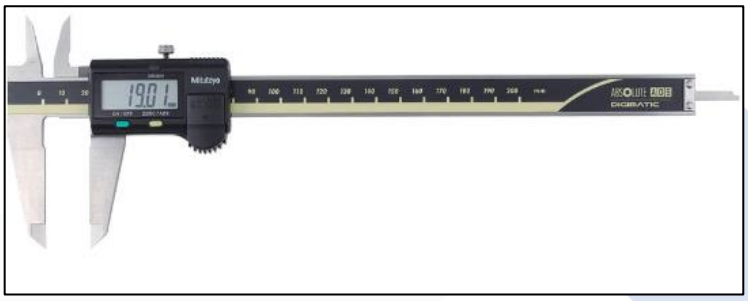
2. Laptop

Laptop yang digunakan dalam penelitian ini yaitu merk HP 14-dk1005nia untuk menjalankan *software* CAD dengan format STL, membuat pengaturan (*setting*) parameter proses 3D *printing* pada *software* Creality Slicer, serta menganalisis hasil data yang telah didapatkan. Laptop ditunjukkan pada Gambar 3.4.

Gambar 3.4 Laptop (Sumber: JKT Gadget)

3. Jangka Sorong Digital

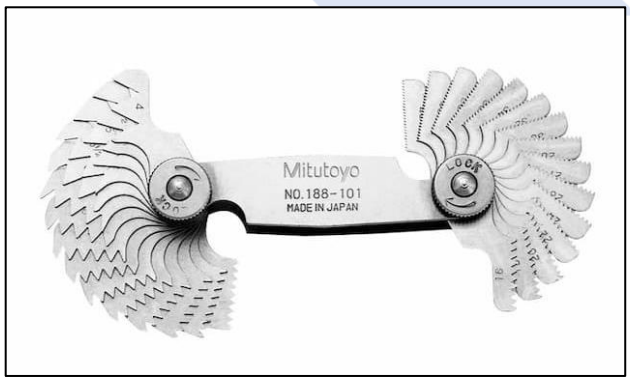
Jangka sorong digital adalah suatu alat ukur yang mampu mengukur diameter benda kecil, baik luar maupun dalam, kedalaman suatu lubang kecil, serta mengukur jarak suatu objek dengan tingkat akurasi dan presisi yang baik. Jangka sorong digital dilengkapi layar LCD yang memudahkan dalam membaca hasil pengukuran dengan ketelitian 0,01 mm. Berikut ditunjukkan jangka sorong digital pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Jangka Sorong Digital (Sumber: mitutoyo.com)

4. Sisir Ulir (*Threads Pitch Gauge*)

Sisir ulir adalah alat yang digunakan untuk mengukur jarak antara titik yang sama pada ulir yang berdekatan pada sekrup dalam satuan inchi atau milimeter. Selain itu, sisir ulir juga dapat digunakan untuk memeriksa jumlah ulir, yaitu ulir per inchi. Sisir ulir ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Sisir Ulir (Sumber: mitutoyo.com)

5. Mur logam

Mur logam adalah komponen pengikat mekanis yang memiliki lubang berulir di tengahnya. Fungsi utamanya adalah untuk dipasangkan dengan baut atau sekrup guna menghubungkan atau mengencangkan bagian-bagian dalam suatu konstruksi. Dalam penelitian ini, mur logam digunakan sebagai master untuk menentukan *go* atau *no go* sebuah ulir. Mur logam ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Gambar 3.7 Mur Logam (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

6. *Software* Autodesk Fusion 360

Fusion 360 merupakan inovasi Autodesk dalam bentuk perangkat lunak yang menggabungkan kemampuan CAD dan CAM melalui sistem berbasis *cloud*. *Software* ini menjadi alat yang *powerfull* bagi para desainer untuk mengeksekusi berbagai proyek permodelan 3D, pengembangan produk, dan pembuatan dokumentasi teknis dengan tingkat efisiensi tinggi. Dilengkapi teknologi modeling parametik dan *direct modelling* yang handal, *software* ini juga menyertakan fitur simulasi komprehensif untuk memastikan kualitas dan performa desain yang optimal. *Software* ini ditunjukkan pada Gambar 3.8.

Gambar 3.8 *Software* Fusion 360 (Sumber: Wikipedia)

7. *Software* Creality Slicer

Creality Slicer adalah perangkat lunak pencetakan 3D yang digunakan untuk menyiapkan model 3D untuk dicetak pada *printer* Creality 3D. *Software* ini digunakan untuk mengatur parameter proses 3D *printing* yang nantinya di *export* menjadi *g-code*. Logo *software* Creality Slicer ditunjukkan pada Gambar 3.9.

Gambar 3.9 *Software* Creality Slicer (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

8. *Software* Minitab 19

Perangkat lunak ini digunakan untuk membuat *Design of Experiment* (DoE), yang melibatkan penentuan parameter atau faktor lain yang mungkin berdampak pada variabel. Selain itu, perangkat lunak ini digunakan untuk menganalisis hasil data yang telah didapatkan. Logo *software* Minitab 19 ditunjukkan pada Gambar 3.10.

Gambar 3.10 *Software* Minitab 19 (Sumber: OS Berkualitas)

3.3.2 Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan yaitu filamen PETG. Filamen PETG adalah varian dari filamen PET, yang umumnya digunakan dalam bahan kemasan seperti botol air. "G" dalam PETG adalah singkatan dari "*glycol*" merupakan bahan kimia yang membantu meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan cetak material. Filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) memiliki ukuran diameter 1,75 mm dan dapat dipanaskan dengan suhu 230-250℃. Filamen dapat dilihat pada Gambar 3.11.

Gambar 3.11 Filamen PETG (Sumber: esun3dstore.com)

3.4 Menentukan Parameter Proses

Parameter proses disesuaikan untuk memastikan bahwa spesimen yang akan dicetak memiliki standar yang konsisten dan karakteristik tersendiri. Pengujian parameter proses yang dilakukan kali ini didasarkan pada penelitian sebelumnya, yang menunjukkan bahwa parameter yang berpengaruh terhadap respon spesimen terhadap hasil cetak adalah *nozzle temperature*, *layer height*, dan *infill overlap percentage*.

3.4.1 *Design of Experiment* (DoE)

Design of Experiment (DoE) adalah metode untuk menganalisis hubungan antara faktor-faktor yang memengaruhi proses dengan hasilnya, sekaligus menentukan jumlah minimal sampel yang diperlukan. Dalam penelitian ini, parameter yang diteliti adalah *nozzle temperature*, *layer height*, dan *infill overlap percentage*.

3.4.2 Penentuan Faktor dan Level Eksperimen

Penentuan faktor dan level eksperimen ditentukan berdasarkan penelitian terdahulu. Dalam hal ini, parameter yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi tiga faktor dan tiga level. Metode Taguchi L_9 digunakan untuk membuat desain yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Proses dan Level Eksperimen yang Diuji

Faktor	Parameter Proses	Level		
		1	2	3
A	*Nozzle Temperature* (°C)	235	240	250
B	*Layer Height* (mm)	0,10	0,15	0,20
C	*Infill Overlap Percentage* (%)	60	64	70

3.4.3 Variabel Respon

Variabel respon adalah parameter yang diukur dalam eksperimen dengan akurasi dimensi sebagai variabel respon dalam penelitian ini.

3.4.4 Pemilihan Matriks Orthogonal

Matriks orthogonal merupakan susunan angka terorganisir secara khusus yang memungkinkan perancangan eksperimen yang efisien dan seimbang. Matriks orthogonal yang digunakan memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih tinggi dari jumlah total parameter proses dan tingkat faktor yang ditentukan, ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Derajat Kebebasan

Parameter Proses	**Jumlah Level (k)**	**μfl=(k-1)**
Nozzle Temperature	3	2
Layer Height	3	2
Infill Overlap Percentage	3	2
Total Derajat Kebebasan		6

Tabel 3.2 menunjukkan bahwa dalam prosedur faktor yang digunakan, diperlukan minimal enam derajat kebebasan untuk parameter dan ini mencakup matriks orthogonal yang akan digunakan dalam analisis. Hasilnya, matriks orthogonal L_9 yang tersedia memenuhi kondisi yang berlaku. Eksperimen dilakukan dengan acak menggunakan kombinasi parameter proses yang memengaruhi desain eksperimen yang sesuai dengan matriks orthogonal dengan tiga kolom dan sembilan baris.

