

**OPTIMASI MULTI-PARAMETER 3D PRINTING BERBAHAN DASAR
PLA UNTUK MENINGKATKAN *TENSILE STRENGTH* DAN *WEIGHT
RATIO* DENGAN PENDEKATAN *RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Zhafif Radithya Nugroho
No. Mahasiswa : 21522325

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

PERNYATAAN KEASLIAN**PERNYATAAN KEASLIAN**

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 05-04-2025

(Zhaif Radithya Nugroho)

21522325

SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 4110, 4100
F. (0274) 895007
E. fti@uii.ac.id
W. fti.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 93/Ka.lab SIMANTI/20/ Lab.SIMANTI/IV/2025

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Zhafif Radithya Nugroho

Nim : 21522325

Jurusan : Teknik Industri

Dosen Pembimbing : Ir. Ali Parkhan, M. T.

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul "**OPTIMASI MULTI-PARAMETER 3D PRINTING BERBAHAN DASAR PLA UNTUK MENINGKATKAN TENSILE STRENGTH DAN WEIGHT RATIO DENGAN PENDEKATAN RESPONSE SURFACE METHODOLOGY**". Mulai pelaksanaan penelitian 18 Februari 2025 sampai 7 Maret 2025.

Demikian surat keterangan penelitian ini kami buat. Atas perhatiannya dan kerja samanya kami mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 09 April 2025

Kepala Laboratorium
Sistem Manufaktur Terintegrasi

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.



LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**OPTIMASI MULTI-PARAMETER 3D PRINTING BERBAHAN DASAR
PLA UNTUK MENINGKATKAN *TENSILE STRENGTH* DAN *WEIGHT
RATIO* DENGAN PENDEKATAN *RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY***



Yogyakarta, 15 April 2025

Dosen Pembimbing

Ir. Ali Parkhan, M. T.

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**OPTIMASI MULTI-PARAMETER 3D PRINTING BERBAHAN DASAR
PLA UNTUK MENINGKATKAN *TENSILE STRENGTH* DAN *WEIGHT
RATIO* DENGAN PENDEKATAN *RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

Nama : Zhafif Radithya Nugroho

No. Mahasiswa : 21522325

Telah dipertahankan di depan sidang pengujian sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 16 April 2025

Tim Penguji

Ir Ali Parkhan, M. T.

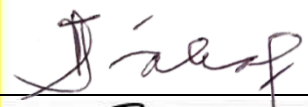
Ketua

Ir. Muchamad Sugarindra, S.T., M.T.I., IPM

Anggota I

Chancard Basumerda S. T., M. Sc.

Anggota II





Mengetahui,

**Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**




Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM
NIK 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Lilik Edy Nugroho dan Kartika Trismie Istanti, yang senantiasa menjadi sumber kekuatan dan doa dalam setiap langkah perjuangan akademik penulis. Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tulus juga penulis sampaikan kepada Bapak Ir. Ali Parkhan, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan penuh kesabaran selama proses penyusunan tugas akhir ini, serta kepada Bapak Ir. Muchamad Sugarindra, S.T., M.T.I., IPM atas arahan berharga di tahap awal penyusunan laporan.

MOTTO

“Barang siapa bersungguh-sungguh, maka ia akan mendapatkan hasil”

(H.R. Bukhari)

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyirah:6)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Q.S. Al-Baqarah:286)

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabaraakaatuh

Alhamdulillahirabbil'alamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Optimasi Multi-Parameter 3D Printing Berbahan Dasar PLA Untuk Meningkatkan *Tensile Strength* dan *Weight Ratio* dengan Pendekatan *Response Surface Methodology*” sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana. Shalawat dan salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari zaman kegelapan menuju cahaya ilmu pengetahuan.

Laporan ini disusun berdasarkan hasil penelitian selama kurang lebih lima bulan yang dilakukan melalui eksperimen dan pengujian langsung di laboratorium. Penulis menyadari bahwa proses ini tidak akan berjalan lancar tanpa dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Lilik Edy Nugroho S.E. & Kartika Trismie Istanti S.E. serta saudara Farrel Rafi Nugroho yang selalu memberikan doa, motivasi, dan dukungan moral maupun materil kepada peneliti.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU., ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Ali Parkhan, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan terhadap perhitungan pada Tugas Akhir penulis.
5. Bapak Ir. Muchamad Sugarindra, S.T., M.T.I., IPM selaku dosen yang telah mengarahkan serta membimbing pada tahap awalan laporan Tugas Akhir sehingga Tugas Akhir dapat terarah dengan baik.
6. Ibu Putri Dwi Annisa S.T., M. Sc. dan Bapak Heri Susilo selaku Kepala Laboratorium dan Laboran Lab. Sistem Manufaktur Terintegrasi, Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia yang telah membantu proses awal hingga pelaksanaan penelitian selesai.
7. Bapak Safarun Najib Dwi Atmoko selaku laboran *Engineering Materials Laboratory*, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gajahmada yang telah membantu penulis dalam proses pengujian setelah penelitian.
8. Dhinar Elma Arifa, Muhammad Dava Aji, dan rekan-rekan asisten Angkatan 2021 dan 2022 Laboratorium Sistem Manufaktur Terintegrasi (SIMAN) atas kesabaran, dukungan, dan kebersamaannya yang tulus selama seluruh proses penyusunan tugas akhir ini, mulai dari perencanaan, pengumpulan data, analisis, hingga penyusunan laporan akhir. Serta semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian laporan ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Yogyakarta, 5 April 2025



Zhafif Radithya Nugroho

ABSTRAK

Perkembangan teknologi dalam dunia manufaktur telah memberikan dampak signifikan terhadap beberapa sektor industri khususnya *Additive Manufacturing* (AM) seperti *Fused Deposition Modeling* (FDM) atau *3D printing* telah mendorong produksi prototipe dan komponen fungsional. *Polylactic Acid* (PLA) menjadi salah satu material populer karena sifatnya yang ramah lingkungan dan mudah diproses. Namun, kualitas hasil cetak seperti kekuatan tarik (*tensile strength*) terhadap berat (*weight*) sangat dipengaruhi oleh parameter proses yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan keseimbangan antara *tensile strength* dan *weight* pada pencetakan 3D berbahan PLA melalui pengaturan parameter proses. Metode yang digunakan adalah *Response Surface Methodology* (RSM) melalui pendekatan *Central Composite Design* (CCD) dengan model *full quadratic*. Variabel yang diteliti meliputi *layer thickness*, *infill density*, dan *infill pattern*. Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dan *digital scale*. Hasil analisis menunjukkan konfigurasi optimal terdapat pada *layer thickness* 0.198182 mm, *infill density* 57.0707%, dan *infill pattern gyroid*. Kombinasi ini menghasilkan *tensile strength* sebesar 25.25 Mpa dan berat 8.3 gram. Akurasi model terhadap data aktual mencapai 99.48% untuk *tensile strength* dan 98.80% untuk *weight*. *Specific strength* tertinggi yang diperoleh sebesar 3.04 MPa/g, menunjukkan efisiensi sifat mekanik yang paling optimal dibandingkan skema lainnya.

Kata Kunci: *3D Printing*, *Response Surface Methodology*, *Tensile Strength*, *Weight*, Optimasi.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Literatur.....	7
2.2 Landasan Teori	21
2.2.1 Additive Manufacture	21
2.2.2 Fused Deposition Modeling (FDM).....	25
2.2.3 Filamen	25
2.2.4 Spesimen	28
2.2.5 Design of Experiments (DOE).....	29
2.2.6 Response Surface Methodology	30
2.2.7 Regression.....	35
2.2.8 Analysis of Variant (ANOVA)	37
2.2.9 Surface Plot and Contour Plot.....	39
2.2.10 Response Optimizer	40
BAB III METODE PENELITIAN	43
3.1 Objek dan Lokasi Penelitian.....	43
3.2 Pengumpulan Data.....	43
3.3 Alur Penelitian	45
3.4 Perancangan Eksperimen Metode RSM	47
3.4.1 Penentuan Variabel Respons.....	47
3.4.2 Penentuan Faktor kendali beserta levelnya.....	48
3.4.3 Penentuan Jumlah Eksperimen	52
3.4.4 Design Spesimen.....	57
3.4.5 Slicing Data CAD	58
3.4.6 Pencetakan	58
3.4.7 Pengujian Variabel Response	59
3.4.8 Analisis Pengolahan Data Response Surface Methodology	60
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	61
4.1 Pengumpulan Data Pengujian.....	61
4.2 Pengolahan Data	62

4.2.1 Uji Normalitas.....	62
4.2.2 Uji ANOVA	64
4.2.3 Uji Regresi	65
4.2.4 Pengolahan Contour Plot dan Surface Plot	65
4.2.5 Pengolahan Response Optimizer	67
4.2.6 Validasi Expert.....	68
BAB V PEMBAHASAN	72
5.1 Analisis Hasil Normalitas	72
5.2 Analisis Hasil ANOVA	72
5.3 Analisis Hasil Regresi	75
5.4 Analisis Hasil <i>Countour Plot</i> dan <i>Surface Plot</i>	77
5.5 Analisis Hasil <i>Response Optimizer</i>	78
BAB VI PENUTUP	80
6.1 Kesimpulan.....	80
6.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN.....	A-1

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>State of Art</i>	15
Tabel 2. 2 Perbandingan Spesifikasi Jenis PLA.....	27
Tabel 2. 3 Perbandingan Dimensi ASTM	29
Tabel 2. 4 <i>Comparison Table RSM Method</i>	35
Tabel 3. 1 ePLA+ HS <i>Specifications</i>	43
Tabel 3. 2 Variabel Respons	48
Tabel 3. 3 Klasifikasi Parameter Faktor kendali	49
Tabel 3. 4 <i>Screening</i> Faktor kendali.....	49
Tabel 3. 5 Faktor kendali Terpilih dan Batasan	52
Tabel 3. 6 <i>Level Faktor kendali</i> Terpilih.....	55
Tabel 3. 7 Kombinasi Level Faktor kendali	57
Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian.....	61
Tabel 4. 2 Hasil Validasi Uji <i>Tensile Strength</i> dan <i>Weight</i>	70
Tabel 5. 1 Perbandingan Hasil Uji Normalitas	72
Tabel 5. 2 <i>Faktor kendali Coded</i>	73
Tabel 5. 3 Hasil Keputusan ANOVA <i>Weight</i>	73
Tabel 5. 4 Hasil Keputusan ANOVA <i>Tensile Strength</i>	74
Tabel 5. 5 Perbandingan Model Regresi	75
Tabel 5. 6 Perbandingan Hasil Uji Regresi	75
Tabel 5. 7 Perbandingan Prediksi dan Aktual	78
Tabel 5. 8 Perbandingan Akhir	79

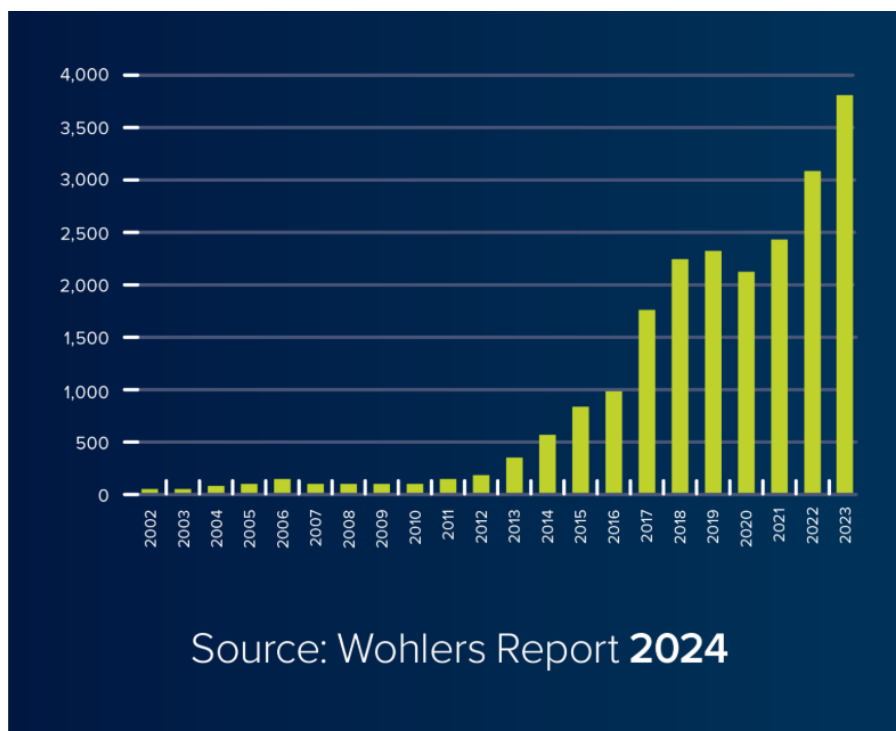
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Data Penjualan <i>Additive Manufacturing</i>	1
Gambar 2. 1 <i>Step of Additive Manufacturing</i>	22
Gambar 2. 2 <i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>	25
Gambar 2. 3 ASTM D-638-22 Type I, II, III, & V	28
Gambar 2. 4 ASTM D-638-22 Type IV	29
Gambar 2. 5 Konsep Dasar DOE	30
Gambar 2. 6 <i>Central Composite Design (CCD)</i>	32
Gambar 2. 7 <i>CCD Points</i>	32
Gambar 2. 8 <i>Box-Behnken Design (BBD)</i>	34
Gambar 2. 9 <i>Contour Plot</i>	40
Gambar 2. 10 <i>Surface Plot</i>	40
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	46
Gambar 3. 2 <i>Aerodynamic Force</i>	47
Gambar 3. 3 <i>Gyroid Patern</i>	51
Gambar 3. 4 <i>Cubic Subdivision Pattern</i>	51
Gambar 3. 5 <i>Design of Experiment CCD by Minitab</i>	57
Gambar 3. 6 <i>3D Design ASTM D-638 Type I</i>	58
Gambar 3. 7 <i>Slicing Data ASTM D-638 Type I</i>	58
Gambar 3. 8 Mesin <i>3D Print Creality 10s Pro</i>	59
Gambar 3. 9 <i>Universal Testing Machine</i>	60
Gambar 4. 1 Pengukuran <i>Weight</i>	61
Gambar 4. 2 Proses <i>Tensile Test</i>	61
Gambar 4. 3 Hasil Uji Normalitas <i>Weight</i>	63
Gambar 4. 4 Hasil Uji Normalitas <i>Tensile Strength</i>	63
Gambar 4. 5 Hasil Uji ANOVA <i>Weight</i>	64
Gambar 4. 6 Hasil Uji ANOVA <i>Tensile Strength</i>	64
Gambar 4. 7 Hasil Uji Regresi <i>Weight</i>	65
Gambar 4. 8 Hasil Uji Regresi <i>Tensile Strength</i>	65
Gambar 4. 9 <i>Contour Plot Weight</i>	66
Gambar 4. 10 <i>Surface Plot Weight</i>	66
Gambar 4. 11 <i>Contour Plot Tensile Strength</i>	66
Gambar 4. 12 <i>Surface Plot Tensile Strength</i>	67
Gambar 4. 13 <i>Response Optimizer Skema 1</i>	67
Gambar 4. 14 <i>Response Optimizer Skema 2</i>	68
Gambar 4. 15 <i>Response Optimizer Skema 3</i>	68
Gambar 4. 16 Validasi Uji <i>Tensile Strength Skema 1</i>	69
Gambar 4. 17 Validasi Uji <i>Tensile Strength Skema 2</i>	69
Gambar 4. 18 Validasi Uji <i>Tensile Strength Skema 3</i>	69
Gambar 4. 19 <i>Desirability Function Plot</i>	71

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi dalam dunia manufaktur telah memberikan dampak signifikan terhadap beberapa sektor industri khususnya dalam beberapa dekade terakhir. Salah satu yang paling mencolok yaitu *Additive Manufacturing* (AM) yang secara harfiah atau penamaan memiliki arti manufaktur aditif, yang merujuk pada proses pembuatan objek dengan cara menambahkan material secara bertahap. *Additive Manufacturing* adalah proses pembuatan barang yang melibatkan penambahan material dengan cara yang terkontrol, dimulai dari model desain digital dan dibangun secara bertahap hingga objek yang diinginkan tercipta. (ISO/ASTM, 2021). Industri *Additive Manufacturing* (AM) tumbuh sebesar 11,1%, mencapai total nilai pasar \$20,035 miliar berdasarkan data akurat yang dikumpulkan dari ratusan perusahaan di seluruh dunia. Permintaan AM juga mengalami peningkatan signifikan, naik sebesar 24,4% pada tahun 2023 dibandingkan tahun sebelumnya. Menurut *Wohlers Associates*, yang telah memantau perkembangan segmen pasar ini selama 21 tahun terakhir, tercatat sebanyak 3.793 unit sistem AM terjual pada tahun 2023, meningkat dibandingkan 3.049 unit yang terjual pada tahun 2022 (Wohlers-Associates, 2024)



Gambar 1. 1 Data Penjualan *Additive Manufacturing*

Pertumbuhan ini didorong oleh adopsi teknologi yang semakin pesat dan luas di berbagai sektor seperti *aerospace*, otomotif, kesehatan, dan *consumer goods*, berkat fleksibilitas desain, pengurangan limbah material, dan kemampuan untuk menghasilkan komponen kompleks secara efisien. Salah satu aplikasi paling populer dan dikenal luas dari AM adalah 3D printing. Teknologi ini merupakan subkategori dari AM yang dirancang untuk mencetak objek dengan berbagai material seperti *polymers*, *metals*, atau *composites*. Proses 3D printing mencakup berbagai teknik, termasuk salah satu contohnya yaitu *Fused Deposition Modeling* (FDM).

Fused Deposition Modeling (FDM) adalah salah satu metode *Additive Manufacturing* (AM) yang paling umum digunakan dalam pencetakan 3D. FDM bekerja dengan cara mencairkan filamen material termoplastik melalui nozzle yang dipanaskan, kemudian didepositkan secara berlapis-lapis untuk membentuk objek tiga dimensi yang didesign melalui *software Computer-Aided Design* (Kristiawan, et al., 2021). Teknologi ini pertama kali diperkenalkan oleh Stratasys pada tahun 1989 dan dipatenkan pada tahun 1992 (Suhayri & Candra, 2021). Sejak saat itu telah berkembang menjadi salah satu teknik cetak 3D yang paling banyak digunakan. Seiring dengan kemajuan teknologi, kini mulai digunakan dalam berbagai sektor, berkat kemampuannya untuk menghasilkan produk dengan kualitas tinggi, *precise specifications*, dan waktu produksi yang lebih cepat. Teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) telah diterapkan dalam otomotif, *aeromodeling* bahkan industri *aerospace*, dimana komponen logam konvensional digantikan oleh *part* yang dicetak menggunakan FDM untuk mengurangi bobot namun tetap memiliki kekuatan yang cukup (Syrlybayev, et al., 2021).