3.5 Desain Taguchi L_9

Desain Taguchi L_9 adalah bagian dari metode Taguchi yang digunakan untuk optimasi proses dan produk. "L_9" mengacu pada matriks orthogonal dengan sembilan percobaan. Ini memungkinkan peneliti untuk menguji hingga tiga faktor pada tiga level yang berbeda dengan jumlah percobaan yang minimal.

3.5.1 Desain Faktorial

Salah satu metode dalam *design of experiment* yang berguna untuk menyelidiki efek dari dua atau lebih faktor pada suatu respon dikenal dengan desain faktorial. *Orthogonal Array* (OA) dan metode Taguchi L_9 dengan tiga faktor dan tiga level digunakan untuk penentuan parameter yang di *input* ke *software* Minitab guna mendapatkan desain faktorial sebagai panduan untuk mencetak spesimen uji. Tabel 3.3 menunjukkan desain faktorial berupa angka dan huruf yang nanti akan diterjemahkan ke dalam variabel proses dan nilai level seperti pada Tabel 3.2.

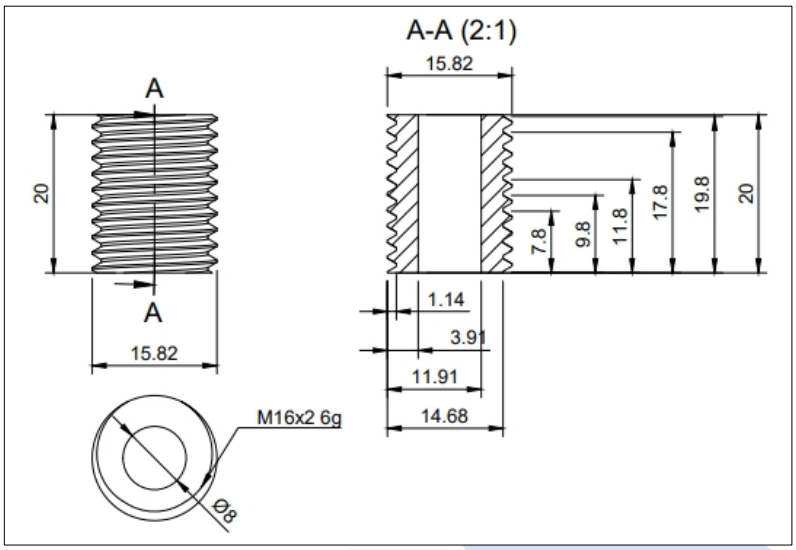
Tabel 3.3 Desain Faktorial

No. Exp.	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Berdasarkan Tabel 3.3 percobaan dilakukan secara acak menggunakan parameter yang telah dikombinasikan dengan berpatokan pada desain eksperimental yang sesuai dengan matriks orthogonal.

3.6 Desain Bentuk Spesimen

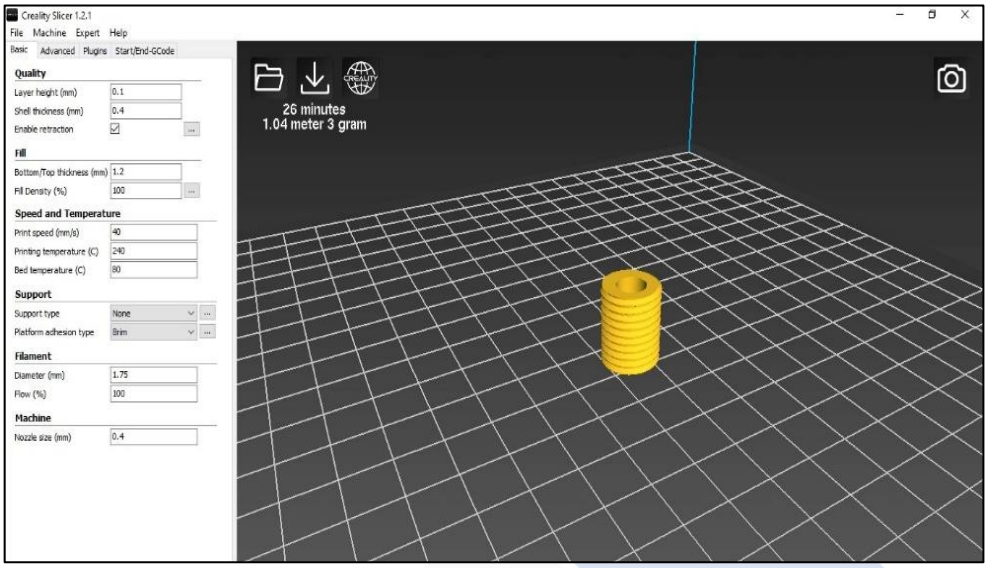
Desain penelitian yang akan dicetak menggunakan 3D *printer* FDM dengan dimensi M16×2 6g dengan tinggi 20 mm dan diameter dalam 8 mm. Desain bentuk spesimen ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Desain Spesimen dengan Autodesk Fusion 360 (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.7 *Slicing File* STL Spesimen

Sebelum melakukan pencetakan spesimen uji, desain spesimen terlebih dahulu dibuat pada *software* Autodesk Fusion 360. Desain berbentuk ulir M16×2 6g dengan diameter dalam 8 mm dan tinggi 20 mm. Desain yang sudah dibuat akan dikonversi menjadi format STL (*stl) untuk dilakukan proses *slicing* pada *software* Creality Slicer. *Slicing* yang dilakukan pada *software* Creality Slicer dimaksudkan untuk menyesuaikan parameter proses dan level yang telah diatur sebelumnya sehingga didapatkan *g-code* yang ditampilkan pada Gambar 3.13. setelah mendapatkan *g-code*, kemudian akan ditransfer ke dalam *micro sd card.*

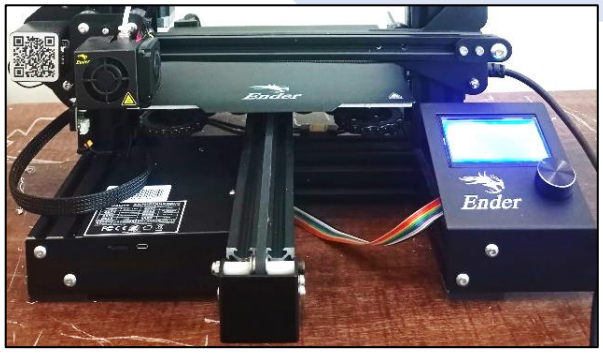


Gambar 3. 13 *Slicing* pada Creality Slicer (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.8 Proses Pencetakan Spesimen

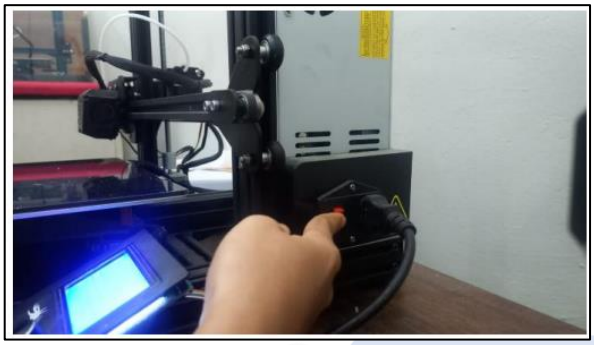
Pencetakan spesimen uji dilakukan secara *manufacture additive* dengan membaca dan mengikuti *g-code* yang telah disiapkan. Proses pencetakan dilakukan dengan menggunakan 3D *printer* FDM Creality Slicer Ender 3 Pro didasarkan pada *g-code* yang di *input* pada *memory card* ke 3D *printer*. Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pencetakan dengan 3D *printer* adalah sebagai berikut.