Dalam *Fused Deposition Modeling* (FDM), material yang digunakan biasanya berupa plastik *thermoplastic* seperti *Polylactic Acid* (PLA), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), *Polycarbonate* (PC), atau bahan komposit yang diperkaya dengan serat karbon, atau material lainnya. Dari berbagai jenis material yang tersedia, *Polylactic Acid* (PLA) menonjol sebagai salah satu material yang paling banyak digunakan. Popularitasnya didukung oleh sifat *biodegradability*, kemudahan *prosesability*, memiliki sifat mekanis yang ideal, serta kemampuan menghasilkan *smooth surface finish*, menjadikannya lumayan unggul untuk aplikasi seperti prototipe desain maupun produk (Li, et al., 2020).

Menurut (Ashby, 2011), sifat material dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu *functional properties* (sifat mekanis, termal, dan listrik), serta *aesthetic properties* (warna, tekstur, dan kilau permukaan). Klasifikasi ini menjadi dasar dalam menentukan

karakteristik material yang sesuai dengan kebutuhan performa dan tampilan produk. Dalam konteks aplikasi dibidang teknik, khususnya pada komponen fungsional, sifat mekanis menjadi fokus utama karena berperan langsung terhadap kekuatan dan daya tahan material terhadap beban kerja. Hal ini dikarenakan bagus tidaknya sifat mekanis suatu produk dapat merepresentasikan kualitas dari produk tersebut. Terdapat banyak sifat mekanis yang menjadi pertimbangan dalam pembuatan sebuah *part*, bergantung dari pemanfaatannya. Dalam konteks *aeromodeling*, struktur *part* mengalami kombinasi *Aerodynamic force* seperti *lift*, *gravity*, *thrust*, dan *drag* yang menghasilkan distribusi tegangan dominan berupa tegangan tarik atau *tensile stress* selama penerbangan (Wang, et al., 2023). Karena gaya tarik ini menjadi faktor utama dalam menjaga kekokohan dan stabilitas struktur, maka *tensile strength* dipilih sebagai variabel respon utama. Untuk mendampingi aspek kekuatan, *weight* juga dianalisis karena efisiensi bobot sangat memengaruhi performa *part*.

Namun permasalahannya adalah kekuatan mekanis tidak hanya bergantung pada jenis material yang digunakan. Sebagai contoh, *tensile strength* produk PLA dengan FDM sering kali hanya mencapai sekitar 20-50 MPa, sementara filamen PLA+ dari eSUN memiliki kekuatan tarik hingga 52 Mpa dengan *weight* yang akan semakin bertambah seiring meningkatnya kekuatan, sesuai dengan *claim* spesifikasi resmi yang dirilis oleh produsen (eSUN, n.d). Sifat mekanis ini bukan dihasilkan melalui material yang digunakan semata, namun kombinasi faktor kendali parameter *print setting* juga mempengaruhi. Terdapat parameter *print setting* yang perlu diperhatikan juga dalam proses *Fused Deposition Modeling* (FDM) untuk mengoptimalkan hasil *printing*. Menurut (Malpure, et al., 2024), dalam sebuah proses *3D Printing* terdapat 3 klasifikasi parameter yang dapat menjadi faktor kendali yang mempengaruhi hasil akhir. Antara lain, *Geometry Based*, *Process Based*, dan *Structural Based*. Dari ketiga klasifikasi parameter tersebut masing-masing terdiri dari sekian banyak parameter *print setting*. Dari banyaknya kombinasi parameter *print setting* yang dapat diatur dalam *software slicing* seperti *Ultimaker Cura*, pemilihan kombinasi konfigurasi yang tepat menjadi faktor kunci dalam menghasilkan cetakan dengan sifat mekanis optimal.

Beberapa penelitian terdahulu memang telah mengkaji korelasi antar parameter proses dan kekuatan mekanis seperti *tensile strength*, namun sebagian besar hanya terfokus pada besaran *tensile strength* tanpa mempertimbangkan aspek *weight*. Semakin besar kekuatan mekanis maka akan semakin *compact* benda tersebut yang menyebabkan *weight* atau beratnya semakin besar. Sedangkan semakin ringan *weight* suatu *part* maka kemungkinan akan membuat

kekuatan *tensile strength* semakin kecil. Hal ini memanglah kontradiktif, namun perlu digaris bawahi bahwa dalam konteks *aeromodeling*, membangun suatu *part* yang stabil jauh lebih penting dibandingkan sekadar membuatnya ringan maupun kuat (Nagy, et al., 2023). Oleh karena itu penting untuk memperhatikan keseimbangan antara kekuatan dan bobot objek cetak (*weight-to-strength ratio/specific strength*).

Mengacu pada permasalahan utama disini, perlu dilakukannya optimasi kombinasi parameter *print setting* untuk mengoptimalkan sifat mekanis seperti *tensile strength* namun tetap memperhatikan keseimbangan antara kekuatan dan bobot objek cetak (*weight-to-strength ratio*). Untuk mengoptimalkan parameter *print setting* dalam FDM, berbagai metode eksperimental dan analisis statistik telah digunakan dalam penelitian terdahulu. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah *Response Surface Methodology* (RSM).

Response Surface Methodology (RSM), memungkinkan analisis hubungan non-linier antara variabel independen (parameter *print setting*) dan variabel dependen (*tensile strength* dan *weight-to-strength ratio*). Dengan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM), memungkinkan pembentukan model matematis nonlinear berbasis polinomial kuadrat, sehingga memberikan representasi yang lebih akurat dari hubungan antarparameter, membantu menentukan kombinasi parameter yang memaksimalkan semua variabel respons dengan jumlah eksperimen yang minim, dan untuk memprediksi respons di luar titik-titik eksperimen, sehingga memberikan fleksibilitas dalam penerapan praktis. *Response Surface Methodology* (RSM) mampu merepresentasikan hubungan perkiraan yang tepat antara hasil dan proses suatu variabel melalui *countour plot* dan *surface plot* untuk menghasilkan desain optimal pada produk *drone propellers* (Paksi, et al., 2023). Hal ini terbukti melalui pengujian dalam penelitian ini menunjukkan bahwa propeller hasil 3D print hasil optimasi *design* menggunakan RSM mampu beroperasi pada >5.000 rpm tanpa masalah fisik, dengan tingkat kebisingan >70 dB, mampu menyerupai *design* propeller original. Meskipun lebih berat 1 gram, drone tetap dapat mengudara dengan baik. Propeller cetak juga memiliki karakteristik pemasangan yang sama, memungkinkan inspeksi menyeluruh. Secara keseluruhan, propeller hasil penelitian ini berfungsi menyerupai propeller original yang berbahan serat karbon, dengan keunggulan lebih murah dan mudah didapat. Selain itu menurut (Chowdhry, 2022) *Response Surface Methodology* mampu menunjukkan hubungan *non-linear* antara 2 *variable* parameter *print setting* yang diteliti, yaitu *infill density* dan *layer thickness*. Analisis interaksi menunjukkan bahwa pada 81% *infill density*, peningkatan *layer thickness* berkontribusi terhadap peningkatan

massa cetakan. Namun, di atas ambang tersebut, penurunan *layer thickness* justru meningkatkan massa produk, hal ini mengindikasikan adanya perubahan dominasi parameter berpengaruh terhadap respons cetakan. Dari kedua temuan ini memperkuat validitas *Response Surface Methodology* (RSM) dalam menangkap kompleksitas hubungan antarvariabel, serta menegaskan bahwa optimasi parameter *print setting* tidak dapat dilakukan secara linier. Dengan demikian, pendekatan berbasis RSM tidak hanya meningkatkan akurasi prediksi respons mekanis dan geometris, tetapi juga memungkinkan eksplorasi desain optimal dalam batasan manufaktur yang ada.

Dari latar belakang permasalahan yang ada, akan dilakukan optimasi parameter *print setting* dalam proses *Fused Deposition Modeling* (FDM) untuk mengoptimalkan *tensile strength* sekaligus menjaga keseimbangan *weight-to-strength ratio* dari objek cetak dengan menerapkan metode *Response Surface Methodology* (RSM). Penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan model prediktif yang akurat dalam menentukan kombinasi parameter optimal, sehingga cetakan yang dihasilkan memiliki sifat mekanis yang lebih baik dan efisien.

1.2 Rumusan Masalah

Kekuatan mekanis tidak hanya bergantung pada jenis material yang digunakan, terdapat parameter *print setting* yang perlu diperhatikan juga dalam proses *Fused Deposition Modeling* (FDM) untuk mengoptimalkan hasil printing. Mengacu pada hal tersebut rumusan masalah yang akan menjadi fokus penelitian nantinya yaitu:

1. Bagaimana kombinasi level faktor kendali parameter *print setting* untuk menghasilkan kualitas cetak seimbang pada PLA yang optimal?
2. Berapakah nilai optimal *tensile strength* pada PLA namun tetap memperhatikan keseimbangan antara kekuatan dan bobot objek cetak (*weight-to-strength ratio*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut merupakan tujuan penelitian mengacu pada rumusan masalah yang ditetapkan sebelumnya:

1. Mendapatkan kombinasi parameter proses pencetakan yang optimal dalam menghasilkan kualitas cetak seimbang menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM).
2. Untuk mengukur nilai *tensile strength* serta *weight* dari spesimen cetak berbahan dasar PLA secara seimbang, dengan meninjau hubungan keduanya melalui *weight-to-strength ratio* (*specific strength*)

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat dari penelitian yang dilakukan:

1. Peneliti dapat memperoleh pengalaman baru dalam menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) yang belum diajarkan dalam perkuliahan untuk mengeksplorasi hubungan antara variabel-variabel independen dan dependen pencetakan.
2. Peneliti dapat mendapatkan pengalaman ketika meneliti untuk dijadikan sebagai bahan pertimbangan Tugas Akhir serta memaksimalkan potensi fasilitas Laboratorium Sistem Manufaktur Terintegrasi untuk penelitian dan pengembangan di bidang *3D Printing*.

1.5 Batasan Penelitian

Untuk memastikan pembahasan pada bab-bab berikut tetap fokus dan terarah serta menghindari cakupan masalah yang terlalu luas atau penyimpangan yang tidak diinginkan, diperlukan pembatasan masalah. Pembatasan ini bertujuan agar hasil analisis dapat dilakukan secara mendalam dan selaras dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Dengan demikian, penelitian akan lebih terarah dan memberikan solusi yang relevan dan aplikatif. Batasan-batasan masalah yang digunakan adalah:

1. Obyek penelitian adalah proses pencetakan PLA menggunakan mesin 3D pada Laboratorium Sistem Manufaktur Terintegrasi, Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia, yang fokus pada analisis *tensile strength* dan *weight efficiency* sebagai variabel utama dalam pencetakan PLA.
2. Penelitian ini dilakukan pada periode 18 Februari 2025 – 7 Maret 2025, dengan eksperimen yang dilakukan secara terkontrol di laboratorium, menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM).
3. Data jenis kesalahan dan faktor penyebab diperoleh berdasarkan dari hasil eksperimen dan hasil pengujian

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Kajian literatur ini diharapkan dapat memberikan dasar yang kuat bagi pengujian dan analisis dalam rangka mencapai hasil penelitian yang optimal melalui referensi dari penelitian terdahulu dengan topik dan metode yang relevan melalui identifikasi *research gap* tiap referensi yang digunakan. Berikut merupakan kajian literatur yang akan disajikan dalam kajian induktif:

Penelitian yang dilakukan oleh (Magri, et al., 2021) dengan judul “*Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling*” Penelitian ini berfokus pada pencapaian sifat tarik maksimum dengan mengoptimalkan beberapa parameter. Bertujuan untuk menyelidiki pengaruh temperatur *nozzle* dan orientasi *infill line* terhadap sifat mekanik pada *polylactic acid* (PLA) yang diperkuat dengan *carbon fiber* (CF). Pada penelitian ini metode yang diterapkan adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM) dan analisis *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Metode ini digunakan untuk mengukur pengaruh parameter suhu *nozzle*, orientasi *infill*, dan kondisi *annealing* terhadap kekuatan tarik, modulus *Young*, dan derajat kristalinitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PLA-CF memiliki *Tensile Strength* yang lebih tinggi dibandingkan PLA murni karena penguatan dari serat karbon. Suhu *nozzle* optimal ditemukan pada 230°C, sementara orientasi *infill* (0, 15, -15) memberikan sifat tarik terbaik untuk PLA dan PLA-CF dibandingkan orientasi (45, 135). Dengan memvariasikan parameter secara sistematis dan mengevaluasi sifat *tensile properties*, kondisi optimal untuk memaksimalkan kekuatan dan modulus dapat ditentukan. Studi ini juga menyoroti dampak *Annealing* kristalinitas dan sifat mekanik, "*Annealing*" merujuk pada proses perlakuan panas yang digunakan untuk mengubah struktur mikro bahan, yang dapat memengaruhi sifat-sifat fisik dan mekanik bahan tersebut. Kekurangan dari penelitian ini adalah kurangnya eksplorasi parameter FDM lain yang mungkin berpengaruh. Selain itu, diperlukan pengujian performa dalam kondisi lingkungan nyata untuk menilai keandalan material dalam aplikasi.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ogaili, et al., 2024) dengan judul “*The Effect of Chopped Carbon Fibers on the Mechanical Properties and Fracture Toughness of 3D-Printed PLA Parts: An Experimental and Simulation Study*” Pada penelitian ini dilakukannya eksperimen dan simulasi untuk menginvestigasi sifat mekanis komposit PLA (*polylactic acid*) melalui *finite element analysis* (FEA). Dengan metode *fused filament fabrication* (FFF), sampel

dengan variasi orientasi serat (0° , $0^\circ/90^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$, $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ$) diuji menggunakan *tensile test* dan *single-edge notched bend* (SENB) test. Hasil menunjukkan peningkatan *tensile strength* hingga 3,6% pada orientasi $0^\circ/+45^\circ/90^\circ$ dan *elastic modulus* serta *fracture toughness* hingga 29,9% pada orientasi $+45^\circ/-45^\circ$, dibandingkan PLA murni. Analisis *fractographic* mengungkapkan mekanisme *crack deflection*, *fiber bridging*, dan *fiber pull-out*. Simulasi FEA menggunakan model *transversely isotropic* dan *J-integral approach* menghasilkan prediksi dengan deviasi maksimal 8%. Penelitian ini menyoroti pentingnya optimasi orientasi serat untuk aplikasi struktural, meskipun belum mengeksplorasi faktor eksternal seperti kondisi lingkungan atau siklus pembebanan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ahmed, et al., 2023) dengan judul “*Printing Parameter Optimization of Additive Manufactured PLA Using Taguchi Design of Experiment*” bertujuan untuk meningkatkan *tensile strength* produk hasil cetak *Fused Deposition Modeling* (FDM), terutama dengan mengoptimalkan parameter proses dan pascaproses. Perbaikan dilakukan melalui analisis parameter seperti *infill density*, *pattern type*, *layer height*, dan *print temperature*. Metode yang digunakan adalah analisis berdasarkan *Taguchi L18 orthogonal array*, yang menunjukkan bahwa pola *gyroid infill* dan siklus *annealing* pada suhu 90°C menghasilkan *ultimate tensile strength* (UTS) maksimum sebesar 37,15 MPa. Selain itu, model regresi yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi prediksi UTS lebih dari 96%. Kekurangan dari studi ini adalah keterbatasan cakupan parameter yang dievaluasi serta fokusnya yang terbatas pada PLA. Usulan peneliti selanjutnya adalah mengeksplorasi material alternatif, seperti komposit, dan menilai performa dalam aplikasi nyata di industri manufaktur.

Penelitian yang dilakukan oleh (Sultana, et al., 2024) dengan judul “*Influences of 3D printing parameters on the mechanical properties of wood PLA flament: an experimental analysis by Taguchi method*” bertujuan untuk mengkaji pengaruh parameter cetak 3D terhadap sifat mekanis, terutama *tensile properties*, pada material komposit serat kayu berbasis PLA. Perbaikan dilakukan melalui optimasi parameter seperti *layer thickness*, *infill density*, *printing speed*, dan *nozzle temperature* menggunakan metode desain eksperimen (*Design of Experiment/DOE*) dengan pendekatan *Taguchi L9 orthogonal array*, analisis ANOVA, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati zona retakan dan adhesi serat/matriks. Hasil menunjukkan bahwa ketebalan lapisan yang lebih tipis memberikan adhesi yang lebih baik dan mengurangi *voids*, sehingga meningkatkan performa mekanis. Kekurangan penelitian ini adalah keterbatasan fokus pada parameter tertentu dan penggunaan satu jenis material

komposit. Saran berikutnya adalah mengevaluasi material dan parameter lain yang lebih beragam untuk memperluas aplikasi di industri.

Penelitian yang dilakukan oleh (Hozdic, 2024) dengan judul “*Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM- and SLA-Printed ABS Materials*” meneliti bagaimana perbedaan metode teknologi cetak 3D dan *infill density* mempengaruhi sifat mekanis material seperti modulus Young, *tensile strength*, *strain*, *nominal strain at break*, *maximum displacement*, dan *maximum force at break* pada ABS. Hasil menunjukkan bahwa SLA memiliki keunggulan signifikan pada *mechanical properties*, terutama dalam deformasi dan daya tahan strain, sementara peningkatan *infill density* pada FDM tidak memberikan dampak signifikan pada ketahanan deformasi. Dengan menggunakan metode pencetakan SLA hasil menunjukkan performa mekanis superior, seperti peningkatan *tensile strength* hingga 39,57% dan Young’s modulus hingga 17,89% dibandingkan FDM. Kekurangan penelitian ini yaitu tidak adanya penggunaan metode untuk menentukan kombinasi optimal pencetakan. Selain itu, pendekatan yang digunakan hanya sebatas perbandingan langsung antara dua teknologi pencetakan 3D, yaitu FDM dan SLA.

Penelitian yang dilakukan oleh (Algarni & Ghazali, 2021) dengan judul “*Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG’s Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters*” menyelidiki pengaruh empat parameter proses (*raster angle*, *layer thickness*, *infill percentage*, dan *printing speed*) terhadap perilaku mekanis hasil cetakan menggunakan teknologi FDM (*Fused Deposition Modeling*). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis varians (ANOVA), yang digunakan untuk mengkuantifikasi dan memberi peringkat pengaruh setiap parameter terhadap sifat mekanis material yang berbeda, termasuk PLA, ABS, PEEK, dan PETG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *infill percentage* dan *layer thickness* memiliki pengaruh paling signifikan terhadap sebagian besar sifat mekanis material. Kekurangan dari penelitian ini adalah masih terbatasnya data yang mencakup berbagai variasi parameter yang lebih kompleks. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah untuk memperluas penelitian dengan mengkaji lebih banyak parameter tambahan yang dapat lebih mengoptimalkan sifat mekanis material yang dihasilkan oleh FDM.

Penelitian dengan judul “*Influence of 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of the PLA Parts made by FDM Additive Manufacturing Process*” yang dilakukan oleh (Constantin, et al., 2022) menentukan pengaruh parameter teknologi dalam 3D printing menggunakan teknologi FDM terhadap sifat mekanis material yang dicetak dengan filamen

ULTRA PLA. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen faktorial *Response Surface Methodology* dan pemrosesan statistik ANOVA. Untuk memperoleh kekuatan tarik tinggi pada komponen 3D, diperlukan pengaturan lapisan tipis ($h = 0,1$ mm) dan suhu mendekati 300°C . Pemilihan parameter yang tidak tepat dapat menurunkan kekuatan tarik hingga 30-40%. Kecepatan pencetakan tidak berpengaruh besar pada sifat mekanis, karena dibatasi oleh karakteristik teknis printer. Hasil percobaan pada 30 varian proses menunjukkan varian pencetakan 3D optimal yang memenuhi persyaratan *tensile strength*, *dimensional accuracy*, *speed of execution*, dan *surface quality*. Kekurangan dari penelitian ini adalah ketergantungan pada jumlah terbatas varian proses yang diuji. Saran penelitian kedepan mengkaji ulang tentang jumlah varian proses apakah mempengaruhi hasil atau tidak.

Penelitian dengan judul “*Investigation and Optimization of Effects of 3D Printer Process Parameters on Performance Parameters*” oleh (Mushtaq, et al., 2023) menentukan pengaturan optimal pada 3D printer berbahan acrylonitrile butadiene styrene (ABS) terkait dengan respons yang saling bertentangan, yaitu kekuatan lentur (FS), kekuatan tarik (TS), kekasaran permukaan rata (Ra), waktu pencetakan (T), dan konsumsi energi (E). Menggunakan pengoptimalan multi-objektif numerik *Response Surface Methodology* (RSM) untuk mendapatkan parameter yang optimal pada nilai layer thickness (LT), infill density (ID), dan printing speed (PS). Metode yang digunakan adalah central composite design (CCD) yang dipadukan dengan analisis variansi (ANOVA) untuk mengonfirmasi signifikansi parameter kinerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa LT paling berpengaruh terhadap Ra dan T, sementara ID paling berpengaruh terhadap sifat mekanik. Model optimasi numerik menghasilkan parameter yang optimal: $LT = 0.27$ mm, $ID = 84\%$, dan $PS = 51.1$ mm/s, dengan $FS = 58.01$ MPa, $TS = 35.8$ MPa, Ra terendah = 8.01 μm , T terendah = 58 menit, dan $E = 0.21$ kWh. Kekurangan penelitian ini adalah terbatas pada percobaan menggunakan ABS dan model pencetakan tertentu. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah melakukan eksperimen dengan bahan dan printer lainnya untuk meningkatkan generalisasi model optimasi.

Penelitian dengan judul “*Improving Strength of the ABS 3D-Print Using RSM*” oleh (Chowdhry, 2022) bertujuan untuk menentukan hubungan antara *infill density* dan *layer thickness* terhadap berat cetakan 3D berbahan ABS+ serta mengoptimalkan parameter proses untuk kekuatan optimal. Saran perbaikan yang diajukan adalah dengan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) melalui desain eksperimen *Central Composite Design* (CCD) untuk menganalisis interaksi parameter secara *non-linear*. Metode ini adalah metode untuk

memodelkan dan mengoptimalkan hubungan antara variabel proses dengan respons cetakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *infill density*, *layer thickness*, dan interaksinya signifikan pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$), dengan model regresi mencapai akurasi $R^2 = 95,98\%$. Parameter optimal yang dihasilkan adalah *infill density* 10%-81% dan *layer thickness* 0,1-0,3 mm. Kekurangan penelitian ini adalah hanya menguji dua parameter proses tanpa mempertimbangkan variabel lain seperti kecepatan cetak atau penggunaan *support*. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah mengeksplorasi parameter tambahan dan pengaruhnya terhadap kekuatan mekanis dan kualitas cetakan secara lebih komprehensif.

Penelitian dengan judul “*Enhancing Mechanical Properties of 3D-Printed PLAs via Optimization Process and Statistical Modeling*” oleh (Shahrjerdi, et al., 2023) ini dilakukan dengan maksud untuk mengoptimalkan parameter cetak 3D berbasis *Fused Deposition Modeling* (FDM), khususnya pada material *Polylactic Acid* (PLA), untuk meningkatkan kekuatan tarik dan mengurangi kekasaran permukaan. Saran perbaikan yang diajukan adalah dengan memvariasikan *Infill Percentage* (IP), *Extruder Temperature* (ET), dan *Layer Thickness* (LT), yang dianalisis menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM). Metode ini digunakan untuk memodelkan hubungan antara parameter input dan respons output melalui analisis variansi (ANOVA) dan grafik interaksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan IP dan pengaturan ET pada 220 °C meningkatkan *failure load* hingga maksimum 1218 N, sementara waktu fabrikasi, berat, dan kekasaran permukaan dapat dioptimalkan secara bersamaan. Validasi model menunjukkan kesalahan prediksi kurang dari 5%, membuktikan akurasi dan keandalan metode optimasi ini. Kekurangan penelitian ini adalah terbatas pada tiga parameter proses tanpa mempertimbangkan variabel lain, seperti kecepatan cetak atau penggunaan *support*. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah mengeksplorasi parameter tambahan untuk meningkatkan performa cetak 3D secara lebih komprehensif.

Penelitian yang dilakukan oleh (Wicaksono & Nugraha, 2022) dengan judul “*Optimization of 3D Printing Parameters Using the Taguchi Method to Improve Dimensional Precision*” bertujuan untuk mengoptimalkan parameter proses pencetakan 3D berbahan *Polylactic Acid* (PLA) guna meningkatkan akurasi dimensi produk, terutama pada mekanisme yang membutuhkan tingkat presisi tinggi. Saran perbaikan yang diajukan adalah dengan menggunakan metode *Taguchi*, yang efektif untuk mengatasi deviasi terhadap target sehingga kualitas produk yang dihasilkan lebih optimal. Metode ini adalah metode optimasi yang dirancang untuk menentukan kombinasi parameter terbaik dengan mengurangi variasi pada

hasil cetakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai parameter optimal adalah *Nozzle Temperature* 200 °C, *Bed Temperature* 62 °C, *Room Temperature* 34 °C, *Infill Percentage* 40%, *Layer Height* 0,25 mm, dan *Printing Speed* 20 mm/s, dengan deviasi diameter bagian dalam sebagai acuan kualitas. Kekurangan penelitian ini adalah fokus yang hanya pada satu tipe spesimen (*ring-shaped*), sehingga generalisasi hasil mungkin terbatas. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah mengeksplorasi variasi bentuk geometri dan material lain untuk meningkatkan fleksibilitas aplikasi optimasi parameter ini.

Penelitian yang dilakukan oleh (Kholil, et al., 2022) dengan judul “*Compression Strength Characteristics of ABS and PLA Materials Affected by Layer Thickness on FDM*” bertujuan untuk menentukan kekuatan tekan material yang dihasilkan dengan teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM), dengan memvariasikan *layer thickness* antara 0,10 mm hingga 0,35 mm. Saran perbaikan yang diajukan adalah dengan mengoptimalkan *layer thickness* untuk meningkatkan kekuatan tekan material. Uji adalah pengujian kekuatan tekan sesuai standar ASTM D695, menggunakan material ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) dan PLA (*Polylactic Acid*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tekan tertinggi ditemukan pada material PLA dengan *layer thickness* 0,15 mm (66,78 MPa), sedangkan kekuatan tekan terendah pada material ABS dengan *layer thickness* 0,35 mm (33,41 MPa). Nilai kekuatan tekan pada kedua material bervariasi dengan *perubahan layer thickness*. Kekurangan penelitian ini adalah terbatas pada dua jenis material dan satu standar pengujian. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah mengeksplorasi material lain, seperti komposit, serta mempertimbangkan parameter proses tambahan untuk mengoptimalkan kekuatan mekanis.

Penelitian yang dilakukan oleh (Bowo, et al., 2021) dengan judul “*Pengaruh Infill Geometry, Printing Speed Dan Nozzle Temperature Terhadap Kekuatan Impak Menggunakan Filamen ST PLA*” mengevaluasi pengaruh parameter 3D printing berbasis *Fused Deposition Modeling* (FDM) terhadap kekuatan impak material plastik menggunakan metode pengujian impak Charpy. Peneliti memvariasikan *infill geometry* (*Concentric, Grid, Lines, dll.*), *nozzle temperature* (210°C, 215°C, 220°C), dan *printing speed* (30 mm/s, 40 mm/s, 50 mm/s) untuk menentukan konfigurasi optimal. Metode yang diterapkan yaitu *Design of Experiment* (DOE) dengan melibatkan pencetakan 39 sampel dengan filamen ST PLA pada printer FDM model PRUSA, diikuti dengan uji impak untuk mengukur energi per satuan luas. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan impak tertinggi sebesar 0,00653 *Joule/mm²* pada konfigurasi *infill geometry Concentric, nozzle temperature 220°C*, dan *printing speed 50 mm/s*, sedangkan

kekuatan dampak terendah sebesar 0,00119 Joule/mm² pada konfigurasi *infill geometry Cross*, *nozzle temperature* 210°C, dan *printing speed* 30 mm/s. Kekurangan penelitian ini adalah fokus hanya pada variasi parameter tertentu tanpa mengeksplorasi jenis material lain. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah mengevaluasi pengaruh material berbeda serta mempertimbangkan faktor lingkungan

Penelitian yang dilakukan oleh (Paksi, et al., 2023) dengan judul “Optimalisasi Kekuatan Tarik Produk *Drone Propellers* Berbahan Material Filament PETG Pada Proses *3D Printing* FDM dengan Metode *Response Surface Methodology* (RSM)” bertujuan untuk mengoptimalkan parameter pencetakan 3D printing FDM menggunakan material PETG filament sebagai alternatif lebih murah untuk produk drone propellers. Saran perbaikan yang diajukan adalah dengan menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) untuk menentukan kombinasi optimal dari parameter *nozzle temperature*, *printing speed*, dan *layer thickness* untuk mencegah kegagalan cetak dan meningkatkan kekuatan tarik produk. Metode yang diterapkan mencakup perancangan percobaan, analisis regresi, ANOVA, serta visualisasi data berupa *contour plots*, berdasarkan standar ASTM D638 untuk uji tarik dan ASTM F2506 untuk pengujian kualitas *propellers*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter *layer thickness* memiliki pengaruh paling signifikan terhadap elastic modulus, dengan kombinasi optimal yaitu *nozzle temperature* 245°C, *printing speed* 35 mm/s, dan *layer thickness* 0,25 mm, menghasilkan nilai *elastic modulus* tertinggi sebesar >0,125 GPa. Pencetakan dan pengujian penerbangan menunjukkan bahwa propellers berbahan PETG dapat menjadi alternatif yang layak dengan biaya lebih murah dibandingkan produk asli. Kekurangan penelitian ini adalah terbatas pada material PETG dan parameter tertentu. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah mengeksplorasi material lain dan variasi bentuk desain propellers untuk meningkatkan performa produk secara keseluruhan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Apriansyah, et al., 2021) dengan judul “Peningkatan Akurasi Dimensi dan Tingkat Kekerasan Pada Filamen Esteel Dengan Pendekatan Metode Taguchi” melakukan analisis akurasi dimensi hasil proses 3D printing dengan variasi parameter yang berbeda. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi, yang efektif untuk mengidentifikasi pengaruh parameter proses terhadap akurasi hasil cetakan. Metode ini digunakan untuk menganalisis data pengujian yang diperoleh melalui alat uji seperti *Digimatic Vernier Caliper Mitutoyo Absolute* dengan ketelitian 0,02 mm, alat uji kekerasan *Albert Gnhem Horgen*, dan Profil Proyektor PJA3000 Mitutoyo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi

parameter proses dapat memengaruhi tingkat akurasi dimensi cetakan. Kekurangan penelitian ini adalah tidak adanya eksplorasi terhadap jenis material dan parameter lain yang lebih kompleks. Saran untuk peneliti selanjutnya adalah untuk mengeksplorasi lebih banyak variabel proses, termasuk material yang digunakan, serta mengintegrasikan analisis biaya untuk meningkatkan efisiensi ekonomi dari proses 3D printing.

Dari Kajian literatur diatas didapatkan informasi bahwa PLA menjadi material yang paling banyak dikaji, termasuk PLA murni (Ahmed, et al., 2023) PLA dengan serat karbon (Magri, et al., 2021); (Ogaili, et al., 2024), dan PLA berbasis serat kayu (Sultana, et al., 2024). Modifikasi material lain seperti ABS dilakukan oleh (Hozdic, 2024); (Mushtaq, et al., 2023)) Berdasarkan perbandingan ini, PLA merupakan pilihan ideal untuk penelitian nantinya karena sifatnya, konsistensi mekanik, beberapa juga memperlihatkan hasil bahwa sifat mekanis PLA masih diatas ABS, selain itu PLA cenderung lebih mudah dalam proses pencetakan. Hal ini juga relevan dengan kebutuhan penelitian berbasis optimasi parameter yang memerlukan stabilitas material.

Dalam aspek metodologi optimasi, berbagai teknik eksperimen digunakan untuk mengidentifikasi parameter pencetakan terbaik. Misalnya, metode Taguchi *Design of Experiments* (DOE) digunakan oleh (Ahmed, et al., 2023), (Sultana, et al., 2024), dan (Ogaili, et al., 2024) yang mengoptimalkan berbagai parameter seperti kekuatan mekanis dan ketahanan material dengan menggunakan eksperimen yang terstruktur. Selain itu, *Response Surface Methodology* (RSM) dipilih oleh (Constantin, et al., 2022), (Mushtaq, et al., 2023), dan (Chowdhry, 2022) untuk optimasi parameter pencetakan material seperti PLA dan ABS. Dengan mempertimbangkan efisiensi dan akurasi prediktifnya, RSM dipilih sebagai metode penelitian. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih dalam terhadap korelasi parameter proses pencetakan dan sifat hasil cetak PLA, sekaligus meminimalkan waktu dan jumlah eksperimen.

Berikut merupakan *state of art* yang berisi gambaran fokus tiap penelitian yang telah dikaji:

Tabel 2. 1 *State of Art*

No	Penulis	Judul	Objek					Model/Teori/Metode				
			FDM	ASTM	PLA	Tensile	Bending	Weight	Regresi	ANOVA	RSM	Taguchi
1	(Magri, et al., 2021)	<i>Mechanical Properties of CF-Reinforced PLA Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling</i>	✓	✓	✓	✓						
2	(Ogaili, et al., 2024)	<i>The Effect of Chopped Carbon Fibers on the Mechanical Properties and Fracture Toughness of 3D-Printed PLA Parts: An Experimental and Simulation Study</i>	✓	✓	✓	✓	✓					
3	(Ahmed, et al., 2023)	<i>Printing Parameter Optimization of Additive Manufactured</i>	✓	✓	✓	✓			✓			✓

No	Penulis	Judul	Objek						Model/Teori/Metode			
			FDM	ASTM	PLA	Tensile	Bending	Weight	Regresi	ANOVA	RSM	Taguchi
		<i>PLA Using Taguchi Design of Experiment</i>										
4	(Sultana, et al., 2024)	<i>Influences Of 3D Printing Parameters On The Mechanical Properties Of Wood PLA Flament: An Experimental Analysis by Taguchi Method</i>	✓	✓	✓	✓				✓		✓
5	(Hozdic, 2024)	<i>Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM- and SLA-Printed ABS Materials</i>	✓	✓		✓						
6	(Algarni & Ghazali, 2021)	<i>Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS,</i>	✓	✓	✓	✓						

No	Penulis	Judul	Objek						Model/Teori/Metode			
			FDM	ASTM	PLA	Tensile	Bending	Weight	Regresi	ANOVA	RSM	Taguchi
		<i>PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters</i>										
7	(Constantin, et al., 2022)	<i>Influence of 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of the PLA Parts made by FDM Additive Manufacturing Process</i>	✓	✓	✓	✓			✓			✓
8	(Mushtaq, et al., 2023)	<i>Investigation and Optimization of Effects of 3D Printer Process Parameters on Performance Parameters</i>		✓		✓	✓		✓	✓		✓
9	(Chowdhry, 2022)	<i>Improving Strength of the</i>							✓			✓

No	Penulis	Judul	Objek						Model/Teori/Metode			
			FDM	ASTM	PLA	Tensile	Bending	Weight	Regresi	ANOVA	RSM	Taguchi
		<i>ABS 3D-Print Using RSM</i>										
10	(Shahrjerdi, et al., 2023)	<i>Enhancing Mechanical Properties of 3D- Printed PLAs via Optimization Process and Statistical Modeling</i>	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	
11	(Wicaksono & Nugraha, 2022)	<i>Optimization of 3D Printing Parameters Using the Taguchi Method to Improve Dimensional Precision</i>			✓							✓
12	(Kholil, et al., 2022)	<i>Compression Strength Characteristics of ABS and PLA Materials Affected by Layer</i>	✓	✓	✓		✓					

No	Penulis	Judul	Objek						Model/Teori/Metode			
			FDM	ASTM	PLA	Tensile	Bending	Weight	Regresi	ANOVA	RSM	Taguchi
<i>Thickness on FDM</i>												
13	(Bowo, et al., 2021)	Pengaruh Infill Geometry, Printing Speed Dan Nozzle Temperature Terhadap Kekuatan Impak Menggunakan Filamen ST PLA	✓	✓	✓							
14	(Paksi, et al., 2023)	Optimalisasi Kekuatan Tarik Produk Drone Propellers Berbahan Material Filament PETG Pada Proses 3D Printing FDM dengan Metode <i>Response Surface Methodology</i> (RSM)	✓	✓		✓			✓	✓	✓	

No	Penulis	Judul	Objek						Model/Teori/Metode				
			FDM	ASTM	PLA	Tensile	Bending	Weight	Regresi	ANOVA	RSM	Taguchi	
15	(Apriansyah, et al., 2021)	Peningkatan Akurasi Dimensi dan Tingkat Kekerasan Pada Fillamen Esteel Dengan Pendekatan Metode Taguchi	✓		✓						✓		✓
16	(Zhafif Radithya Nugroho, 2025)	Optimasi Multi-Parameter 3D Printing Berbahan Dasar Pla Untuk Meningkatkan Tensile Strength Dan Weight Ratio Dengan Pendekatan Response Surface Methodology	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓

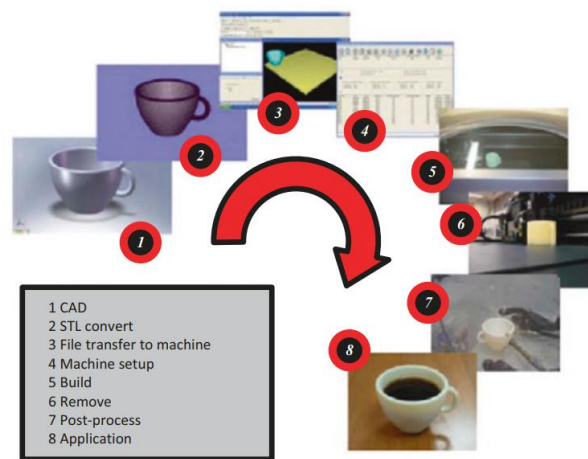
2.2 Landasan Teori

Pada sub bab ini akan fokus pada penjelasan landasan teori dan konsep-konsep yang mendasari penelitian yang akan dilakukan. Kajian teori ini bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam seputar material, parameter variabel, serta metode optimasi yang digunakan dalam penelitian. Akan digunakan sebagai acuan justifikasi pemilihan material filamen untuk menentukan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian berdasarkan keunggulan sifat mekanisnya. Selain itu, penjelasan mengenai metode *optimasi Response Surface Methodology* (RSM) juga akan diberikan, mengingat keunggulannya dalam mengeksplorasi kombinasi parameter secara efisien.