1. Masukkan *memory card* yang sudah di *input g-code* ke dalam 3D *printer*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Input *Memory Card* ke Mesin (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2. Tekan tombol ON pada mesin untuk menyalakan 3D *printer*, seperti pada Gambar 3.15.

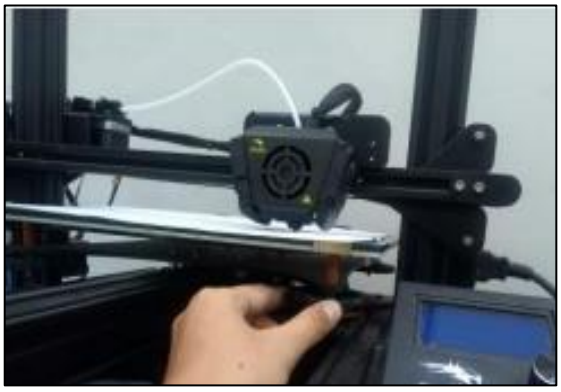


Gambar 3.15 Menyalakan 3D *Printer* (Sumber: Rosalina, 2024)

3. Pasang filamen dengan memasukkan ujung filamen ke lubang jalur tubing yang telah disediakan hingga filamen memenuhi jalur tubing penghubung fialmen dengan *nozzle*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16

Gambar 3.16 Memasang Filamen (Sumber: Rosalina, 2024)

4. *Setting bed* mesin dengan mengatur *nozzle* ke *auto home* agar *bed* dapat dikalibrasikan ke titik nol dan permukaan meja yang datar. Jarak *nozzle* dan *bed* dapat diatur ketinggiannya pada saat kalibrasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Kalibrasi *Bed* Mesin (Sumber: Rosalina, 2024)

5. Sebelum melakukan pencetakan, terlebih dahulu mengatur suhu *bed* mesin sesuai dengan yang ditentukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.18.

Gambar 3.18 Mengatur Suhu Bed (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

6. Setelah semuanya siap, langkah terakhir adalah melakukan pencetakan spesimen. Spesimen dicetak berdasarkan urutan spesimen yang sudah ditentukan, proses pencetakan ditunjukkan pada Gambar 3.19.

Gambar 3.19 Proses Pencetakan Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

7. Seluruh spesimen dicetak sesuai dengan urutan eksperimen. Hasil cetak spesimen ditunjukkan pada Gambar 3.20.

Gambar 3.20 Hasil Cetak Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.9 Replikasi Spesimen

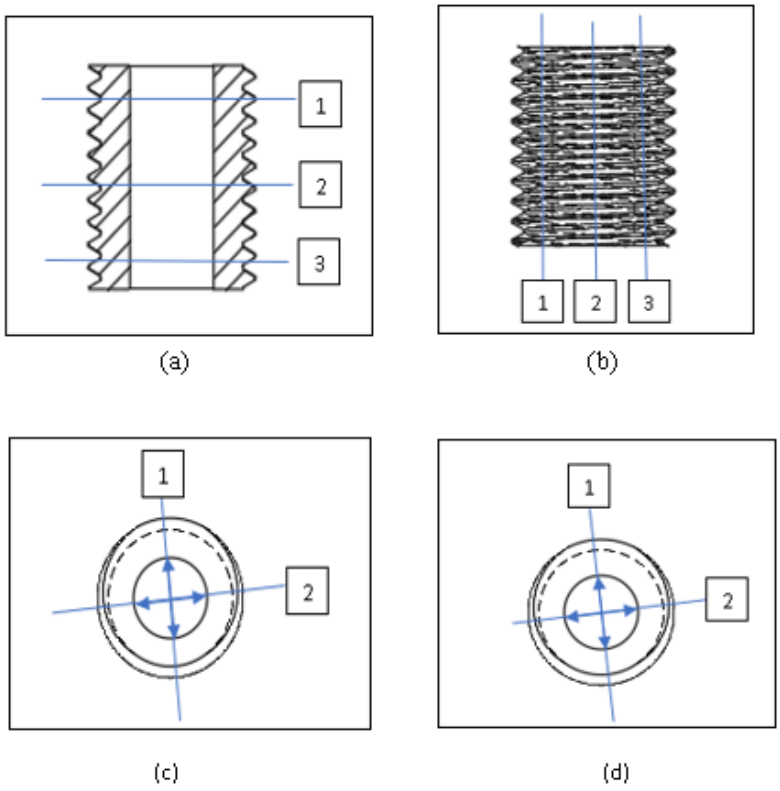
Untuk memverifikasi bahwa penelitian yang dilakukan memberikan hasil yang dapat diandalkan, diperlukan replikasi dari benda uji. Spesimen uji yang dicetak nantinya berupa sembilan sampel dan direplikasi sebanyak dua kali. Oleh

karena itu, ada total 27 spesimen uji yang diketahui pada saat tulisan ini dibuat. Replikasi spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.21.

Gambar 3.21 Replikasi Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.10 Pengujian Akurasi Dimensi

Proses uji akurasi dimensi dapat dilakukan setelah semua spesimen uji telah dicetak. Analisis terhadap spesimen hasil 3D *printing* ini dilakukan untuk mengetahui keakuratan dimensi produk. Pengujian akurasi dimensi pada spesimen dilakukan menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,01 mm. Dimensi yang diukur adalah diameter luar, diameter dalam bagian atas, diameter dalam bagian bawah, dan tinggi spesimen. Posisi pengujian didasarkan pada tiga titik yang berbeda untuk diameter luar dan tinggi spesimen, serta dua titik yang berbeda untuk diameter dalam bagian atas dan diameter dalam bagian bawah. Pengujian ulir nantinya akan menggunakan mur logam untuk menentukan apakah spesimen yang ditentukan "*go*" atau "*no go*" dalam kaitannya dengan hasil ulir. Berikut ditunjukkan titik-titik pengujian yang akan dilakukan ke spesimen, seperti pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Titik Uji Akurasi Dimensi Spesimen (a) Diameter Luar, (b) Tinggi, (c) Diameter Dalam Bagian Atas, dan (d) Diameter Dalam Bagian Bawah (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.10.1 Pengujian Akurasi Dimensi pada Diameter Luar Spesimen

Untuk memperoleh data dimensi yang akurat dari setiap spesimen, perlu dilakukan serangkaian pengukuran pada bagian diameter luarnya. Proses ini mengikuti prosedur pengujian tertentu yang akan dijelaskan melalui tahapan-tahapan berikut.

1. Kalibrasikan jangka sorong digital terlebih dahulu agar hasil lebih akurat. Jangka sorong digital yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm.
2. Pengukuran diameter luar spesimen dilakukan pada tiga titik berbeda. Tiap titik ditandai dengan kertas agar tidak tertukar. Proses pengukuran spesimen ditunjukkan pada Gambar 3.23.
3. Catat hasil pengukuran spesimen sesuai dengan tabel yang dibutuhkan. Pengukuran yang sama dilakukan terhadap tiap spesimen.

Gambar 3.23 Pengukuran Diameter Luar Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.10.2 Pengujian Akurasi Dimensi pada Tinggi Spesimen

Untuk memperoleh data dimensi yang akurat dari setiap spesimen, perlu dilakukan serangkaian pengukuran pada bagian tinggi spesimen. Proses ini mengikuti prosedur pengujian tertentu yang akan dijelaskan melalui tahapan-tahapan berikut.

1. Kalibrasikan jangka sorong digital terlebih dahulu agar hasil lebih akurat. Jangka sorong digital yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm.
2. Pengukuran tinggi spesimen dilakukan pada tiga titik berbeda. Tiap titik ditandai dengan spidol agar tidak tertukar. Proses pengukuran spesimen ditunjukkan pada Gambar 3.24.
3. Catat hasil pengukuran spesimen sesuai dengan tabel yang dibutuhkan. Pengukuran yang sama dilakukan terhadap tiap spesimen.