2.2.1 Additive Manufacture

Additive Manufacturing adalah istilah formal yang dulunya dikenal sebagai *Rapid Prototyping* dan yang secara populer disebut 3D Printing. Istilah *Rapid Prototyping* (atau RP) digunakan di berbagai industri untuk menggambarkan sebuah proses dalam menciptakan representasi sistem atau bagian secara cepat sebelum peluncuran akhir atau komersialisasi. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi, banyak bagian sekarang diproduksi langsung dengan mesin AM, bukan hanya sebagai *prototype*. Oleh karena itu, istilah RP dianggap kurang tepat (Gibson, et al., 2021)

Sebuah Komite Teknis di dalam ASTM International sepakat bahwa terminologi baru perlu diadopsi, terpilihilah istilah *Additive Manufacturing* (AM) yang lebih menggambarkan prinsip dasar teknologi ini. Menurut *International Organization for Standardization* (ISO/ASTM, 2021), istilah "*additive*" dalam konteks ini menggambarkan cara material ditambahkan lapis demi lapis sesuai dengan desain objek yang diinginkan. Ini berbeda dengan metode manufaktur tradisional yang umumnya menggunakan pendekatan *subtractive*, di mana material dipotong atau dihilangkan dari bentuk yang lebih besar. Secara etimologis, "*additive*" berasal dari kata "*add*," yang berarti menambah atau memasukkan sesuatu. Sedangkan "*manufacturing*" berasal dari bahasa Latin "*manu factus*," yang berarti dibuat dengan tangan.



Gambar 2. 1 Step of Additive Manufacturing

Berdasarkan buku “*Additive Manufacturing Technologies*” yang di tulis oleh (Gibson, et al., 2021) untuk melakukan *Additive Manufacturing* terdapat 8 langkah yang perlu dilalui, antara lain:

1. CAD

Semua komponen yang dihasilkan melalui *Additive Manufacturing* (AM) harus diawali dengan pembuatan model pada *software* yang bertujuan untuk mendeskripsikan geometri eksternal objek. Proses ini biasanya menggunakan *software Computer-Aided Design (CAD) profesional* yang menghasilkan representasi solid atau permukaan dalam format tiga dimensi (3D), seperti *Solidworks, AutoCAD, Fusion 360*, dan lainnya.

2. Conversion to STL

Setelah proses *design* selesai, *file part* harus disimpan dalam format STL. Hal ini dikarenakan hampir semua mesin AM menerima file dalam format STL (*Standard Tessellation Language*), yang telah menjadi standar umum di industri. File STL ini mendeskripsikan permukaan eksternal tertutup dari model CAD asli dalam bentuk segitiga-segitiga kecil. Proses ini penting untuk memastikan bahwa model dapat diolah lebih lanjut oleh *software* dan mesin AM.

3. Transfer to AM and STL File Manipulation

Setelah file STL dibuat, file tersebut ditransfer ke mesin AM untuk diproses lebih lanjut. Di tahap ini, operator dapat memanipulasi file agar sesuai dengan parameter pencetakan, seperti ukuran, posisi, dan orientasi model di dalam ruang kerja mesin. Manipulasi ini bertujuan untuk menyesuaikan sekaligus mengoptimalkan proses pencetakan dan meminimalkan limbah material.

4. *Machine Setup*

Mesin AM harus diatur dengan parameter yang sesuai sebelum memulai proses pencetakan. Parameter yang perlu diperhatikan meliputi jenis material yang akan digunakan, ketebalan setiap lapisan cetak, sumber energi (misalnya, laser atau elemen pemanas), dan waktu pencetakan. Persiapan ini sangat penting untuk memastikan bahwa proses pencetakan berjalan dengan optimal sesuai dengan spesifikasi desain.

5. *Build*

Tahap ini dapat diartikan juga sebagai tahap pencetakan, yang berarti proses di mana mesin AM mencetak objek lapis demi lapis sesuai dengan data digital dari file STL. Mesin biasanya dapat beroperasi tanpa pengawasan intensif, tetapi pemantauan berkala diperlukan untuk memastikan tidak ada masalah, seperti habisnya material, gangguan daya, atau kesalahan *software*.

6. *Removal*

Setelah proses pencetakan selesai, objek yang telah dicetak perlu dikeluarkan dari mesin. Pengangkatan ini memerlukan prosedur khusus, terutama jika mesin dilengkapi dengan mekanisme pengaman, seperti *Temperatures interlock*. Operator harus memastikan bahwa objek sudah cukup dingin dan siap untuk diproses lebih lanjut.

7. *Post-Processing*

Part yang baru dicetak sering kali membutuhkan proses pasca-pencetakan untuk mencapai kualitas akhir yang diinginkan. Tahap ini dapat mencakup pembersihan sisa material pendukung, penghalusan permukaan, pengecatan, pelapisan primer, atau perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan atau estetika. Dalam beberapa kasus, bagian yang dicetak masih rapuh sehingga harus ditangani dengan hati-hati. Proses pasca-pencetakan sering kali memakan waktu dan biaya, terutama jika persyaratan hasil akhirnya kompleks.

8. *Application*

Setelah melalui semua tahap, objek yang dicetak siap digunakan. Pada tahap ini, objek dapat dirakit bersama komponen mekanik atau elektronik lainnya untuk membentuk model atau produk akhir. Dalam konteks tertentu, tahap ini mungkin melibatkan pengujian tambahan untuk memastikan bahwa objek memenuhi standar kualitas atau fungsi yang diinginkan.

Selain itu menurut (Kumaresan, et al., 2022) terdapat beberapa teknik atau metode *Additive Manufacturing* yang paling umum digunakan di berbagai sektor industri adalah sebagai berikut:

1. *Stereolithography (SLA)*

Merupakan teknologi cetak berbasis polimerisasi yang diperkenalkan pada 1986, menggunakan resin epoksi atau akrilat yang disinari laser untuk mencetak produk lapis demi lapis dengan resolusi tinggi (50–200 μm). Teknik SLA terdiri dari dua metode, yaitu proyeksi (PSL) dan pemindaian (SSL). Meskipun memiliki resolusi terbaik dan akurasi tinggi, proses ini relatif lambat dan mahal.

2. *Selective Laser Sintering (SLS)*

Selective Laser Sintering (SLS) dikembangkan pada 1987 oleh Carl Deckard, menggunakan laser CO₂ untuk proses pemadatan material serbuk dengan memanaskannya hingga mendekati titik leleh tanpa mencairkannya sepenuhnya, bubuk menjadi solid di build chamber. Prosesnya melibatkan penyebaran bubuk, pemanasan, dan pencetakan lapisan bertahap. Bubuk berlebih berfungsi sebagai penopang dan dapat digunakan ulang. Teknik ini hemat biaya dan fleksibel untuk prototipe padat, tetapi membutuhkan daya tinggi dan biaya operasional tinggi dengan kualitas relatif lebih rendah.

3. *Inkjet Printing (IP)*

Inkjet printing modern ditemukan oleh Canon dan Hewlett-Packard pada 1987, dengan dua jenis utama: *continuous inkjet (CIJ)* dan *drop-on-demand (DOD)*. Pada CIJ, tetesan tinta dihasilkan terus-menerus dengan pompa bertekanan tinggi dan dikendalikan piezoelektrik. Sebaliknya, DOD mengeluarkan tinta hanya saat dibutuhkan, menggunakan piezoelektrik atau proses termal yang menghasilkan pulsa tekanan. DOD lebih efisien dan ramah lingkungan karena mengurangi pemborosan dan pasca-pemrosesan. Resolusi CIJ lebih rendah dibandingkan DOD.

4. *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

adalah teknik yang dikembangkan oleh Feygin dan Pak di Helisys Corp pada 1991, untuk membuat objek berukuran kecil hingga besar. Bahan baku dalam bentuk gulungan dipotong dengan pemotong atau laser, lalu dilapisi perekat dan dipress dengan rol pemanas. Laser digunakan untuk menghilangkan material berlebih. Bahan yang digunakan termasuk plastik, logam, kain, dan kertas. Keuntungannya termasuk biaya peralatan rendah, tidak perlu pemrosesan lanjutan atau struktur penyangga, serta waktu produksi yang lebih cepat.

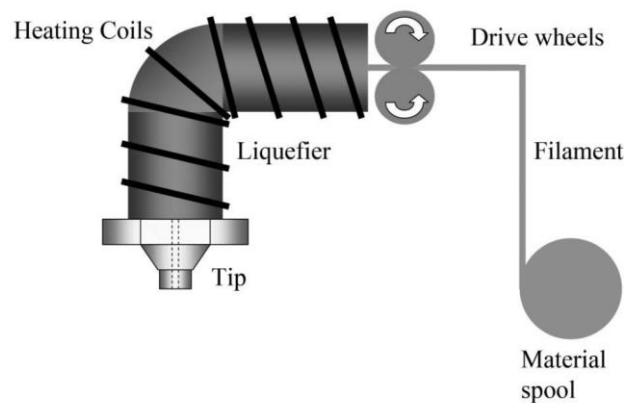
5. *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Fused Deposition Modeling (FDM) adalah metode manufaktur aditif berbasis ekstrusi material yang ditemukan oleh Scott Crump pada 1989. FDM menggunakan polimer termoplastik seperti

ABS, PLA, dan polycarbonate. Filament disimpan dalam gulungan dan terhubung ke kepala ekstrusi yang bergerak dalam arah X, Y, dan Z. FDM melibatkan tiga tahap: (1) pra-pemrosesan, (2) produksi, dan (3) pasca-pemrosesan.

2.2.2 *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Fused Deposition Modeling adalah suatu proses ekstrusi filamen non-laser yang menggunakan termoplastik rekayasa yang dipanaskan kemudian diekstrusi secara berlapis untuk membangun suatu model dari bawah ke atas. Proses *Fused Deposition Modeling* (FDM) awalnya dikembangkan oleh *Advanced Ceramics Research* di Tucson, Arizona. Namun, proses ini telah dikembangkan secara signifikan oleh *Stratasys, Inc.*, yang berbasis di Minneapolis, Minnesota (Liou, 2019)



Gambar 2. 2 *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Berdasarkan buku “*Rapid Prototyping and Engineering Applications A Toolbox Prototype Development*” oleh (Liou, 2019) proses kerja FDM diilustrasikan sesuai dengan gambar diatas, di mana material ditarik dari gulungan (*spool*), dipanaskan hingga sedikit di atas suhu leleh, dan didepositkan pada lokasi yang diinginkan. Langkah-langkah utama dalam proses ini adalah sebagai berikut:

1. Mulai dengan memasukkan filamen ke dalam roda penggerak (*drive wheels*).
2. Roda penggerak memaksa filamen masuk ke dalam pencair (*liquefier*).
3. Blok pemanas (*heater block*) melelehkan filamen.
4. Filamen padat digunakan sebagai piston.
5. Filamen yang telah meleleh didorong keluar melalui ujung *nozzle*.

2.2.3 *Filamen*

Filamen adalah sebuah material berupa benang panjang yang dapat dilelehkan dengan suhu tertentu dan dicetak menjadi objek 3D (Irfani & Ramadhan, 2024). Dalam proses pencetakan

3D, polimer merupakan bahan yang paling umum digunakan sebagai material dasar filamen dalam proses FDM (*Fused Deposition Modeling*) (Kumaresan, et al., 2022). Polimer yang dimaksud, antara lain:

1. *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS)

Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS) merupakan termoplastik rekayasa yang banyak digunakan karena memiliki sifat mekanik, ketahanan kimia, dan karakteristik pemrosesan yang mudah (Rusnaenah, et al., 2024). Polimer ABS memiliki tingkat kekakuan yang tinggi, ringan, durabilitas yang tinggi, dan tahan terhadap benturan (Dimas, et al., 2022)

2. *Nylon/Polyamide* (PA)

Nylon merupakan material yang sangat ideal untuk digunakan dalam teknologi pencetakan 3D (3D printing) karena sifat kekuatan mekanis (*mechanical strength*) dan durabilitasnya yang unggul. Hingga saat ini, nylon telah banyak dimanfaatkan dalam industri tekstil berkat *tensile strength* yang sangat baik. Dalam aplikasi pada model 3D, material *nylon* memiliki resistensi tinggi terhadap deformasi akibat panas (*thermal deformation*), sehingga tidak mudah meleleh dalam waktu singkat. Material ini juga memiliki *thermal stability* yang baik pada suhu tinggi dan dapat dengan mudah diwarnai (*dyed*) sesuai kebutuhan desain. Namun, terdapat beberapa kelemahan dari penggunaan *nylon* dalam pencetakan 3D. *Nylon* membutuhkan *melting point* yang jauh lebih tinggi agar dapat mencair dan diproses menjadi desain tertentu. Selain itu, nylon memiliki kelemahan berupa *susceptibility* terhadap *bending* dan *wrinkling*, yang dapat mengganggu presisi dan kualitas proses pencetakan.

2. *Polylactic Acid* (PLA)

PLA merupakan termoplastik bertitik leleh rendah dan merupakan pengganti termoplastik berbasis minyak bumi. Material ini terutama digunakan untuk aplikasi biomedis, rekayasa jaringan, dan pembuatan produk industri (Kumaresan, et al., 2022). *Polylactic acid* (PLA) adalah turunan asam laktat (LA) yang dihasilkan dari sumber daya terbarukan seperti gandum, jerami, jagung, dan sorgum, serta sepenuhnya dapat terbiodegradasi (Ge Li, et al., 2020).

Secara alami, PLA memiliki sifat termoplastik yang baik sehingga dapat digunakan untuk mempersiapkan dan memproses plastik seperti film dan serat. PLA tidak mudah terpengaruh oleh pelarut selama proses industri, suhu pemrosesan umumnya berkisar antara 170–230°C, sehingga material ini cocok untuk metode *extrusion*, *spinning*, *biaxial*

stretching, dan *injection blow-molding processing*. Selain itu PLA juga memiliki sifat biokompatibilitas dan biodegradabilitas.

Setiap polimer memiliki berbagai turunan yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan spesifik, tak terkecuali *Polylactic Acid* (PLA). PLA, sebagai salah satu polimer berbasis biomassa yang paling populer, memiliki berbagai jenis yang dikembangkan untuk meningkatkan performa dan menyesuaikan sifat materialnya terhadap berbagai aplikasi. Beberapa varian PLA yang umum digunakan meliputi ePLA-HS, PLA+, ePLA-CF, dan ePLA-ST, yang masing-masing memiliki karakteristik unik untuk kebutuhan tertentu. Berikut merupakan keunggulan spesifikasi tiap turunan menurut (eSUN, n.d)

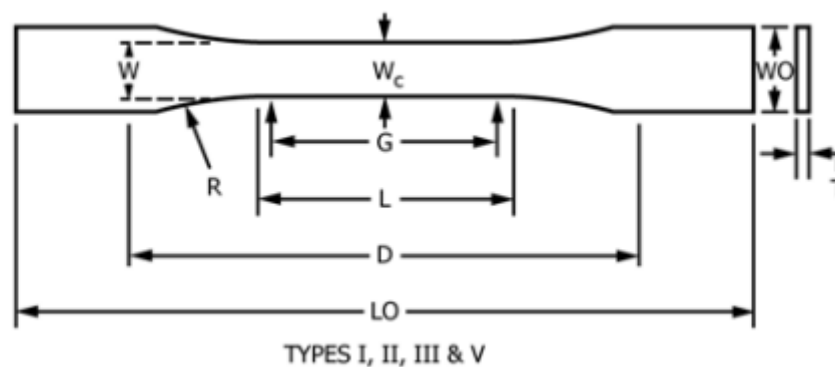
Tabel 2. 2 Perbandingan Spesifikasi Jenis PLA

Kriteria	3D Printing Filaments				
	ePLA-HS	ePLA+HS	ePLA-CF	PLA+	ePLA-ST
<i>Density</i>	1.24	1.24	1.21	1.23	1.25
<i>Heat Distortion Temp</i> (°C,045MPa)	53	54	53	53	52
<i>Melt Flow Index</i> (g/10min)	5.2(190°C/2.16kg)	5.2(190°C/2.16kg)	5.37(190°C/2.16kg)	5(190°C/2.16kg)	3.2(190°C/2.16kg)
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	60	59	39	63	34.3
<i>Elongation at Break</i> (%)	18.3	17.5	4.27	20	90
<i>Bending Strength</i> (MPa)	79	78	103	74	43
<i>Flexural Modulus</i> (MPa)	2700	2695	5005	1973	1477
<i>iZOD Impact Strength</i> (kJ/m ²)	4.3	4.1	5.08	9	63
<i>Weather Resistance</i>	4/10	4/10	4/10	4/10	4/10
<i>Printability</i>	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10
<i>Print Temp</i> (°C)	210-230	210-230	190-230	210-230	200-230
<i>Bed Temp</i> (°C)	45-60	45-60	45-60	45-60	45-60
<i>Fan Speed</i> (%)	100	100	100	100	100
<i>Print Speed</i> (mm/s)	50-350	50-350	50-300	40-350	40-100
<i>Heat Bed</i>	<i>Optional</i>	<i>Optional</i>	<i>Optional</i>	<i>Optional</i>	<i>Optional</i>
<i>Flexibility</i>	-	-	-	-	-

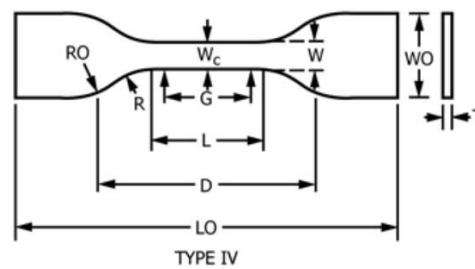
<i>Elasticity</i>	-	-	-	-	-
<i>Impact Resistance</i>	-	-	-	✓	-
<i>Soft</i>	-	-	-	-	-
<i>Complex</i>	-	-	-	-	-
<i>UV Resistance</i>	-	-	-	-	-
<i>Waterproof</i>	-	-	-	-	-
<i>Solubility</i>	-	-	-	-	-
<i>Heat Resistance</i>	-	-	-	-	-
<i>Chemical Resistance</i>	-	-	-	-	-
<i>Fatigue Resistance</i>	-	-	-	-	-
<i>Need to dry</i>	-	-	-	-	-
<i>Need a heat bed</i>	-	-	-	-	-

2.2.4 Spesimen

Spesimen merupakan sampel bagian material yang telah melalui proses pembentukan untuk menyesuaikan hasil pengujian yang akan dilakukan (Syukur & Carles, 2021). Pada penelitian ini, akan dibuat sebuah produk dengan acuan spesimen ASTM D-638, spesimen ini dipilih dikarenakan merupakan produk yang paling optimal untuk dilakukan pengujian untuk menentukan kualitas produk yang memiliki bahan plastik seperti ABS, PLA, dan PET. Berikut merupakan tampilan dari Spesimen ASTM D-638-22 yang digunakan sebagai acuan penelitian.



Gambar 2. 3 ASTM D-638-22 Type I, II, III, &V



Gambar 2. 4 ASTM D-638-22 Type IV

Tabel 2. 3 Perbandingan Dimensi ASTM

Dimensions	Spesimen ASTM D-638-22			
	type I mm(in)	type II mm(in)	type III mm(in)	type IV mm(in)
W-Width of narrow section	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	19 (0.75)
L-Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)
WO-Width overall, min	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)
LO-Length overall, min	165 (6.50)	183 (7.2)	246 (9.70)	115 (4.50)
G-Gage length	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	25 (1.00)
D-Distance between grips	115 (4.50)	135 (5.3)	115 (4.50)	65 (2.50)
R-Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)
RO-Outer radius	-	-	-	25 (1.00)
T-Thickness	3.2(0.13)	3.2(0.13)	3.2(0.13)	3.2(0.13)

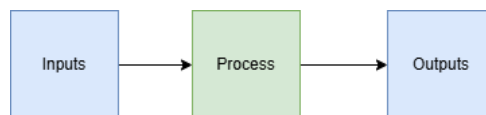
Spesimen D-628 Type I memiliki dimensi sebagai berikut: 3 mm (0.50 in.) wide, 7 mm (0.28 in.) thick, and 165 mm (6.5 in.) long, with a narrow section length of 57 mm (2.25 in.), a minimum overall width of 19 mm (0.75 in.), a gage length of 50 mm (2.00 in.), a grip distance of 115 mm (4.5 in.), and a fillet radius of 76 mm (3.00 in.) (ASTM, 2022).

2.2.5 Design of Experiments (DOE)

Design of Experiments (DOE) merupakan metodologi statistik yang digunakan untuk merencanakan, melaksanakan, menganalisis, dan menginterpretasikan pengujian terkontrol

guna memahami bagaimana berbagai faktor memengaruhi variabel respons. Asal-usul metodologi ini dapat ditelusuri kembali ke awal perkembangan statistik, khususnya pada eksperimen di bidang pertanian. Namun, kerangka modern DOE didefinisikan sebagai konsep-konsep inti seperti randomisasi, replikasi, dan blocking, serta mengembangkan analisis varians (ANOVA) untuk membandingkan beberapa kelompok data (Fisher, 1955)

Konsep dasar DOE digambarkan sebagai hubungan sistematis antara *input*, *process*, dan *output*.



Gambar 2. 5 Konsep Dasar DOE

Inputs dapat berupa *continous faktor kendali* atau *categorical faktor kendali*, yang masing-masing memiliki level tertentu. *Process* yaitu bagaimana cara mengolah data input yang ada, disini merujuk pada model eksperimen yang dapat dilakukan. Sedangkan *outputs* yaitu hasil yang didapatkan dari eksperimen. Terdapat beberapa model eksperimen pada DOE antara lain:

1. *Full Factorial Design*
2. *Fractional Factorial Design*
3. *Plackett-Burman Design*
4. *Box-Behnken Design*
5. *Central Composite Design*

2.2.6 *Response Surface Methodology*

Response Surface Methodology (RSM) adalah metode numerik dan statistik yang digunakan untuk memodelkan, menganalisis, dan mengoptimalkan respons yang dipengaruhi oleh beberapa faktor (Saad, et al., 2021). RSM pertama kali diperkenalkan oleh (Box & Wilson, 1951), metode ini awalnya dirancang untuk optimasi proses kimia, di mana peneliti perlu memahami efek interaksi antar variabel terhadap respon untuk menemukan kondisi optimal. Pada penelitian ini mereka mengembangkan model matematis kuadratik sebagai pendekatan awal.

Berdasarkan jurnal “*On the Experimental Attainment of Optimum Conditions*” oleh (Box & Wilson, 1951), dalam suatu eksperimen variabel *response* (n) bergantung pada *levels quantitative* (k) dari *factor* atau *variabel* $x_1, \dots, x_t, \dots, x_k$ yang dapat diukur dan dikontrol secara tepat. Kombinasi dari tingkat-tingkat faktor tersebut membentuk suatu ruang eksperimen berdimensi (k), yang disebut wilayah eksperimen. Respons tersebut dapat direpresentasikan

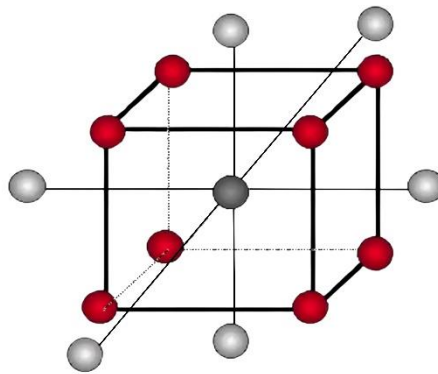
melalui fungsi matematis $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, namun karena adanya variabel tak terkendali, respons yang diamati (Y) dapat bervariasi dengan nilai rata-rata dan variansi tertentu. Tujuan utama RSM adalah untuk menemukan kombinasi faktor optimal yang menghasilkan nilai maksimum atau minimum dari fungsi respons, dengan jumlah eksperimen yang seminimal mungkin. Nilai maksimum dapat diartikan sebagai peningkatan kualitas, efisiensi, atau output proses, sementara nilai minimum sering dikaitkan dengan pengurangan biaya atau waktu produksi.

Response Surface Methodology mengoptimalkan kombinasi variabel guna memperoleh respons maksimum atau minimum. Metode ini melibatkan analisis varians (ANOVA), korelasi, dan regresi dalam proses analisisnya. Dalam desain eksperimen, RSM menggunakan beberapa desain faktorial yang mendominasi, termasuk titik tengah (*center point*) untuk mengevaluasi efek interaksi antara variabel. Keunggulan utama dari RSM adalah kemampuannya untuk menemukan variabel independen dan respons yang belum diketahui sebelumnya. Hal ini membuat RSM sangat berguna dalam proses penelitian dan pengembangan yang membutuhkan pendekatan eksperimental untuk mengidentifikasi solusi optimal (Sivarao, et al., 2014)

Secara umum *Response Surface Methodology* dapat dilakukan melalui 2 jenis utama *Design of Experiment*, yaitu *Central Composite Design* (CCD) dan *Box-Behnken Design* (BBD) (Veza, et al., 2023), berikut penjelasannya:

1. *Central Composite Design* (CCD)

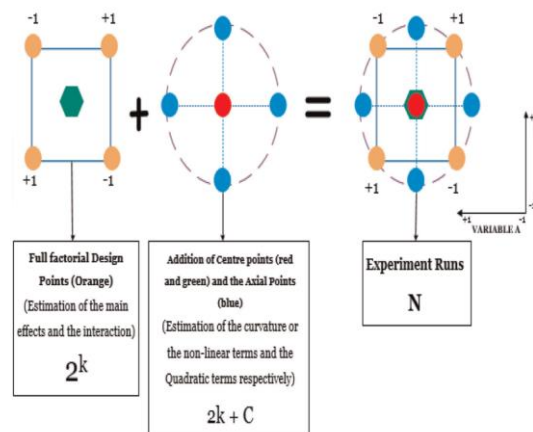
Salah satu desain RSM yang paling sering digunakan. Jenis ini sangat berguna dalam eksperimen kronologis karena dapat digunakan untuk membangun eksperimen faktorial sebelumnya dengan menambahkan titik aksial dan titik pusat. CCD dapat digambarkan melalui ilustrasi berupa kubus, di mana setiap sudut kubus mewakili titik-titik corner atau ujung. Selain itu, terdapat satu titik pusat (*central point*) yang terletak di tengah-tengah kubus. Selain titik pusat, CCD juga memiliki enam titik tambahan yang berada di luar kubus. Titik-titik ini disebut sebagai *axial points*, yaitu nilai-nilai baru yang berada di luar batas bawah dan batas atas yang telah ditentukan sebelumnya.



Gambar 2. 6 *Central Composite Design (CCD)*

Dalam CCD, setiap sisi kubus merepresentasikan faktor, di mana setiap faktor memiliki dua level: level terendah dan level tertinggi. Misalnya, jika terdapat tiga faktor, maka masing-masing faktor direpresentasikan melalui kombinasi level-level ini (dengan nilai rendah, tinggi, dan tengah). Selain itu, CCD juga mencakup nilai-nilai tambahan di luar level normal, seperti nilai di bawah level terendah ($-\alpha$) dan nilai di atas level tertinggi ($+\alpha$). Dengan demikian, CCD memungkinkan eksplorasi nilai di luar batas standar untuk mengevaluasi kemungkinan respons yang lebih optimal.

Karena pendekatan ini bersifat eksploratif, CCD dirancang untuk mengeksplorasi beberapa kemungkinan dari kombinasi faktor dalam eksperimen. Dengan memasukkan nilai-nilai di luar batas normal, CCD bertujuan mencari kemungkinan hasil respons yang lebih baik dibandingkan hanya menggunakan nilai-nilai level yang telah diketahui. Menurut (Njoku & Otisi, 2023) dalam CCD terdapat 3 titik penting yang mempengaruhi eksperimen, yaitu *factorial point*, *center point*, dan *axial point*. Berikut merupakan beberapa cara menentukan titik-titik penting yang diperlukan:



Gambar 2. 7 *CCD Points*

a. *Factorial Point*

Factorial point merupakan kombinasi level tinggi (+1) dan level rendah (-1) dari faktor-faktor yang digunakan dalam eksperimen. Titik ini berasal dari desain faktorial penuh (*full factorial design*) dengan 2^k percobaan, di mana k adalah jumlah faktor *continuous* dalam eksperimen. *Factorial points* digunakan untuk mengevaluasi efek utama dan interaksi antar faktor pada rentang pengamatan yang ditentukan.

b. *Center Point*

Center point adalah titik tengah dari level faktor yang digunakan untuk mengamati keberadaan nonlinearitas dalam model eksperimen. *Center point* juga berperan dalam memperkirakan error eksperimental, karena eksperimen pada titik ini biasanya diulang beberapa kali. Berikut merupakan persamaannya:

$$Center\ Point = \frac{Max+Min}{2} \quad (2.1)$$

c. *Axial Point*

Axial point/alpha (α) merupakan besaran titik aksial ekstrem baru dengan batas yang terbentuk dari level faktor faktorial. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung nilai α untuk setiap faktor:

$$\alpha = \sqrt[4]{F} \quad (2.2)$$

$$F = 2^k \quad (2.3)$$

Dimana:

F = *Factorial Point*

($2^k = full\ factorial$)

k = Jumlah faktor

Nominal dari aksial atas ($+\alpha$) dan aksial bawah ($-\alpha$) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$+\alpha = X + \left(\alpha \times \frac{High\ level - Low\ level}{2} \right)$$

(2.4)

$$-\alpha = X - \left(\alpha \times \frac{\text{High level} - \text{Low level}}{2} \right)$$

(2.5)

Dimana:

α = Nilai Aksial

X = *center point*

Setelah mendapatkan semua titik point yang dibutuhkan dapat dilanjutkan dengan menghitung *number of experiment runs*. Berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan:

$$N = (2^k + 2k + nC)$$

(2.6)

Dimana:

N = Jumlah eksperimen (*runs*)

k = Jumlah *continuous factor*

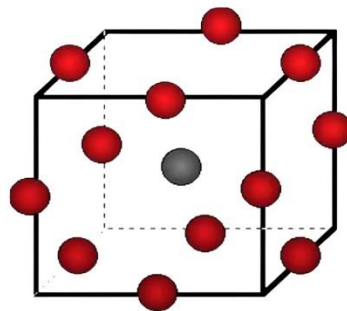
2^k = Jumlah *factorial point*

$2k$ = Jumlah *axial point*

nC = Jumlah *center point*

2. *Box-Behnken Design* (BBD)

Merupakan kategori desain permukaan respons yang tidak mencakup desain faktorial. Oleh karena itu, BBD tidak didasarkan pada desain faktorial penuh atau fraksional. Namun, *Box-Behnken* memfasilitasi prediksi koefisien pertama dan kedua yang efisien karena sering kali memiliki jumlah titik desain yang lebih kecil. Sebagai hasilnya, BBD bisa lebih hemat waktu dan biaya.



Gambar 2. 8 *Box-Behnken Design* (BBD)

Box-Behnken tidak mencakup nilai di luar batas bawah atau batas atas (tidak memiliki *challenger points*). Fokus utama BBD adalah pada nilai-nilai tengah (*midpoints*) dari setiap faktor. Desain ini memastikan bahwa setiap kombinasi faktor berpusat di sekitar nilai tengah, baik secara horizontal, vertikal, maupun diagonal. Sebagai contoh, jika ada tiga faktor, maka nilai tengah diambil dari setiap level rendah dan tinggi, serta nilai di pusat kubus.

Pendekatan BBD bersifat konfirmatori, yaitu untuk memastikan bahwa nilai-nilai level terendah dan tertinggi yang telah ditentukan sebelumnya sudah tepat. Dengan demikian, desain ini lebih ditujukan untuk memvalidasi hasil daripada mencari kemungkinan baru di luar batas standar. Berikut merupakan *Comparison Table* kedua pendekatan:

Tabel 2. 4 *Comparison Table RSM Method*

<i>Experimental Design</i>	<i>Central Composite Design (CCD)</i>	<i>Box Behnken Design (BBD)</i>
<i>Factorial Design Level</i>	$-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$	-1, 0, 1
<i>Number of Experimental Runs</i>	<i>Higher Runs</i>	<i>Lower Runs</i>
<i>Minimum Factor</i>	2	3
<i>Model Accuration</i>	Low	High
<i>Focus</i>	<i>Exploratory</i>	<i>Confirmatory</i>

2.2.7 *Regression*

Istilah *regression* pertama kali diperkenalkan oleh Francis Galton ketika meneliti hubungan antara tinggi badan ayah dan anak laki-lakinya. Dari penelitian ini ditemukan bahwa rata-rata tinggi anak-anak cenderung lebih dekat ke rata-rata populasi dibandingkan tinggi orang tua mereka. Dengan kata lain, terdapat suatu "*stepping back*" atau "*regression*" dari tinggi anak menuju rata-rata populasi. Dari sini fenomena ini disebut dengan "*regression to the mean*" (Yule, 1897). Dari penelitian awal tersebut kemudian dikembangkan model statistik regresi. Berdasarkan buku "*Linear Regression Analysis*" oleh George A.F. Seber, analisis regresi bertujuan untuk membangun model matematis yang menggambarkan atau menjelaskan hubungan antara variabel-variabel yang mungkin ada. Analisis Regresi dilakukan untuk mengungkap hubungan sebab-akibat dengan mempelajari hubungan antar variabel yaitu pada variabel hasil yang disebut variabel respons (*dependent variable*) dan ingin mengetahui bagaimana variabel tersebut bergantung pada satu atau lebih variabel penjelas (*independent variables*). (Seber & Lee, 2003)

Regresi menggambarkan bagaimana rata-rata suatu variabel (z) berubah terhadap variabel lainnya (y), membentuk suatu kurva yang disebut kurva regresi. Dalam banyak kasus, kurva ini tidak jauh berbeda dari garis lurus, sehingga dikenal sebagai regresi linear (Yule, 1897). Kemudian dari sinilah lahir pengembangan analisis regresi linear, yang selanjutnya diperluas menjadi regresi linear sederhana dan regresi linear berganda. bergantung pada jumlah variabel independen yang diamati. Namun, tidak semua hubungan antar variabel mengikuti pola linear. Dalam kondisi di mana hubungan antar variabel bersifat melengkung atau menunjukkan interaksi kompleks, pendekatan regresi non-linear lebih sesuai. Regresi *non-linear*, seperti model kuadratik atau interaksi dua arah, digunakan untuk menangkap pola hubungan yang lebih realistis dan akurat. Dalam melakukan analisis regresi linear berganda, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilalui, yaitu sebagai berikut:

1. Perhitungan Matrix

Langkah berikutnya yaitu melakukan perhitungan matrix A, B, dan H dengan rumus berikut:

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 & \sum x_3 \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1 x_2 & \sum x_1 x_3 \\ \sum x_2 & \sum x_2 x_1 & \sum x_2^2 & \sum x_1 x_3 \\ \sum x_3 & \sum x_1 x_3 & \sum x_1 x_3 & \sum x_3^2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum x_1 Y \\ \sum x_2 Y \\ \sum x_3 Y \end{bmatrix} \\ A & B & H & \end{matrix} \quad (2.7)$$

2. Menentukan nilai determinan

Setelah mendapatkan struktur setiap matrix, dapat dilanjutkan dengan menghitung nilai determinan suatu matrix menggunakan cara berikut:

$$\det A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{33} \\ a_{41} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

3. Menentukan nilai b_0, b_1, b_2, b_3

Setelah mendapatkan nilai-nilai determinan yang dibutuhkan dapat dilanjutkan dengan menghitung nilai b_0, b_1, b_2, b_3 dengan rumus berikut:

$$b_0 = \frac{\det A_1}{\det A}$$

$$b_1 = \frac{\det A_2}{\det A}$$

$$b_2 = \frac{\det A_3}{\det A}$$

$$b_3 = \frac{\det A_4}{\det A} \quad (2.9)$$

4. Menentukan persamaan regresi

Setelah nilai b_0 , b_1 , b_2 , b_3 diperoleh, dapat dimasukkan kedalam persamaan rumus regresi berikut:

$$Y = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \dots + b_k x_{ki} \quad (2.10)$$

Dalam *Response Surface Methodology* (RSM) analisis regresi dapat dibangun secara *linear* maupun *non-linear*, tergantung pada kompleksitas hubungan antar variabel yang ingin dimodelkan. Pada beberapa kasus, model RSM yang dibangun tidak hanya mempertimbangkan hubungan linear antara variabel independen dan variabel dependen, tetapi juga memasukkan komponen kuadrat (*square terms*) serta interaksi dua variabel (*two-way interaction terms*). Sehingga dapat memberikan pemodelan yang lebih akurat untuk melakukan optimasi. Pemilihan model bergantung pada R^2 yang tinggi untuk akurasi dan *Adjusted* R^2 untuk menghindari *overfitting*, terutama saat menggunakan model lebih kompleks seperti *full quadratic*. Dari segi perhitungan, regresi *non linear full quadratic* ini masih memiliki kesamaan, tetapi struktur matriksnya lebih besar dan nilai determinan yang dihitung juga lebih banyak karena harus mencakup efek linier, kuadrat, dan interaksi. Hingga akhirnya, diperoleh model regresi dalam bentuk persamaan menurut (Saad, et al., 2021) :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum b_{ij} x_i x_j + e \quad (2.11)$$

Dimana:

b_i = koefisien linear

b_{ii} = koefisien efek kuadrat

b_{ij} = koefisien interaksi dua faktor

x_i = nilai parameter proses input

e = error

2.2.8 Analysis of Variant (ANOVA)

Analisis Varians (ANOVA) adalah metode statistik untuk membandingkan rata-rata dari dua atau lebih kelompok. ANOVA termasuk pendekatan statistik parametrik yang biasa digunakan pada data interval atau rasio. Metode ini berguna untuk menguji hipotesis tentang perbedaan rata-rata dari beberapa kelompok sampel sekaligus, sambil meminimalkan risiko kesalahan.