Gambar 3.24 Pengukuran Tinggi Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.10.3 Pengujian Akurasi Dimensi pada Diameter Dalam Bagian Atas dan Bawah Spesimen

Untuk memperoleh data dimensi yang akurat dari setiap spesimen, perlu dilakukan serangkaian pengukuran pada bagian tinggi spesimen. Proses ini mengikuti prosedur pengujian tertentu yang akan dijelaskan melalui tahapan-tahapan berikut.

1. Kalibrasikan jangka sorong digital terlebih dahulu agar hasil lebih akurat. Jangka sorong digital yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm.
2. Pengukuran diameter dalam bagian atas dan bawah spesimen dilakukan pada dua titik berbeda. Tiap titik ditandai dengan spidol agar tidak tertukar. Proses pengukuran spesimen ditunjukkan pada Gambar 3.25.
3. Catat hasil pengukuran spesimen sesuai dengan tabel yang dibutuhkan. Pengukuran yang sama dilakukan terhadap tiap spesimen.

Gambar 3.25 Pengukuran Diameter Dalam Bagian Atas dan Bawah Spesimen
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.10.4 Pengujian Akurasi Dimensi Ulir

Untuk memperoleh data dimensi ulir yang akurat dari setiap spesimen, perlu dilakukan serangkaian pengukuran pada bagian ulir spesimen. Proses ini mengikuti prosedur pengujian tertentu yang akan dijelaskan melalui tahapan-tahapan berikut.

1. Siapkan mur logam dengan ukuran yang sama dengan spesimen yang akan diuji. Untuk mur logam yang akurat dapat dibeli sepasang dengan bautnya agar pengujian lebih akurat.
2. Spesimen hasil cetak 3D *printing* kemudian dimasukkan ke dalam mur logam. Jika spesimen dapat masuk dan sesuai maka hasil cetak tertentu akurat. Sebaliknya spesimen yang tidak dapat masuk ke mur logam maka hasil cetak 3D tidak sesuai. Pengujian "*go*" atau "*no go*" ditunjukkan pada Gambar 3.26.
3. Catat hasil pengukuran spesimen sesuai dengan tabel yang dibutuhkan. Pengukuran yang sama dilakukan terhadap tiap spesimen.

Gambar 3.26 Pengujian *GO* atau *NO GO* Spesimen (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

BAB IV
PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

Pengumpulan data hasil pengujian dilakukan secara sistematis setelah seluruh rangkaian pengujian spesimen selesai dilaksanakan. Hasil dari masing-masing pengujian akan dicantumkan dalam bentuk tabel yang terstruktur untuk memudahkan analisis dan interpretasi data. Setiap parameter pengujian dicatat dengan teliti meliputi nilai-nilai pengukuran. Berikut adalah pengumpulan data hasil pengujian pada spesimen yang telah dilakukan di laboratorium dengan menggunakan metode dan peralatan yang telah dikalibrasi ditampilkan pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, Tabel 4.3, Tabel 4.4, dan Tabel 4.5.

Tabel 4.1 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Diameter Luar Spesimen

Diameter Luar Spesimen				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen (mm)**	**Replikasi 1 Spesimen (mm)**	**Replikasi 2 Spesimen (mm)**	**Rata-rata (mm)**
1	15,70	15,70	15,73	15,71
2	15,77	15,78	15,74	15,76
3	15,78	15,81	15,84	15,81
4	15,62	15,71	15,71	15,68
5	15,83	15,82	15,82	15,82
6	15,80	15,83	15,82	15,81
7	15,74	15,72	15,82	15,76
8	15,77	15,84	15,84	15,81
9	15,90	15,87	15,85	15,87

Berdasarkan Tabel 4.1, data hasil uji akurasi dimensi untuk diameter luar spesimen dengan nilai yang optimum terdapat pada spesimen eksperimen nomor 5. Pada spesimen eksperimen nomor 5 memiliki desain faktorial L_9, yaitu *nozzle temperature* (240℃), *layer height* (0,15 mm), dan *infill overlap percentage* (70%) dengan nilai uji rata-rata sebesar 15,82 mm.

Tabel 4.2 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Tinggi Spesimen

Tinggi Spesimen				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen (mm)**	**Replikasi 1 Spesimen (mm)**	**Replikasi 2 Spesimen (mm)**	**Rata-rata (mm)**
1	20,11	20,12	20,10	20,11
2	20,04	20,05	20,01	20,03
3	20,01	20,01	20,06	20,03
4	19,97	20,03	20,02	20,01
5	20,04	20,01	20,08	20,04
6	20,10	20,08	20,06	20,08
7	20,07	20,16	20,11	20,11
8	20,26	20,21	20,24	20,24
9	20,19	20,16	20,21	20,19

Berdasarkan Tabel 4.2, data hasil uji eksperimen untuk tinggi spesimen dengan nilai paling optimum yaitu spesimen nomor 4 dengan nilai uji rata-rata sebesar 20,00 mm. Desain faktorial spesimen eksperimen nomor 4 yaitu *nozzle temperature* (240℃), *layer height* (0,10 mm), dan *infill overlap percentage* (65%).

Tabel 4.3 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen

Diameter Dalam Bagian Atas				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen (mm)**	**Replikasi 1 Spesimen (mm)**	**Replikasi 2 Spesimen (mm)**	**Rata-rata (mm)**
1	7,62	7,56	7,61	7,60
2	7,56	7,65	7,66	7,62
3	7,53	7,54	7,59	7,55
4	7,50	7,60	7,66	7,58
5	7,60	7,62	7,67	7,63
6	7,71	7,69	7,65	7,68
7	7,61	7,73	7,80	7,71
8	7,50	7,68	7,51	7,56
9	7,65	7,66	7,87	7,73

Pada data hasil eksperimen yang tertera di Tabel 4.3 didapatkan nilai akurasi dimensi untuk diameter dalam bagian atas yang paling mendekati nilai desain yaitu eksperimen nomor 9 dengan nilai 7,73 dari 8 mm. Spesimen eksperimen nomor 9 memiliki desain faktorial yaitu *nozzle temperature* (250°C), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (65%).

Tabel 4.4 Data Hasil Uji Akurasi Dimensi untuk Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Diameter Dalam Bagian Bawah				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen (mm)**	**Replikasi 1 Spesimen (mm)**	**Replikasi 2 Spesimen (mm)**	**Rata-rata (mm)**
1	7,59	7,51	7,67	7,59
2	7,23	7,51	7,64	7,46
3	7,54	7,57	7,44	7,51

Diameter Dalam Bagian Bawah				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen (mm)**	**Replikasi 1 Spesimen (mm)**	**Replikasi 2 Spesimen (mm)**	**Rata-rata (mm)**
4	7,59	7,62	7,59	7,60
5	7,61	7,49	7,58	7,56
6	7,65	7,60	7,63	7,63
7	7,44	7,69	7,62	7,58
8	7,58	7,65	7,68	7,63
9	7,66	7,51	7,57	7,58

Berdasarkan Tabel 4.4, nilai akurasi dimensi untuk diameter dalam bagian bawah dengan nilai yang paling mendekati nilai desain yaitu spesimen eksperimen nomor 6 dengan desain faktorial yaitu *nozzle temperature* (240°C), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (65%). Nilai rata-rata hasil uji diameter dalam bagian bawah pada spesimen eksperimen nomor 6 sebesar 7,64 mm.