Tujuan utama ANOVA adalah memudahkan pengguna dalam menganalisis kelompok data yang berbeda dan menentukan apakah perbedaan rata-rata antar kelompok tersebut signifikan (Dewi, et al., 2023). Berikut merupakan langkah pengujian yang perlu dilakukan:

1. Uji Normalitas

Uji normalitas yang paling sederhana dilakukan dengan membuat grafik distribusi frekuensi berdasarkan data yang ada. Pengujian ini bergantung pada kemampuan mengamati pola penyebaran data melalui plot. Metode uji *Kolmogorov-Smirnov* dipilih pada sample kecil untuk mengetahui apakah suatu data mengikuti distribusi tertentu ketika *mean* dan variansinya diketahui (Ahadi & Zain, 2023)

Langkah-langkah melakukan uji normalitas metode kolmogorov-Smirnov sebagai berikut:

- 1) Mengurutkan data terkecil hingga terbesar

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{2.12}$$

- 2) Menghitung Fungsi Distribusi Kumulatif Teoritis

$$F(x_i) = P(X \leq x_i) \tag{2.13}$$

- 3) Menghitung D^+ dan D^-

$$D^+ = \max \left(\left| \frac{i}{n} - F(x_i) \right| \right) \tag{2.14}$$

$$D^- = \max \left(\left| F(x_i) - \frac{i-1}{n} \right| \right) \tag{2.15}$$

- 4) Menentukan nilai maksimum D

$$D = \max(D^+, D^-) \tag{2.16}$$

- 5) Menentukan keputusan.

$$D > D_{tab}, \text{ maka Tolak } H_0 \tag{2.17}$$

2. Analisis Variansi

Hasil akhir dari analisis ANOVA adalah nilai F test atau F hitung. Nilai F Hitung ini yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai pada tabel f. Langkah-langkah perhitungan analisis variansi multi factor sebagai berikut:

1) Menghitung Sum of Square (SS) atau jumlah kuadrat (JK)

a. Total Sum of Square (SST) atau jumlah kuadrat total

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right] - CF \quad (2.18)$$

Dimana:

CF = Correction Factor = T^2/N

T = jumlah hasil keseluruhan pengamatan

N = jumlah pengamatan

b. Sum of Square atau jumlah kuadrat untuk suatu factor, misla factor A

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{A_i^2}{n_A} \right) \right] - CF \quad (2.19)$$

SS_A = sum of square faktor a

a_i = jumlah nilai pengamatan di bawah level ke-i faktor a

n_{a_i} = banyaknya data pengamatan di bawah level ke-i faktor a

a_i^2 = rata-rata nilai pengamatan di bawah level ke-i faktor a

k_A = banyaknya level faktor a

c. Sum of Square error atau jumlah kuadrat kesalahan

$$SS_e = SST - SSA - SSB - SS_{interaksi} \quad (2.20)$$

2) Menghitung *degree of freedom* (df) atau derajat bebas

3) Menghitung *mean of square* (Mq)

$$Mq_A = \frac{SSA}{df_A} \quad (2.21)$$

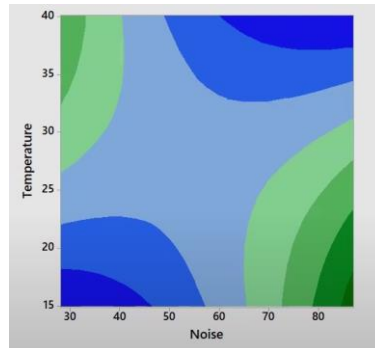
4) Menghitung *F ratio*

$$F_{ratio} = \frac{Mq}{Mq_e} \quad (2.22)$$

2.2.9 Surface Plot and Contour Plot

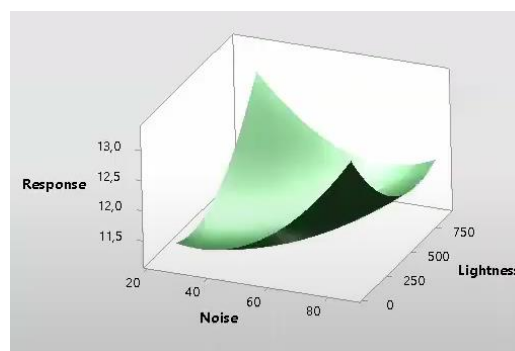
Menurut (Paksi, et al., 2023), *Contour plot* adalah representasi grafis yang menunjukkan hubungan antara tiga variabel numerik dalam bentuk visualisasi dua dimensi. Dua variabel independen x_1 dan x_2 diplot pada sumbu horizontal dan vertikal, sedangkan variabel dependen y divisualisasikan melalui level kontur. Kontur ini direpresentasikan sebagai kurva yang

menghubungkan titik-titik dengan nilai interpolasi respons y yang sama. Area di antara kurva kontur sering diberikan gradasi warna, tergantung pada rentang data dan nilai yang dianalisis, sehingga mempermudah interpretasi variasi respons.



Gambar 2. 9 *Contour Plot*

Sedangkan *Surface plot* adalah visualisasi tiga dimensi yang dirancang untuk menggambarkan hubungan antara dua variabel independen x_1 dan x_2 serta satu variabel dependen y . Plot ini terdiri dari serangkaian titik data koordinat dalam ruang tiga dimensi, di mana sumbu x_1 dan x_2 merepresentasikan variabel independen, sementara sumbu y menunjukkan respons atau output yang dihasilkan. Plot ini membentuk permukaan yang memungkinkan analisis pola hubungan kompleks antar variabel melalui perspektif spasial.



Gambar 2. 10 *Surface Plot*

2.2.10 *Response Optimizer*

Response Optimizer merupakan *tools* yang digunakan untuk menemukan nilai kombinasi *level* dari setiap faktor kendali yang menghasilkan target nilai variabel *respons* yang diinginkan (Hidayat, et al., 2024). *Tools* ini dilakukan dengan bantuan software Minitab.

Dibalik penggunaan *response optimizer* terdapat serangkaian perhitungan matematis dan algoritma optimasi untuk mendapatkan angka nominal kombinasi *level* dari setiap faktor kendali serta angka prediksi nilai variabel *respons* yang akan didapatkan.

Response Optimizer berbasis pada metode *Desirability Function Analysis* (DFA), pertama kali diperkenalkan oleh Harrington (1965) dan dikembangkan lebih lanjut oleh Derringer dan Suich. *Desirability Function Analysis* melibatkan transformasi dari setiap variabel respons estimasi Y_i menjadi nilai *desirability* d_i dimana nilainya berada dalam rentang $0 \leq d_i \leq 1$. Semakin meningkatnya Nilai d_i mendekati 1 maka dianggap semakin optimal nilai (keinginan) dari respons yang bersangkutan (Park & Park, 1998). Berikut merupakan rumus dasar perhitungan *desirability index*

- *Nominal the best*

$$d_i \begin{cases} \left(\frac{y_i - y_{min}}{T - y_{min}} \right)^s, & y_{min} \leq y_i \leq T, s \geq 0 \\ \left(\frac{y_i - y_{min}}{T - y_{min}} \right)^l, & T \leq y_i \leq y_{max} \geq 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (2.24)$$

- *Larger the better*

$$d_i \begin{cases} 0, & y_i \leq y_{min} \\ \left(\frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \right)^r, & y_{min} \leq y_i \leq y_{max}, r \geq 0 \\ 1, & y_i \geq y_{max} \end{cases} \quad (2.25)$$

- *Smaller the better*

$$d_i \begin{cases} 1, & y_i \leq y_{min} \\ \left(\frac{y_i - y_{max}}{y_{min} - y_{max}} \right)^r, & y_{min} \leq y_i \leq y_{max}, r \geq 0 \\ 0, & y_i \geq y_{max} \end{cases} \quad (2.26)$$

Dimana =

y = Nilai Respon

T = *Target value*

r = Tingkat Kepentingan

l = *largest*

s = *smallest*

d_i = *individual desirability*

Nilai *desirability* dari setiap *respons* kemudian digabungkan menjadi satu nilai komposit menggunakan rumus *composite desirability*, yang menentukan kombinasi faktor terbaik. Berikut merupakan rumus persamaan *composite desirability*:

$$d_c = \sqrt[w]{(d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \dots d_i^{w_i})} \quad (2.27)$$

Dimana =

d_c = *composite desirability*

w = *weight (bobot)*

Menurut (Derringer, 1980), *desirability function* digunakan untuk mengubah *multi-respons*, menjadi sebuah nilai tunggal D yang memiliki rentang antara 0 hingga 1. Nilai D ini memudahkan proses perbandingan dan evaluasi performa kombinasi parameter. Terdapat kategori umum untuk mengkategorikan tingkat optimalitas berdasarkan nilai *composite desirability*, yaitu:

- $D \geq 0.8$, dikategorikan sebagai *Excellent optimization*
- $0.7 \leq D < 0.8$, dikategorikan sebagai *Good optimization*
- $0.6 \leq D < 0.7$, dikategorikan sebagai *Moderate optimization*
- $D < 0.6$, dikategorikan sebagai *Poor optimization*

Setelah memperoleh nilai *composite desirability* tertinggi, kombinasi level faktor optimal dipilih dan diuji melalui eksperimen konfirmasi. Jika hasil valid, kombinasi tersebut dapat dikatakan sesuai antara nilai prediksi dengan nilai aktual.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi 2 tahap utama yaitu tahap *printing* dan tahap pengujian. Untuk tahapan pertama dilaksanakan di Laboratorium Sistem Manufaktur Terintegrasi, Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia. Kemudian untuk tahap pengujian akan dilakukan di Universitas Gajah Mada. Objek penelitian yang akan diteliti yaitu mesin *3D Printing Creality CR-10S Pro* dan sejumlah spesimen ASTM D-638. Alat Pengujian yaitu menggunakan *Universal Testing Machine*. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah filamen *Polylactic Acid (PLA)* dengan tipe ePLA+ HS dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3. 1 ePLA+ HS *Specifications*

Kriteria	Material
	ePLA+HS
<i>Density</i>	1.24
<i>Heat Distortion Temp</i> (°C,045MPa)	54
<i>Melt Flow Index</i> (g/10min)	5.2(190°C/2.16kg)
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	59
<i>Elongation at Break</i> (%)	17.5
<i>Bending Strength</i> (MPa)	78
<i>Flexural Modulus</i> (MPa)	2695
<i>iZOD Impact Strength</i> (kJ/m2)	4.1
<i>Weather Resistance</i>	4/10
<i>Printability</i>	9/10
<i>Print Temp</i> (°C)	210-230
<i>Bed Temp</i> (°C)	45-60
<i>Fan Speed</i> (%)	100
<i>Print Speed</i> (mm/s)	50-350
<i>Heat Bed</i>	Optional

3.2 Pengumpulan Data

Dalam suatu penelitian pengumpulan data sangatlah penting untuk dilakukan karena akan digunakan bahan dasar pengolahan informasi dan menghasilkan analisis serta kesimpulan dari penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini sumber data yang dimuat dibagi menjadi dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder.

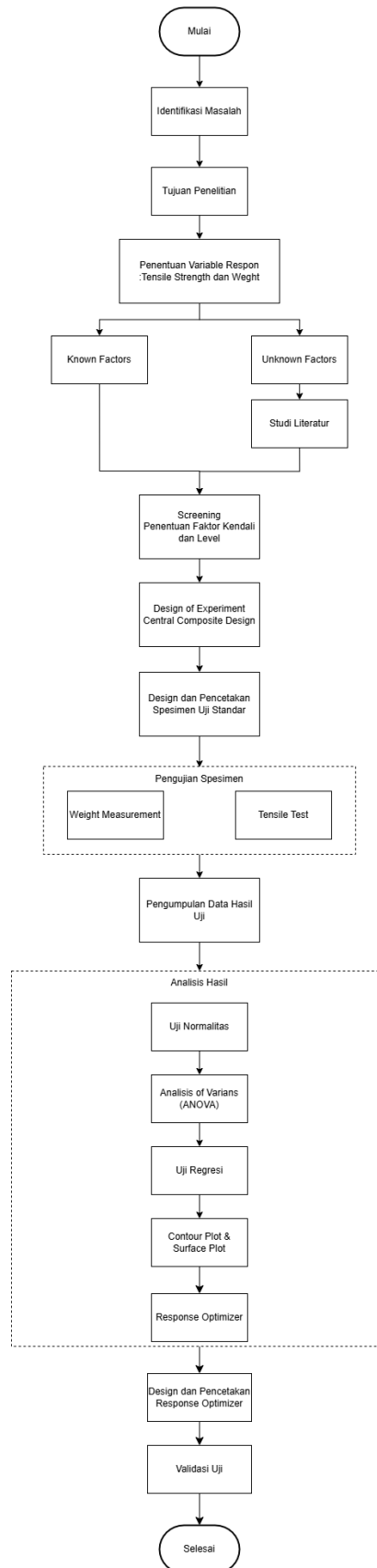
1. Data Primer

Data Primer merupakan data yang diperoleh secara langsung oleh peneliti melalui eksperimen maupun hasil pengujian yang telah dilakukan. Data ini nantinya akan dikumpulkan untuk menjawab rumusan masalah dalam penelitian. Pengumpulan data primer merupakan bagian internal dari proses penelitian yang sering kali diperlukan untuk mendukung pengambilan keputusan. Dalam penelitian ini, data primer yang digunakan mencakup hasil pengujian *Tensile Test* dan *Weight to strength ratio Measurement*.

2. Data Sekunder

Data sekunder adalah sekumpulan data yang diperoleh peneliti melalui sumber-sumber yang sudah ada sebelumnya. Data ini digunakan untuk memperkuat informasi yang telah diperoleh dari data primer dan biasanya bersumber dari bahan pustaka, literatur, penelitian terdahulu, buku, dan sebagainya. Pada penelitian ini data sekunder yang dimuat berupa data penentuan faktor kendali dan level eksperimen dari referensi berbagai jurnal penelitian sebelumnya.

3.3 Alur Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan keterangan dari setiap *step* diagram alir penelitian diatas:

1. Identifikasi Masalah

Tahapan awal yaitu menentukan masalah utama yang menjadi fokus penelitian. Identifikasi dilakukan dengan mengevaluasi kondisi aktual, mengidentifikasi gap dalam literatur saat ini, dan menghubungkannya dengan kebutuhan industri. Pada penelitian ini masalah yang diangkat yaitu bagaimana kombinasi parameter pencetakan yang paling optimal untuk menghasilkan *tensile strength* yang tinggi namun dengan *weight ratio* yang efisien.

2. Tujuan Penelitian

Menentukan tujuan yang spesifik, terukur, dapat dicapai, relevan, dan berbasis waktu. Tujuan pada penelitian ini yaitu untuk memperbaiki kinerja atau kualitas material PLA melalui optimalisasi parameter faktor dan level yang menghasilkan *tensile strength* yang optimal dengan pertimbangan *weight-to-strength ratio* yang efisien.

3. Penentuan Variabel Respon

Memilih variabel respon sebagai indikator keberhasilan penelitian berdasarkan rumusan masalah serta tujuan penelitian. Variabel respon yang terpilih pada penelitian ini yaitu *tensile strength* dan *weight-to-strength ratio*. Dari kedua variabel respon terpilih terdapat *known factors* dan *unknown factors* yang mempengaruhi.

4. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengeksplorasi secara mendalam *unknown factors* atau faktor yang belum diketahui pengaruhnya terhadap variabel respon.

5. *Screening* Penentuan Faktor kendali dan Level

Proses ini bertujuan memilih faktor signifikan yang berpotensi memengaruhi variabel respon. Penentuan level dilakukan dengan membagi faktor ke dalam beberapa kategori untuk menghasilkan variasi data yang relevan.

6. *Design Experiment of Central Composite Design (CCD)*

Eksperimen dirancang menggunakan metode *Central Composite Design (CCD)* dalam *Response Surface Methodology (RSM)*. CCD digunakan untuk mengoptimalkan respon dengan memanfaatkan model kuadratik yang dikembangkan dari data eksperimen.

7. Pencetakan Spesimen Uji Standar

Spesimen material disiapkan sesuai dengan standar pengujian internasional ASTM D-638 untuk pengujian *tensile test*. Banyaknya pencetakan disesuaikan dengan hasil perhitungan

jumlah eksperimen sesuai *Central Composite Design* (CCD) dalam *Response Surface Methodology* (RSM).