Data pengujian mur logam sebagai pengganti *ring gauge go* dan *no go* pada ulir. *Go* dan *no go* didefinisikan ke dalam angka berupa 2 dan 1. Data pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data Hasil Uji *GO* dan *NO GO* Spesimen

Pengujian *GO* atau *NO GO*				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen**	**Replikasi 1 Spesimen**	**Replikasi 2 Spesimen**	**Rata-rata**
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	2	1	1,33
4	1	1	1	1
5	1	2	2	1,66
6	1	1	2	1,33

Pengujian *GO* atau *NO GO*				
No. Exp.	**Data Awal Spesimen**	**Replikasi 1 Spesimen**	**Replikasi 2 Spesimen**	**Rata-rata**
7	1	1	2	1,33
8	1	2	1	1,33
9	1	1	1	1

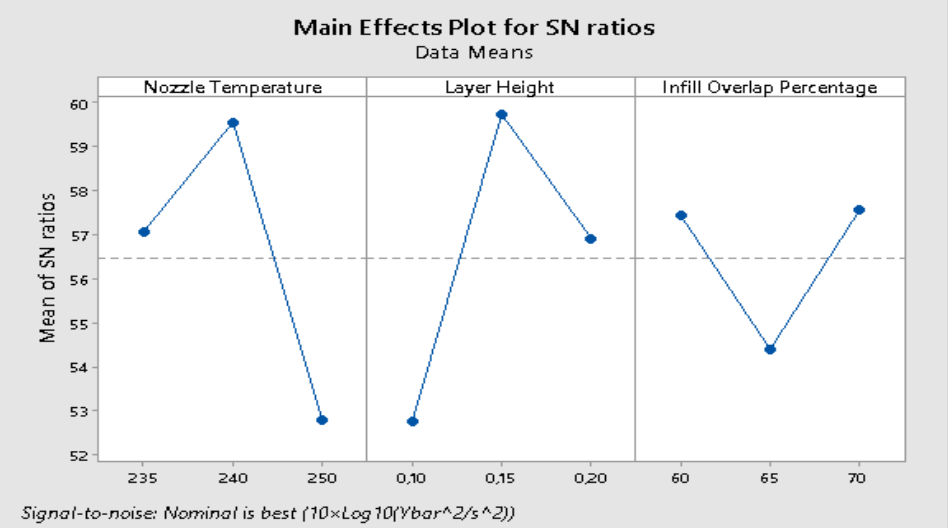
Berdasarkan Tabel 4.5, data hasil uji *go* dan *no go* pada spesimen dengan nilai yang optimum terdapat pada spesimen eksperimen nomor 5. Pada spesimen eksperimen nomor 5 memiliki desain faktorial L_9 yaitu *nozzle temperature* (240°C), *layer height* (0,15 mm), dan *infill overlap percentage* (70%) dengan nilai uji rata-rata sebesar 1,66.

4.2 Pengolahan Data Hasil Eksperimen

Setelah pengumpulan data selesai, hasil eksperimen diperoleh. Hasil tersebut kemudian akan dianalisis untuk menentukan pengaturan parameter proses yang terbaik dan pengaruhnya terhadap akurasi dimensi yang diukur menggunakan *software* analisis berdasarkan nilai pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, Tabel 4.3, Tabel 4.4, dan Tabel 4.5. Data-data tersebut akan dimasukkan ke dalam *software* analisis Minitab untuk mendapatkan respon S/N *Ratio* dengan label kualitas "*Nominal is Best*". Hal ini dikarenakan semakin nilai yang diperoleh mendekati nilai yang ditentukan, menandakan akurasi dimensi semakin baik yang tercermin dari performa objek 3D hasil cetak.

4.2.1 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Luar Spesimen

Hasil respon S/N *ratio* dari *software* analisis Minitab berupa grafik ditunjukkan pada Gambar 4.1, serta nilai hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.6.



Gambar 4.1 Grafik S/N *Ratio* Diameter Luar Spesimen

Berdasarkan Gambar 4.1, parameter proses yang menghasilkan akurasi dimensi terbaik untuk diameter luar spesimen adalah *nozzle temperature* (250°C), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (70%).

Tabel 4.6 Hasil S/N *Ratio* Diameter Luar Spesimen

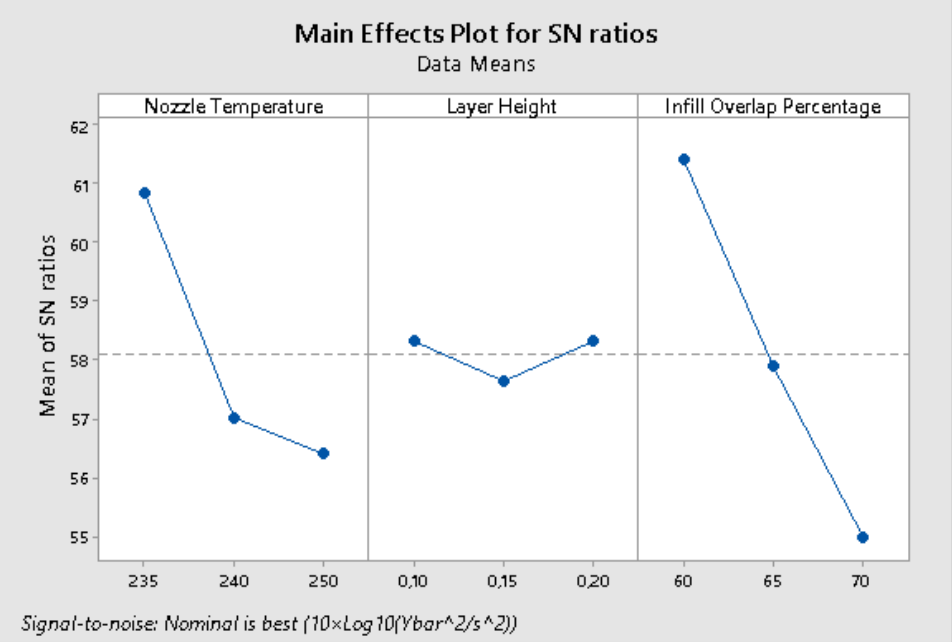
Response Tabel for S/N Ratio			
Level	***Nozzle Temperature* (°C)**	***Layer Height* (mm)**	***Infill Overlap Percentage* (%)**
1	57,06	52,74	57,43
2	59,55	59,73	54,39
3	52,77	56,91	57,56
Delta	6,78	6,99	3,17
Rank	**2**	**1**	**3**

Tabel 4.6 menampilkan hasil S/N *ratio* yang menunjukkan bahwa *layer height* memiliki pengaruh terbesar pada keakuratan dimensi diameter luar

spesimen. Urutan parameter berdasarkan besarnya pengaruh adalah *layer height*, *nozzle temperature*, dan *infill overlap percentage*.

4.2.2 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Tinggi Spesimen

Hasil respon S/N *ratio* dari *software* analisis Minitab berupa grafik ditunjukkan pada Gambar 4.2, serta nilai hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.7.



Gambar 4.2 Grafik S/N *Ratio* Tinggi Spesimen

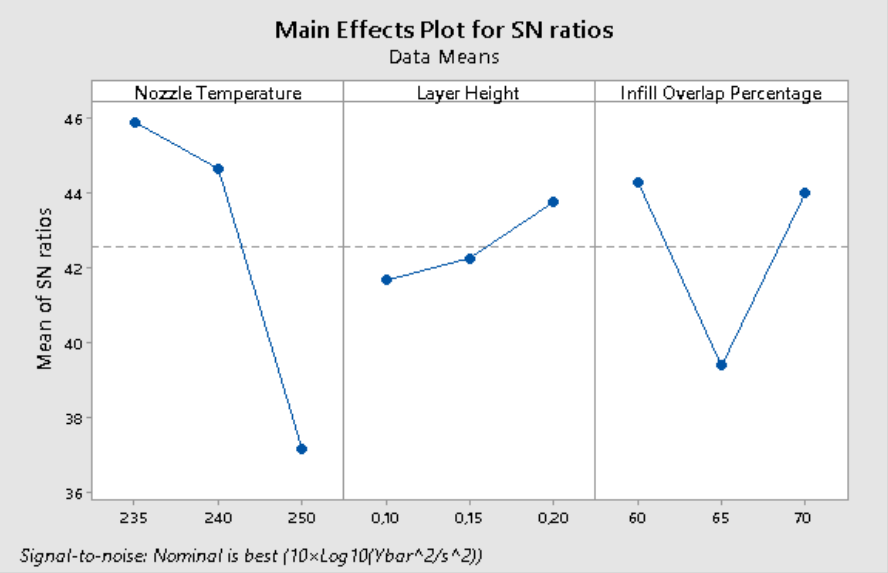
Tabel 4.7 Hasil S/N *Ratio* Tinggi Spesimen

Response Tabel for S/N Ratio			
Level	***Nozzle Temperature* (℃)**	***Layer Height* (mm)**	***Infill Overlap Percentage* (%)**
1	60,85	58,31	61,40
2	57,01	57,63	57,88
3	56,39	58,31	54,98
Delta	4,46	0,68	6,42
Rank	**2**	**3**	**1**

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Tabel 4.7, menunjukkan bahwa *infill overlap percentage* memiliki pengaruh paling besar terhadap tinggi spesimen. Selain itu, parameter proses dengan faktor dan level yang optimal berturut-turut yaitu *nozzle temperature* (250°C), *infill overlap percentage* (60%), dan *layer height* (0,10 mm).