8. Pengujian Spesimen

Dilakukan pengujian *Tensile Test* dan *Weight-to-Strength Ratio Measurement* untuk mendapatkan data input variabel respon nantinya.

9. Pengumpulan Data Hasil Uji

Data hasil eksperimen mencakup hasil semua variabel respon, untuk memastikan validitas dan reliabilitas pengujian yang nantinya akan dilakukan proses analisis statistik menggunakan software.

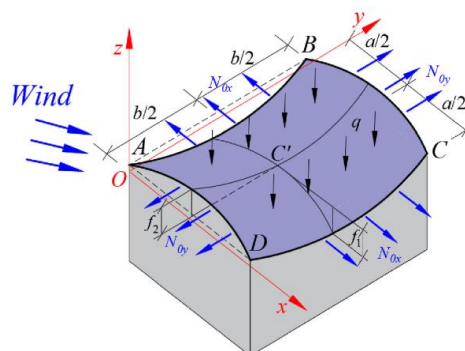
10. Analisa Hasil

Dari data pengujian akan diinput sebagai nilai variabel respon yang kemudian akan diolah pada software Minitab. Analisis statistik yang akan dilakukan pada Minitab antara lain regresi, *Analysis of Variant* (ANOVA), dan *Contour Plot & Surface Plot*. Selain itu disini akan dilakukan juga proses *Response Optimizer* menggunakan Minitab untuk menentukan kombinasi faktor optimal berdasarkan hasil analisis.

3.4 Perancangan Eksperimen Metode RSM

3.4.1 Penentuan Variabel Respons

Pengujian material menjadi langkah krusial untuk menilai kemampuan material dalam menghadapi berbagai kondisi *real* di dunia manufaktur. Material yang digunakan harus mampu memenuhi berbagai persyaratan mekanis sesuai dengan kebutuhannya. Pada studikamus *aeromodeling* menurut (Wang, et al., 2023), ketika sebuah unit objek terbang diudara terdapat *aerodynamic force* yang menyebabkan *nonlinear motion and stiffness*.



Gambar 3. 2 Aerodynamic Force

Aerodynamic force disini meliputi kombinasi dari *lift*, *gravity*, *drag*, dan *thrust*. *Lift* yang dihasilkan akibat perbedaan tekanan udara di atas dan bawah unit bekerja untuk mengangkat pesawat, sedangkan gaya *gravity* menariknya ke bawah, menciptakan distribusi tegangan yang dominan dalam bentuk *tensile stress* pada bagian atas struktur dan *compressive stress* pada bagian bawahnya. Secara horizontal, gaya *thrust* yang mendorong pesawat ke depan berlawanan dengan gaya *drag* resistansi udara yang memperlambat pesawat menghambat gerakannya ke belakang, menghasilkan tegangan tarik yang signifikan dalam arah longitudinal. Interaksi gaya-gaya ini membentuk kondisi tarik menarik yang dominan pada struktur *part*, sehingga parameter *tensile strength* menjadi sifat mekanis diutamakan disini.

Salah satu cara untuk dapat mengetahui sifat mekanis ketahanan terhadap daya tarik dapat melalui pengujian *tensile test*. *Tensile test* merupakan metode pengujian kekuatan material dengan memberikan gaya tarik hingga material mengalami kegagalan atau putus. Dalam pengujian ini, material diuji hingga mencapai batas ketahanannya terhadap gaya tarik (Zulfadly & Ghony, 2022). Kekuatan tarik dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima spesimen dengan luas penampang awalnya. Hasilnya dinyatakan dalam *pascal* (Pa atau psi). Jika spesimen mengalami *yield* (deformasi permanen) atau patah, kekuatan tariknya dihitung dan dicatat dalam tiga angka signifikan. Jika ada titik *yield* atau patah yang lebih kecil dari beban maksimum, tegangan tarik pada titik tersebut juga dapat dihitung dan dicatat. (ASTM, 2022). Dari sekian banyak persyaratan mekanis dapat diketahui melalui tahap pengujian, yaitu sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Variabel Respons

Test/Pengujian	Kekuatan Mekanis Material	Deskripsi
<i>Tensile Test</i>	<i>Tensile Strength/Maximum Stress</i>	Tegangan maksimum material sebelum putus
	<i>Maximum Strain</i>	Regangan maksimum sebelum material patah
	<i>Elastic Modulus</i>	Kekakuan material menahan deformasi elastis
	<i>Break Point Elongation</i>	Panjang tambahan material pada saat putus
<i>Weight Ratio</i>	<i>Density</i>	Massa per satuan volume material
	<i>Weight/Berat Material</i>	Berat aktual material

Dari tabel diatas dipilahlah variabel respon yaitu *Tensile Strength/Maximum Stress* dan *Weight/Berat* material. Variabel ini dipilih karena mencerminkan kemampuan material dalam menahan beban, fleksibilitas dalam aplikasi struktural dan efisiensi berat untuk aplikasi secara general maupun spesifik seperti aeromodel.

3.4.2 Penentuan Faktor kendali beserta levelnya

Menurut (Malpure, et al., 2024), dalam sebuah proses *3D Printing* terdapat 3 klasifikasi parameter yang dapat menjadi faktor kendali yang mempengaruhi response, yaitu sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Klasifikasi Parameter Faktor kendali

<i>Classification</i>	<i>Geometry Based</i>	<i>Process Based</i>	<i>Structural Based</i>
<i>Parameters</i>	1. <i>Nozzle size</i>	1. <i>Melting Temperature</i>	1. <i>Layer Thickness/Layer Height</i>
	2. <i>Filament size</i>	2. <i>Bed Heat</i>	2. <i>Infill Geometry/Infill Pattern</i>
		3. <i>Printing Speed</i>	3. <i>Infill Density</i>
			4. <i>Number of Layers</i>
			5. <i>Raster Angle</i>
			6. <i>Raster Gap</i>
			7. <i>Raster Width</i>

Pada tabel 3.3 disajikan data klasifikasi *setting print* dan parameter apa saja yang tergolong didalamnya. Terdapat 3 klasifikasi *setting print*, dan *Structural based* memiliki parameter *setting* terbanyak yang bisa diatur pada proses *printing*. *Structural based* memiliki pengaruh paling signifikan terhadap *mechanical performance* dibandingkan *geometrical* dan *process based* (Sani, et al., 2024). Dari klasifikasi tersebut, selanjutnya akan difokuskan pada klasifikasi *structural based* dengan dilakukan *Screening* untuk menentukan parameter yang paling berpengaruh terhadap variabel respons (*tensile strength*, dan *weight ratio*). Berikut merupakan hasilnya disajikan dalam Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 *Screening* Faktor kendali

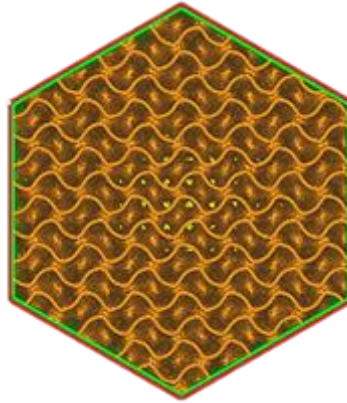
<i>Parameter</i>	<i>Tensile Strength</i>	<i>Weight Ratio</i>
<i>Layer Thickness/Layer Height</i>	✓	✓
<i>Infill Geometry/Infill Pattern</i>	✓	✓
<i>Infill Density</i>	✓	✓
<i>Number of Layers</i>	-	-
<i>Raster Angle</i>	✓	-
<i>Raster Gap</i>	-	✓
<i>Raster Width</i>	✓	-

Berdasarkan *screening table* diatas, penelitian ini memfokuskan pada tiga parameter utama yang dianggap paling relevan dan berpengaruh, yaitu *layer height/thickness*, *infill density*, dan *infill pattern*. Kemudian dari ketiganya dilakukan penentuan level (batas bawah, tengah, dan atas) sebagai dasar dalam perancangan eksperimen, yang dirumuskan sebagai berikut:

Menurut (Shergill, et al., 2023) *Layer thickness* sangat mempengaruhi, semakin tinggi nilainya maka sifat mekanis seperti *tensile strength* justru menurun, baik untuk PLA maupun ABS. *Layer Thickness* merupakan ketebalan pada setiap lapisan material yang disusun selama proses pencetakan. Penting untuk memastikan bahwa *layer height/thickness* sesuai dengan diameter *nozzle* yang digunakan, sebagian besar *software slicer* akan memberikan peringatan jika nilai yang dipilih terlalu besar atau terlalu kecil (Joseph, et al., 2023). Diameter *nozzle* yang digunakan yaitu 0,4 mm, berdasarkan *datasheet* ketentuan pencetakan 3d printing yang di publish oleh *Ultimaker Cura*, dalam mode *custom* dapat mengatur *layer height/thickness* secara manual ke nilai apapun. Namun sesuai aturan umum, disarankan untuk menjaga *layer height/thickness* antara 25% dan 75% dari ukuran *nozzle* (Ultimaker, 2023)

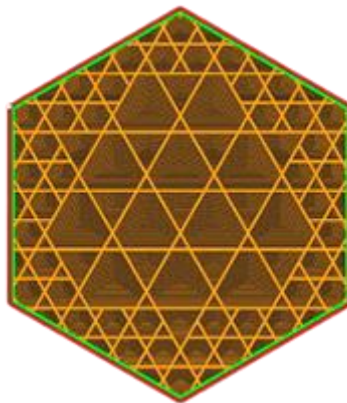
Menurut (Jatti, et al., 2024) *Tensile Strength* bisa mencapai nilai optimal ketika menggunakan kombinasi persentase *Infill Density* yang tinggi dengan *Layer Height* yang lebih rendah. Menentukan kombinasi setting manufaktur seperti *infill density* dan *infill pattern* yang tepat pada struktur *layer* dapat secara signifikan mempengaruhi bobot (*weight ratio*) dan ketahanan beban produk (*maksimal load*), sehingga meningkatkan *tensile* dan *bending strength* material (Dobos, et al., 2022). *Infill Density* yang lebih tinggi meningkatkan kekuatan dan mendukung permukaan atas dengan lebih baik, tetapi juga menambah penggunaan material, biaya, dan waktu pencetakan. Pada *infill density* yang tinggi (80-100%) dapat menyebabkan *overlapping* berlebihan serta tidak semua *infill pattern* dapat memberikan distribusi material yang optimal. (Ultimaker, 2024)

Menurut (Borah & Chandrasekaran, 2022) *Infill pattern* menjadi parameter yang paling berpengaruh terhadap kekuatan tarik maksimum dan persentase *elongation*, diikuti oleh *layer height* lalu *infill density*. Dengan menentukan *infill pattern* dan *infill percentage (density)* dapat berguna untuk mencapai keseimbangan antara *strength*, *weight*, dan *print time* (Ultimaker, 2024). *Infill Pattern* adalah pola struktur pencetakan model 3D, pada *software slicing Ultimaker Cura* terdapat beberapa pola yang tersedia. Setiap pola memiliki fungsi masing masing baik untuk pengembangan model secara umum maupun spesifik.



Gambar 3. 3 *Gyroid Pattern*

Gyroid, memiliki struktur sinusoidal tiga dimensi yang memberikan keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas (Ultimaker, 2024). Struktur sinusoidal sendiri mampu meningkatkan *inter-line tensile strength*, *tensile modulus*, dan *energy absorption* (Shang, et al., 2020). Memiliki *damage tolerance mechanism* yang efektif, yang menunjukkan pada ketahanan terhadap retakan/*crack* dan *energy dissipation*. Menghasilkan *energy absorption capacities* yang luar biasa. Sehingga, komponen yang dicetak kuat dan tahan lama. Dapat diterapkan untuk aplikasi dan pengembangan di berbagai bidang, seperti *aerospace*, *automotive*, *security*, dan *sports* (Shang, et al., 2023)



Gambar 3. 4 *Cubic Subdivision Pattern*

Cubic Subdivision, memiliki struktur berbentuk kubus serupa dengan *cubic infill*, tetapi ukuran kubus semakin besar menuju bagian tengah untuk menghemat material. Memberikan keseimbangan antara kekuatan, kualitas visual, dan efisiensi penggunaan material. Namun dikarenakan kompleksitasnya, waktu *slicing* akan menjadi lebih lama dibanding pola *cubic* standar (Ultimaker, 2024). Meskipun sedikit lebih padat dibanding *Cubic* biasa, pola ini tetap lebih ringan dibanding pola *solid* dan memberikan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih baik.

Berdasarkan pertimbangan dan ketentuan tersebut, ketiga parameter ini kemudian dijadikan sebagai variabel dalam desain eksperimen menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM). Adapun batasan nilai (level) untuk masing-masing parameter ditentukan sebagaimana disajikan dalam Tabel 3.5 berikut:

Tabel 3. 5 Faktor kendali Terpilih dan Batasan

Faktor	Parameter	Level	
		-1	1
<i>Continuous Factor</i>	<i>Layer Thickness</i>	0.16 mm	0.24 mm
	<i>Infill Density</i>	30 %	70 %
<i>Categorical Factor</i>	<i>Infill Pattern</i>	<i>Cubic Subdivision</i>	<i>Gyroid</i>

3.4.3 Penentuan Jumlah Eksperimen

Dalam penelitian ini, metode *Central Composite Design* (CCD) digunakan untuk menentukan jumlah eksperimen yang optimal. Berdasarkan faktor kendali dan level yang sudah ditentukan sebelumnya, jumlah eksperimen dihitung menggunakan rumus model CCD sebagai berikut:

1. Menentukan nilai *coded* α dan $-\alpha$

CCD terdiri dari tiga komponen utama, yaitu titik faktorial (*Factorial Points*), titik aksial (*Axial Points*), dan titik pusat (*Center Points*). Nilai α merupakan jarak titik aksial dari pusat desain. Dikarenakan terdapat 3 variabel faktor (*2 continuous factor & 1 categorical factor*), maka :

$$\begin{aligned}
 F &= 2^k \\
 &= 2^2 \\
 \alpha &= \sqrt[4]{F} \\
 &= \sqrt[4]{2^2} \\
 &= 1.414
 \end{aligned}$$

Dimana:

$F = \text{Factorial Point}$

($2^k = \text{full factorial}$)

$K = \text{Jumlah faktor}$

Dalam desain eksperimen *Central Composite Design* (CCD), nilai α digunakan untuk menentukan lokasi titik aksial pada *continuous factor* untuk mengeksplorasi hubungan kuadratik dalam model respons. Sedangkan *categorical factor* tidak dihitung dalam penentuan α karena sifatnya yang bersifat diskrit dan tidak memiliki skala numerik yang kontinu untuk

diperluas ke titik aksial, faktor ini hanya mempengaruhi jumlah kombinasi percobaan dengan memperbanyak variasi eksperimen berdasarkan setiap level yang dimilikinya. Dengan demikian, nilai *coded* ($-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$) untuk masing-masing faktor dalam desain eksperimen adalah -1.414, -1, 0, 1, 1.414

2. Menentukan nilai setiap variabel independen

Untuk mencari nilai variabel independen dari nilai *coded* (X_c), dapat menentukan beberapa nilai menggunakan rumus berikut:

$$\begin{aligned} \text{Distance} &= \text{Max} - \text{Min} \\ \text{Median Value} &= \frac{\text{Max} + \text{Min}}{2} \\ \alpha \text{ variable} &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \end{aligned}$$

2) *Layer Thickness*

$$\begin{aligned} \text{Distance} &= \text{Max} - \text{Min} \\ &= 0.2 - 0.16 \\ &= 0.08 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Median Value} &= \frac{\text{Max} + \text{Min}}{2} \\ &= \frac{0.24 + 0.16}{2} \\ &= 0.20 \end{aligned}$$

Kemudian setelah menentukan nilai *distance* dan *median value* maka langkah selanjutnya yaitu menentukan setiap *point variable* (*axial*, *factorial*, dan *central*).

$$\begin{aligned} \text{Axial Point } (-\alpha) &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\ &= 0.20 + \frac{-1.414 \times 0.08}{2} \\ &= 0.14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Factorial Point } (-1) &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\ &= 0.20 + \frac{-1 \times 0.08}{2} \\ &= 0.16 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{central point (0)} &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 0.20 + \frac{0 \times 0.08}{2} \\
 &= 0.20
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Factorial Point (1)} &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 0.20 + \frac{1 \times 0.08}{2} \\
 &= 0.24
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Axial Point } (\alpha) &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 0.20 + \frac{1.414 \times 0.08}{2} \\
 &= 0.26
 \end{aligned}$$

3) Infill Density

$$\begin{aligned}
 \text{Distance} &= \text{Max} - \text{Min} \\
 &= 70 - 30 \\
 &= 40
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Median Value} &= \frac{\text{Max} + \text{Min}}{2} \\
 &= \frac{70 + 30}{2} \\
 &= 50
 \end{aligned}$$

Kemudian setelah menentukan nilai *distance* dan *median value* maka langkah selanjutnya yaitu menentukan setiap point variable (*axial*, *factorial*, dan *central*).

$$\begin{aligned}
 \text{Axial Point } (-\alpha) &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 50 + \frac{-1.414 \times 40}{2} \\
 &= 22
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Factorial Point (-1)} &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 50 + \frac{-1 \times 40}{2} \\
 &= 30
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Central point (0)} &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 50 + \frac{0 \times 40}{2} \\
 &= 50
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Factorial Point (1)} &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 50 + \frac{1 \times 40}{2} \\
 &= 70
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Axial Point } (\alpha) &= \text{Median Value} + \frac{X_c \times \text{Distance}}{2} \\
 &= 50 + \frac{1.414 \times 40}{2} \\
 &= 78
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas,maka didapatkan hasil yang dapat disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 3. 6 *Level Faktor kendali Terpilih*

Factor	Parameter	Level Point				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
Continuous Factor	Layer Thickness	0.14 mm	0.16 mm	0.20 mm	0.24 mm	0.26 mm
	Infill Density	22%	30%	50%	70%	78%
Categorical Factor	Infill Pattern	Cubic subdivision			Gyroid	

Tabel 3.6 merupakan *faktor kendali table* yang digunakan dalam eksperimen nantinya. Pemilihan faktor dan level dalam penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan referensi dan batasan limit spesifikasi mesin 3D print FDM yang digunakan.