4.2.3 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen

Hasil respon S/N *ratio* dari *software* analisis Minitab berupa grafik ditunjukkan pada Gambar 4.3, serta nilai hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.8.



Gambar 4.3 Grafik S/N Ratio Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen

Berdasarkan Gambar 4.3, menunjukkan parameter proses optimal untuk diameter dalam bagian atas spesimen adalah *nozzle temperature* (235°C), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (60%).

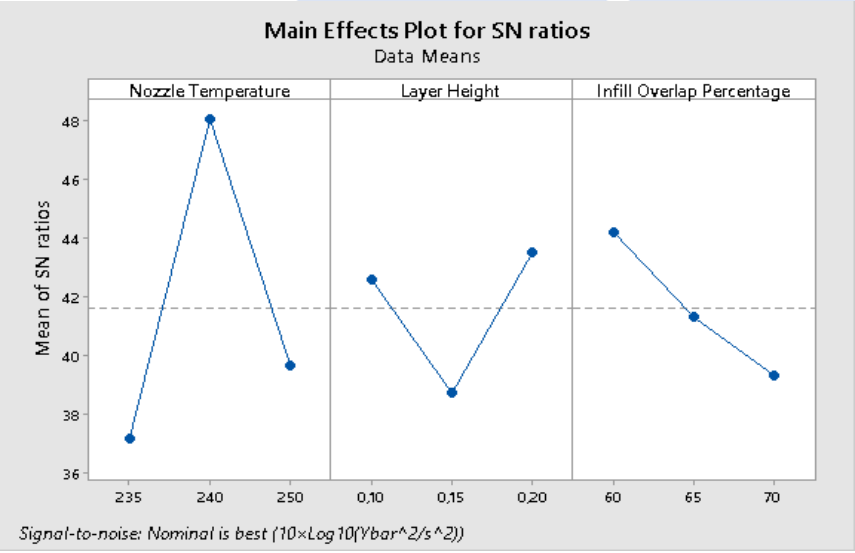
Tabel 4.8 Hasil S/N *Ratio* Diameter Dalam Bagian Atas Spesimen

Response Tabel for S/N Ratio			
Level	***Nozzle Temperature* (℃)**	***Layer Height* (mm)**	***Infill Overlap Percentage* (%)**
1	45,90	41,67	44,32
2	44,66	42,27	39,38
3	37,15	43,77	44,01
Delta	8,76	2,10	4,94
Rank	**1**	**3**	**2**

Tabel 4.8 di atas menunjukkan bahwa parameter yang paling berpengaruh terhadap diameter dalam bagian atas spesimen adalah *nozzle temperature*. Secara berturut-turut pengaruh parameter proses, yaitu *nozzle temperature*, *infill overlap percentage*, dan *layer height*.

4.2.4 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Hasil respon S/N *ratio* dari *software* analisis Minitab berupa grafik ditunjukkan pada Gambar 4.4, serta nilai hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.9.



Gambar 4.4 Grafik S/N *Ratio* Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Berdasarkan Gambar 4.4, parameter proses yang optimal terhadap diameter dalam bagian bawah adalah *nozzle temperature* (240℃), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (60%).

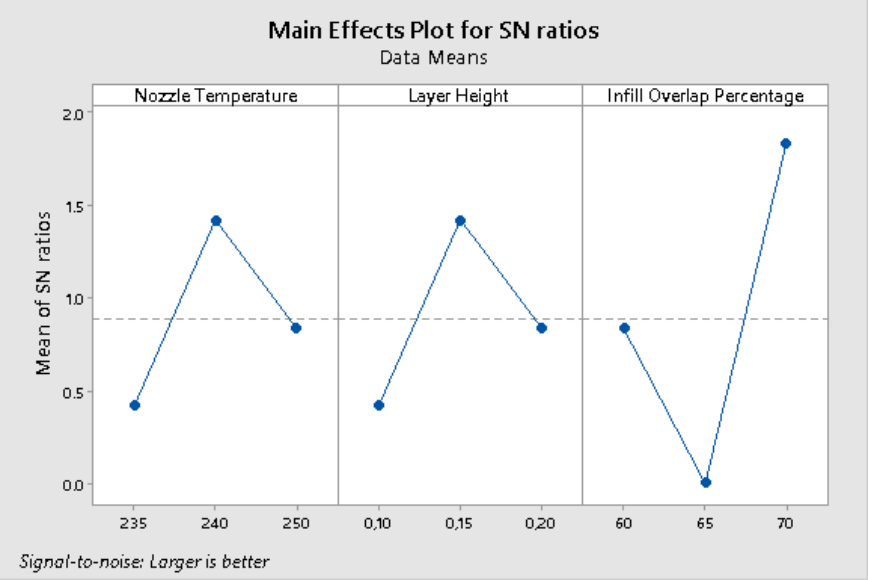
Tabel 4.9 Hasil S/N *Ratio* Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Response Tabel for S/N Ratio			
Level	***Nozzle Temperature* (℃)**	***Layer Height* (mm)**	***Infill Overlap Percentage* (%)**
1	37.14	42,59	44,21
2	48,05	38,71	41,30
3	39,63	43,51	39,30
Delta	10,90	4,79	4,91
Rank	**1**	**3**	**2**

Tabel 4.9 mengindikasikan bahwa *nozzle temperature* memiliki pengaruh terbesar pada keakuratan dimensi diameter dalam bagian bawah spesimen. Urutan pengaruh parameternya adalah *nozzle temperature*, *infill overlap percentage*, dan *layer height*.

4.2.5 S/N Ratio "Nominal is Best" Go dan No Go

Hasil respon Hasil respon S/N *ratio* dari *software* analisis Minitab berupa grafik ditunjukkan pada Gambar 4.5, serta nilai hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.10.



Gambar 4.5 Grafik S/N *Ratio Go* dan *No Go*

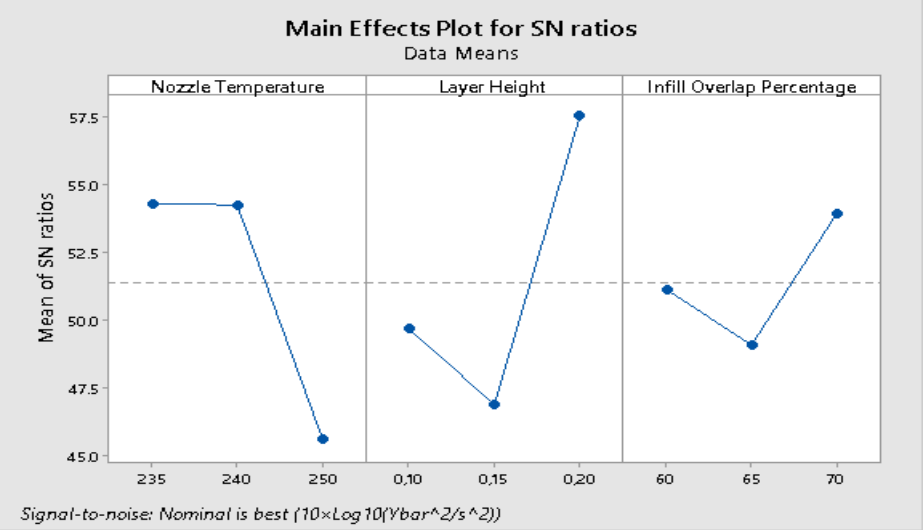
Tabel 4.10 Hasil S/N *Ratio Go* dan *No Go*

Response Tabel for S/N Ratio			
Level	***Nozzle Temperature* (°C)**	***Layer Height* (mm)**	***Infill Overlap Percentage* (%)**
1	37.14	42,59	44,21
2	48,05	38,71	41,30
3	39,63	43,51	39,30
Delta	10,90	4,79	4,91
Rank	**1**	**3**	**2**

Berdasarkan Tabel 4.10, menunjukkan bahwa *infill overlap percentage* memiliki pengaruh paling besar terhadap *go* dan *no go* spesimen. Selain itu, parameter proses dengan faktor dan level yang optimal berturut-turut yaitu *infill overlap percentage* (70%), *nozzle temperature* (240°C), dan *layer height* (0,15 mm).

4.2.6 S/N *Ratio* "*Nominal is Best*" Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Untuk hasil respon S/N *ratio "Nominal is Best"* diameter luar, tinggi, diameter dalam bagian atas, dan diameter dalam bagian bawah spesimen dari *software* analisis Minitab ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan Tabel 4.11.



Gambar 4.6 Grafik S/N *Ratio* Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Tabel 4.11 Hasil S/N *Ratio* Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Response Tabel for S/N Ratio			
Level	***Nozzle Temperature* (°C)**	***Layer Height* (mm)**	***Infill Overlap Percentage* (%)**
1	54,28	49,69	51,12
2	54,24	46,88	49,08
3	45,60	57,57	53,93
Delta	8,68	10,69	4,85
Rank	**2**	**1**	**3**

Tabel 4.11 menunjukkan *nozzle temperature* memiliki pengaruh terbesar pada keakuratan berbagai dimensi spesimen. Urutan pengaruh parameter prosesnya adalah *layer height*, *nozzle temperature*, dan *infill overlap percentage*.

4.3 Uji Konfirmasi

Validasi hasil penelitian dilakukan melalui uji konfirmasi. Proses ini melibatkan perbandingan antara rata-rata akurasi dimensi awal dan rata-rata akurasi dimensi yang diperoleh dari uji konfirmasi. Dimensi yang diukur mencakup diameter, tinggi, diameter dalam bagian atas, diameter dalam bagian bawah, serta kombinasi perhitungan diameter luar, tinggi, diameter dalam bagian atas, dan diameter dalam bagian bawah. Dalam pelaksanaan uji konfirmasi, digunakan kombinasi parameter yang telah dioptimalkan berdasarkan hasil pengukuran sebelumnya. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa *setting* parameter yang dianggap optimal benar-benar menghasilkan peningkatan akurasi dimensi yang konsisten dan dapat direproduksi.

Tabel 4.12 Hasil Uji Konfimasi Diameter Luar Spesimen

Diameter Luar			
Spesimen 1 (mm)	**Spesimen 2 (mm)**	**Spesimen 3 (mm)**	**Spesimen 4 (mm)**
15,81	15,82	15,81	15,81

Tabel 4.12 menampilkan hasil uji konfirmasi diameter luar ulir spesimen menggunakan parameter optimal, yaitu *layer height* (0,20 mm), *nozzle temperature* (250℃), dan *infill overlap percentage* (70%) sesuai dengan Gambar 4.2.

Tabel 4.13 Hasil Uji Konfirmasi Tinggi Spesimen

Tinggi			
Spesimen 1 (mm)	**Spesimen 2 (mm)**	**Spesimen 3 (mm)**	**Spesimen 4 (mm)**
20,02	20,01	20,02	20,01

Tabel 4.13 tersebut menampilkan hasil verifikasi tinggi spesimen menggunakan kombinasi parameter proses optimal, yaitu *nozzle temperature* (250℃), *infill overlap percentage* (60%), dan *layer height* (0,15 mm). Parameter-parameter ini dipilih berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 4.3

Tabel 4.14 Hasil Uji Konfimasi Diameter Dalam Bagian Atas

Diameter Dalam Bagian Atas			
Spesimen 1 (mm)	**Spesimen 2 (mm)**	**Spesimen 3 (mm)**	**Spesimen 4 (mm)**
7,87	7,86	7,90	7,87

Hasil verifikasi diameter dalam bagian atas spesimen ditampilkan dalam Tabel 4.14 menggunakan parameter optimal berdasarkan Gambar 4.4, yaitu *nozzle temperature* (250℃), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (65%).

Tabel 4.15 Hasil Uji Konfirmasi Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Diameter Dalam Bagian Bawah			
Spesimen 1 (mm)	**Spesimen 2 (mm)**	**Spesimen 3 (mm)**	**Spesimen 4 (mm)**
7,78	7,84	7,80	7,80

Tabel 4.15 memperlihatkan hasil verifikasi diameter dalam bagian bawah spesimen yang menggunakan parameter optimal dari Gambar 4.5 dengan *nozzle temperature* (250℃), *layer height* (0,10 mm), dan *infill overlap percentage* (60%).

Tabel 4.16 Hasil Kombinasi Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah Spesimen

Diameter Dalam Bagian Bawah			
Spesimen 1 (mm)	**Spesimen 2 (mm)**	**Spesimen 3 (mm)**	**Spesimen 4 (mm)**
14,09	14,16	14,23	14,16

Tabel 4.16 menampilkan hasil verifikasi kombinasi diameter luar, tinggi, diameter dalam bagian atas, dan diameter dalam bagian bawah dengan parameter optimal dari Gambar 4.6, yaitu *nozzle temperature* (250℃), *layer height* (0,20 mm), dan *infill overlap percentage* (60%).

4.4 Analisa Hasil

Hasil analisis data eksperimen telah menghasilkan nilai-nilai optimal untuk parameter proses yang memengaruhi akurasi dimensi. Dimensi yang diukur meliputi diameter luar, tinggi, diameter dalam bagian atas, diameter dalam bagian bawah, serta kombinasi diameter luar, tinggi, diameter dalam bagian atas, dan diameter dalam bagian bawah spesimen. Selanjutnya, uji konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi parameter proses optimal ini. Temuan dari kedua tahap penelitian ini optimasi parameter dan uji konfirmasi disajikan secara komprehensif dalam tabel-tabel berikut.

Tabel 4.17 Parameter Proses Optimal Diameter Luar

Parameter Proses	Level	Hasil Uji (mm)
Nozzle Temperature (℃)	250	15,81
Layer height (mm)	0,20	
Infill Overlap Percentage (%)	70	

Tabel 4.18 Parameter Proses Optimal Tinggi Spesimen

Parameter Proses	Level	Hasil Uji (mm)
Nozzle Temperature (℃)	250	20,01
Layer height (mm)	0,15	
Infill Overlap Percentage (%)	60	

Tabel 4.19 Parameter Proses Optimal Diameter Dalam Bagian Atas

Parameter Proses	Level	Hasil Uji (mm)
Nozzle Temperature (℃)	250	7,87
Layer height (mm)	0,20	
Infill Overlap Percentage (%)	65	

Tabel 4.20 Parameter Proses Optimal Diameter Dalam Bagian Bawah

Parameter Proses	Level	Hasil Uji (mm)
Nozzle Temperature (℃)	250	7,80
Layer height (mm)	0,10	
Infill Overlap Percentage (%)	60	

Tabel 4.21 Parameter Proses Optimal Kombinasi Diameter Luar, Tinggi, Diameter Dalam Bagian Atas, dan Diameter Dalam Bagian Bawah

Parameter Proses	Level	Hasil Uji (mm)
Nozzle Temperature (℃)	250	14,16
Layer height (mm)	0,20	
Infill Overlap Percentage (%)	60	

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian optimasi yang dilakukan menggunakan metodologi Taguchi L_9 telah mengidentifikasi sejumlah parameter yang berperan penting dalam menentukan akurasi dimensi produk ulir yang dicetak dengan material PETG. Hasil analisis menunjukkan bahwah terdapat variabel kunci yang memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik akhir produk dari segi akurasi dimensinya. Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Hasil pengujian eksperimen menggunakan filamen PETG didapatkanlah parameter proses 3D *printing* yang paling optimal terhadap keakuratan dimensi pada ulir luar, yaitu *nozzle temperature*, *infill overlap percentage*, dan *layer height*.
2. Parameter proses 3D *printing* yang paling berpengaruh terhadap keakuratan dimensi untuk hasil cetak 3D *printing* pada ulir luar menggunakan filamen PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) adalah *nozzle temperature*. Parameter proses yang paling optimal untuk keakuratan dimensi diameter luar terdapat pada spesimen dengan faktor dan levelnya, yaitu *layer height* (0,20 mm), *nozzle temperature* (250℃), dan *infill overlap percentage* (70%) dengan nilai uji rata-rata 15,81 mm. Parameter proses yang paling optimal untuk keakuratan dimensi tinggi terdapat pada spesimen dengan faktor dan levelnya, yaitu *nozzle temperature* (250), *infill overlap percentage* (60%), dan *layer height* (0,15 mm) dengan nilai uji rata-rata 20,01 mm.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian tentang "Optimasi Parameter Proses 3D *Printing* terhadap Akurasi Dimensi Filamen PETG Pada Ulir Luar", terdapat beberapa rekomendasi saran yang dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kualitas penelitian di masa depan. Saran-saran ini bertujuan untuk

menyempurnakan baik metodologi maupun hasil akhir yang diperoleh. Berikut beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya;

1. Dalam rangka pengembangan penelitian lebih lanjut, disarankan untuk memperluas cakupan parameter proses yang diteliti. Beberapa variabel tambahan seperti *print speed*, *infill pattern*, serta parameter lainnya. Tujuan dari eksplorasi ini untuk mengidentifikasi pengaturan yang paling optimal dan mengetahui bagaimana variabel parameter tersebut memengaruhi kualitas hasil cetak 3D *printing* khususnya ulir luar.
2. Saat proses pencetakan dilakukan perhatikan bagian awal saat filamen keluar untuk meminimalisir filamen tidak menempel pada *bed* 3D *printer*.
3. Menggunakan *software slicing* yang sesuai dengan 3D *printer* yang digunakan agar proses pencetakan dapat berjalan dan mencetak objek sesuai dengan desain yang dibuat.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Fadhil, Hasdiansyah dan A. Anggy, "Optimasi Parameter Produk 3D Printing Terhadap Kekuatan Bending Dengan Menggunakan Filamen Nylon," *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan,* vol. 1 No. 1, pp. 1-8.

[2] Pristiansyah, Hasdiansyah dan Sugiyarto, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing FDM Terhadap Akurasi Dimensi Menggunakan Filamen Efflex," *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur,* vol. 11 No. 01, pp. 33-40, 2019.

[3] N. Ranjan, "Dimensional and Roughness Analysis of ABS polymer-based 3D Printed Nuts and Bolt," *Materialstoday: Proceedings,* vol. 48, pp. 1604-1608, 2022.

[4] S. A. Tronvoll, C. W. Elverum dan T. Welo, "Dimensional Accuracy of Threads Manufactured by Fused Deposition Modelling," *Procedia Manufacturing,* vol. 26, pp. 763-773, 2018.

[5] M. B. Wicaksono dan F. K. A. Nugraha, "Optimization of 3D Printing Parameters Using the Taghuci Method to Improve Dimensional Precission," *Jurnal Teknologi,* vol. 12 No. 2, pp. 70-75, 2022.

[6] M. Lestari, Subkhan dan Pristiansyah, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Akurasi Dimensi Filamen PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)," *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan,* vol. 2 No. 01, no. https://snitt.polman-babel.ac.id/index.php/snitt/issue/view/3, pp. 361-367, 2022.

[7] C. Mawardi, Pengantar 3D Printing, vol. 1, 2020.

[8] H. Hasdiansyah, R. I. Yaqin, P. Pristiansyah, M. L. Umar dan B. H. Priyambodo, "FDM-3D printing parameter optimization using taguchi approachon surface roughness of thermoplastic polyurethane parts," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIIDeM),* pp. 1-14, 2023.

[9] I. Gibson, D. Rosen dan B. Stucker, Additive Manufacturing Techonologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition penyunt., Springer New York, 2014.

[10] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen dan D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications

and challenges," *Composites Part B: Engineering,* vol. 143, pp. 172-196, 2018.

[11] T. Rusianto, S. Huda dan H. Wibowo, "A REVIEW: JENIS DAN PENCETAKAN 3D (3D PRINTING) UNTUK PEMBUATAN PROTOTIPE," *Jurnal Teknologi,* vol. 12 No. 1, pp. 14-21, 2019.

[12] Rosalina, M. Subhan dan Pristiansyah, "Pengaruh Parameter Proses Pada Pencetakan 3D Printing Terhadap Akurasi Dimensi Filamen PetgMenggunakan Metode Taguchi," *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan,* vol. 02, no. 1, pp. 79-87, 2024.

[13] "Apa itu 3D Printer? Jenis, Kegunaan, & Cara Kerja," [Online]. Available: https://fomu.co.id/apa-itu-3d-printer/.

[14] B. H. Rizka, Rifelino, Mulianti dan Y. A, "PENGARUH PARAMETER CETAK 3D PRINTING TERHADAP KEKUATAN BENDING FILAMEN POLYLACTIC ACID," *VOMEK: Jurnal Vokasi Mekanika,* vol. 4 No. 4, pp. 18-24, 2022.

[15] E. S. Pradana, Sulistiyowati dan Wiwik, "Literature Review: Penggunaan Metode Taguchi untuk Peningkatan Kualitas," *Prozima,* vol. 6, no. 2, pp. 85-96, 2022.

[16] F. Rachman, D. A. Purnomo, T. A. Setiawan dan R. A. Fajardini, "OPTIMASI LAJU PENEGERJAAN MATERIAL AISI P20 PROSES ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) SINKING MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI," *Statistika,* vol. 8, no. 2, pp. 95-102, 2020.

[17] I. Soejanto, Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi, Graha Ilmu, 2009.

[18] D. Indrawati, A. Sutoni dan B. E. Putro, "Penerapan Desain Eksperimen Taguchi Untuk Optimasi Kuat Tekan Batako (Studi Kasus TB. Intan Jaya)," dalam *Seminar dan Konferensi Nasional IDEC* , Surakarta, 2021.

[19] T. Riyanto, N. Muflihah, A. Mayasari dan F. A. N. F. Afiatna, "OPTIMASI PEMANFAATAN LUMPUR AKTIF UNTUK MENURUNKAN KADAR COD MENGGUNAKAN METODE DESAIN EKSPERIMEN TAGUCHI," *Jurnal Penelitian Inovasi dan Pengelolaan Industri,* vol. 2, no. 1, pp. 56-63, 2022.

[20] H. A. Pamasaria, T. H. Saputra, A. S. Hutama dan C. Budiantoro, "Optimasi Keakuratan Dimensi Produk Cetak 3D Printing berbahan Plastik PP Daur

Ulang dengan Menggunakan Metode Taguchi," *JMPM: Jurnal Material dan Proses Manufaktur,* vol. 4, no. 1, pp. 12-19, 2020.

[21] M. Christiliana, Pristiansyah dan Y. Oktriadi, "Optimasi Parameter Proses pada 3D Printing FDM terhadap Akurasi Dimensi Filament PLA Food Grade," *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur,* vol. 13, no. 01, pp. 1-8, 2021.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Daftar Riwayat Hidup

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

1. Data Pribadi

Nama Lengkap	: Sherin Ferninda Putri
Tempat, Tanggal Lahir	: Sungailiat, 05 Juni 2003
Jenis Kelamin	: Perempuan
Alamat	: Jl. Timah Raya
Email	: sherinferninda@gmail.com
No. HP	: 083802221391
Agama	: Islam

2. Riwayat Pendidikan
    1) SD Negeri 32 Sungailiat
    2) SMP Negeri 1 Sungailiat
    3) SMA Negeri 1 Sungailiat

3. Pendidikan Non Formal

Sungailiat, 27 Juli 2024