3. Menentukan Jumlah Eksperimen

Selanjutnya yaitu menentukan jumlah eksperimen menggunakan *software Minitab*, Pada proses ini, metode *Response Surface Methodology (RSM)* diterapkan dengan pendekatan *Central Composite Design (CCD)*, yang mencakup *cube points*, *axial points*, dan *center points* yang sudah ditentukan sebelumnya untuk mengeksplorasi hubungan antara faktor-faktor independen. Berikut merupakan perhitungannya:

$$\begin{aligned}
 N &= (2^k + 2k + nC) \times \text{Categorical factor} \\
 &= (2^2 + 2 \cdot 2 + 2) \times 2 \\
 &= (4 + 4 + 2) \times 2 \\
 &= 10 \times 2 \\
 &= 20
 \end{aligned}$$

Dimana:

N = Jumlah eksperimen (*runs*)

k = Jumlah *continuous factor*

2^k = Jumlah *factorial point*

$2k$ = Jumlah *axial point*

nC = Jumlah *center point*

Banyaknya jumlah *center point* mempengaruhi estimasi error eksperimen, semakin banyak *center point* maka akan semakin akurat estimasi error. Namun menyebabkan *overfitting model* dan menjadi suatu pemborosan karena meningkatkan jumlah eksperimen dengan beberapa model kombinasi yang sama. Oleh karena itu desain eksperimen dengan terlalu sedikit *center point* akan memiliki distribusi *varians* prediksi yang sangat tidak stabil, tetapi *varians* prediksi dengan cepat stabil dengan meningkatnya nilai nC . Menggunakan replikasi pada *center point* akan memberikan *varians* prediksi yang cukup stabil di seluruh wilayah desain (Montgomery, 2017)

Replikasi dalam eksperimen dapat digantikan dengan penggunaan replikasi hanya pada *center points*, di mana titik pusat yang dijalankan dalam blok yang sama dapat dianggap sebagai replikasi untuk menghitung estimasi kesalahan murni, sehingga memungkinkan analisis yang lebih akurat tanpa perlu melakukan replikasi penuh pada setiap kombinasi perlakuan.

Point Types	
Cube points:	8
Center points in cube:	10
Axial points:	8
Center points in axial:	0
Design Summary	
Factors:	3 Replicates: 1
Base runs:	26 Total runs: 26
Base blocks:	1 Total blocks: 1

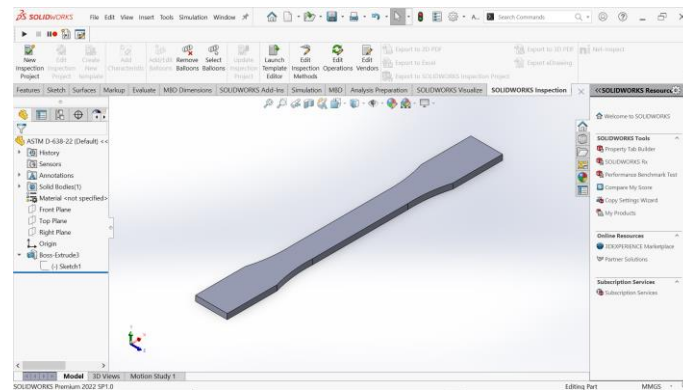
Gambar 3. 5 *Design of Experiment CCD by Minitab*

Tabel 3. 7 *Kombinasi Level Faktor kendali*

<i>No</i>	<i>Layer Thickness</i>	<i>Infill Density</i>	<i>Infill Patern</i>
1	0.2	78	<i>Cubic Subdivision</i>
2	0.2	50	<i>Cubic Subdivision</i>
3	0.2	22	<i>Gyroid</i>
4	0.14	50	<i>Gyroid</i>
5	0.24	30	<i>Gyroid</i>
6	0.2	22	<i>Cubic Subdivision</i>
7	0.26	50	<i>Cubic Subdivision</i>
8	0.16	70	<i>Cubic Subdivision</i>
9	0.16	70	<i>Gyroid</i>
10	0.2	50	<i>Gyroid</i>
11	0.24	70	<i>Cubic Subdivision</i>
12	0.16	30	<i>Gyroid</i>
13	0.16	30	<i>Cubic Subdivision</i>
14	0.24	30	<i>Cubic Subdivision</i>
15	0.26	50	<i>Gyroid</i>
16	0.24	70	<i>Gyroid</i>
17	0.14	50	<i>Cubic Subdivision</i>
18	0.2	78	<i>Gyroid</i>
19	0.2	50	<i>Cubic Subdivision</i>
20	0.2	50	<i>Gyroid</i>

3.4.4 *Design Spesimen*

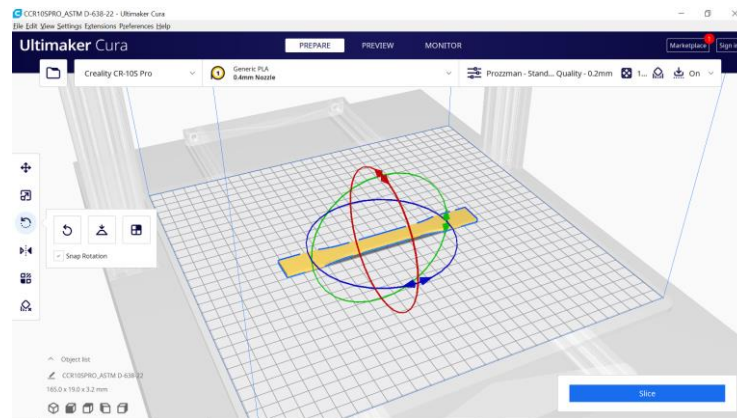
Pada tahap ini, dilakukan proses mendesain bentuk spesimen ASTM D-638-22 type 1. Dipilihnya jenis spesimen ASTM D-638-22 type 1, hal ini dikarenakan spesimen uji ASTM D-638-22 type 1 merupakan preferensi utama untuk pengujian *tensile test* material yang tergolong *rigid/semirigid plastics*. Proses pengerjaan desain spesimen dilakukan menggunakan *software Solidworks 2022*.



Gambar 3. 6 3D Design ASTM D-638 Type I

3.4.5 Slicing Data CAD

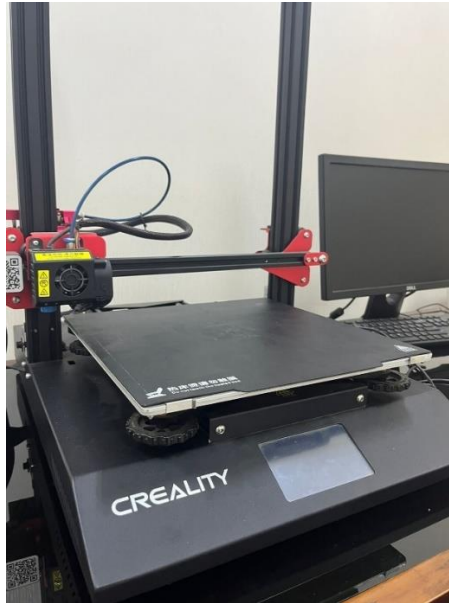
Setelah spesimen selesai didesain, file desain akan di-convert menggunakan *software slicing*, *Ultimaker Cura 4.11*. Tahapan ini bertujuan untuk mengintegrasikan parameter proses yang relevan serta mengonversi file desain ke dalam format *G-Code*, yang merupakan bahasa pemrograman standar untuk menginstruksikan mesin 3D Printing selama proses manufaktur berlangsung. Pada tahap ini juga dilakukan penyesuaian *variable* sesuai dengan parameter yang telah dirancang sebelumnya.



Gambar 3. 7 Slicing Data ASTM D-638 Type I

3.4.6 Pencetakan

Setelah selesai melakukan penyesuaian variabel parameter, selanjutnya yaitu masuk kedalam proses pencetakan. Sebelum melakukan proses pencetakan perlu diperhatikan beberapa hal *set up* mesin untuk memastikan proses pencetakan berjalan lancar. *Set up* yang perlu dilakukan antara lain, pemeriksaan material filament, kalibrasi *nozzle* dan *Bed Leveling*, serta *Pre-heating*. Setelah semua *set up* selesai, printer siap untuk memulai proses pencetakan.



Gambar 3. 8 Mesin 3D Print Creality 10s Pro

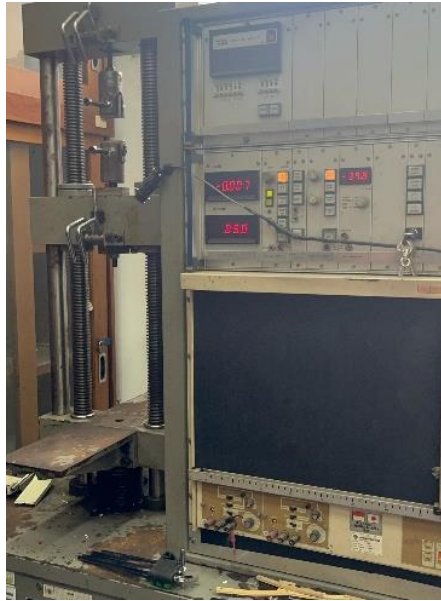
Selama proses pencetakan berlangsung, dilakukan *monitoring* hasil cetakan secara berkala, memastikan suhu ruangan tetap stabil, dan memastikan filament PLA tidak tersendat atau menegang selama proses pencetakan.

3.4.7 Pengujian Variabel Response

Dalam penelitian ini 2 pengujian yang berbeda, yaitu:

1. Tensile Test

Dilakukan pengujian *tensile test* menggunakan mesin *Universal Testing Machine* yang ada di *Engineering Materials Laboratory*, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gajahmada



Gambar 3. 9 *Universal Testing Machine*

2. *Weight to Strength ratio measurement*

Specific Strength (Weight-to-Strength Ratio) menunjukkan seberapa kuat suatu material dibandingkan dengan beratnya. Semakin tinggi nilai *specific strength*, semakin baik material tersebut dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi dengan bobot rendah

Specific Strength (Weight-to-Strength Ratio) dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{Specific Strength (Weight-to-Strength Ratio)} = \frac{\sigma}{\rho}$$

Dimana :

σ = *Tensile Strength* (MPa atau N/m²)

ρ = *Density* (kg/m³)

3.4.8 *Analisis Pengolahan Data Response Surface Methodology*

Dalam penelitian ini metode analisis yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Analisis Hasil Regresi
2. Analisis Hasil ANOVA
3. Analisis Hasil *Countour Plots* dan *Surface Plots*
4. *Response Optimizer*

BAB IV

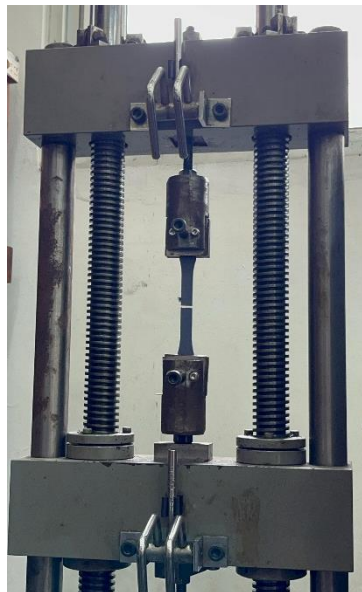
PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data Pengujian

Pada bagian ini, dilakukan pengumpulan data berdasarkan metode yang telah dijelaskan sebelumnya. Data yang diperoleh berasal dari hasil eksperimen atau pengujian langsung menggunakan mesin atau alat bantu yang sudah dijelaskan juga sebelumnya. Data hasil pengukuran berat (*weight*) menggunakan alat *digital scale-digipounds* dengan resolusi 0.1 gr, serta data hasil pengujian *tensile strength* menggunakan mesin *Universal Testing Machine*.



Gambar 4. 1 Pengukuran *Weight*



Gambar 4. 2 Proses *Tensile Test*

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian

<i>No</i>	<i>Infill Patern</i>	<i>Weight</i>

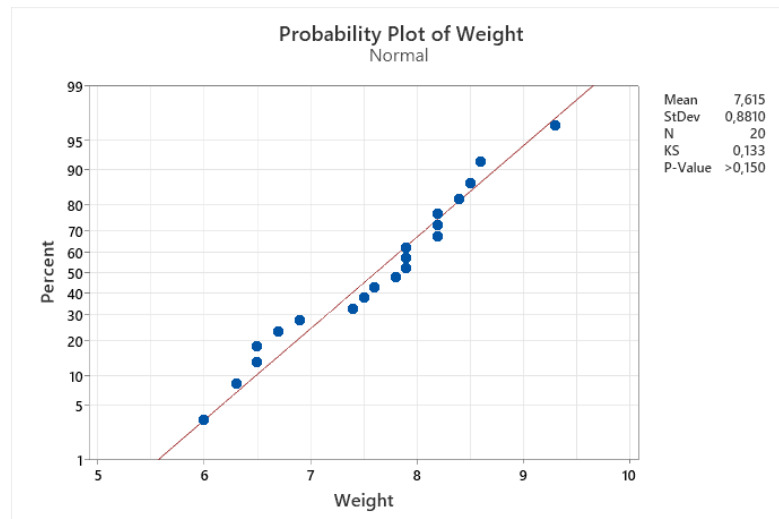
	<i>Layer Thickness</i>	<i>Infill Density</i>		<i>Tensile Strength</i>	
1	0.2	78	<i>Cubic Subdivision</i>	8.4	23.65
2	0.2	50	<i>Cubic Subdivision</i>	7.4	23.10
3	0.2	22	<i>Gyroid</i>	6.3	20.10
4	0.14	50	<i>Gyroid</i>	8.2	23.29
5	0.24	30	<i>Gyroid</i>	6.7	20.03
6	0.2	22	<i>Cubic Subdivision</i>	6	20.90
7	0.26	50	<i>Cubic Subdivision</i>	7.8	23.78
8	0.16	70	<i>Cubic Subdivision</i>	8.2	23.26
9	0.16	70	<i>Gyroid</i>	8.2	26.60
10	0.2	50	<i>Gyroid</i>	7.9	23.73
11	0.24	70	<i>Cubic Subdivision</i>	7.9	24.07
12	0.16	30	<i>Gyroid</i>	6.9	18.97
13	0.16	30	<i>Cubic Subdivision</i>	6,5	19.86
14	0.24	30	<i>Cubic Subdivision</i>	6.5	20.66
15	0.26	50	<i>Gyroid</i>	8.5	23.99
16	0.24	70	<i>Gyroid</i>	8.6	27.04
17	0.14	50	<i>Cubic Subdivision</i>	7.6	23.72
18	0.2	78	<i>Gyroid</i>	9.3	28.48
19	0.2	50	<i>Cubic Subdivision</i>	7.5	24.44
20	0.2	50	<i>Gyroid</i>	7.9	23.31

4.2 Pengolahan Data

Setelah data terkumpul, langkah selanjutnya yaitu melakukan pengolahan data sesuai dengan tahapan yang telah dijelaskan sebelumnya. Proses ini bertujuan untuk memperoleh informasi yang lebih bermakna dari data mentah yang diperoleh. Pengolahan data dilakukan dengan beberapa metode statistik yang sesuai, meliputi analisis regresi, ANOVA, visualisasi *contour plot* dan *surface plot*, serta *response optimizer*. Perhitungan dilakukan dengan bantuan *software* minitab.

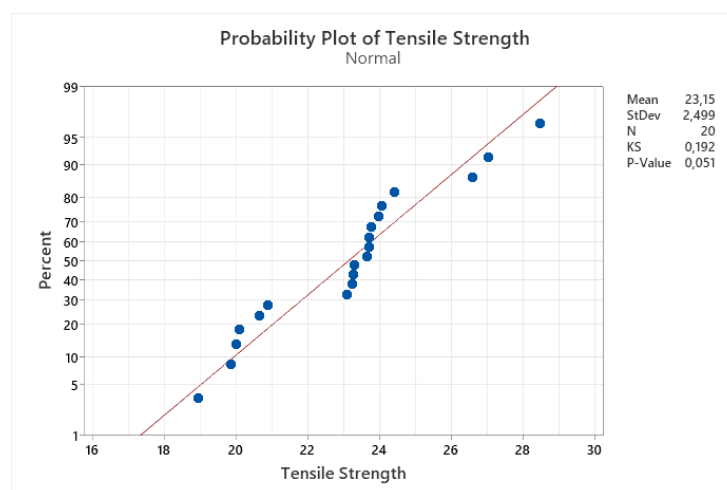
4.2.1 Uji Normalitas

Uji normalitas adalah uji untuk mengukur apakah data berdistribusi normal sehingga dapat dipakai dalam statistik parametrik. Pada penelitian ini dilakukan uji normalitas menggunakan bantuan *software* minitab. Berikut merupakan hasil pengujian dari *response Weight* dan *Tensile Strength*.



Gambar 4. 3 Hasil Uji Normalitas *Weight*

Berdasarkan uji normalitas menggunakan *Kolmogorov-Smirnov*, diperoleh *P-Value* $0.150 > 0.05$. Selain itu dari grafik *Probability Plot of Weight* diatas dapat dilihat bahwa titik-titik data mengikuti garis merah secara cukup baik tanpa pola yang mencolok dan tidak ada penyimpangan ekstrem yang tampak signifikan. Sehingga menunjukkan bahwa residual berdistribusi normal sehingga memenuhi asumsi statistik untuk analisis selanjutnya.



Gambar 4. 4 Hasil Uji Normalitas *Tensile Strength*

Selain itu pada *tensile strenght*, berdasarkan uji normalitas menggunakan *Kolmogorov-Smirnov*, diperoleh *P-Value* $0.051 > 0.05$. Selain itu dari grafik *Probability Plot of Weight* diatas dapat dilihat bahwa titik-titik data mengikuti garis merah secara cukup baik tanpa pola yang mencolok dan tidak ada penyimpangan ekstrem yang tampak signifikan. Sehingga menunjukkan bahwa residual berdistribusi normal sehingga memenuhi asumsi statistik untuk analisis selanjutnya.

4.2.2 Uji ANOVA

Setelah memastikan data residual berdistribusi normal, dilakukan uji selanjutnya yaitu uji *Analysis of Variant* (ANOVA) untuk menguji apakah model signifikan atau tidak serta mengidentifikasi faktor-faktor mana yang berpengaruh signifikan. Berikut merupakan hasil uji ANOVA yang telah dilakukan:

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	13,9560	1,7445	24,30	0,000
Linear	3	13,2569	4,4190	61,57	0,000
Layer Thickness	1	0,0249	0,0249	0,35	0,568
Infill Density	1	12,1275	12,1275	168,96	0,000
Infill Patern	1	1,1045	1,1045	15,39	0,002
Square	2	0,6072	0,3036	4,23	0,043
Layer Thickness*Layer Thickness	1	0,1091	0,1091	1,52	0,243
Infill Density*Infill Density	1	0,2338	0,2338	3,26	0,099
2-Way Interaction	3	0,0919	0,0306	0,43	0,738
Layer Thickness*Infill Density	1	0,0113	0,0113	0,16	0,700
Layer Thickness*Infill Patern	1	0,0249	0,0249	0,35	0,568
Infill Density*Infill Patern	1	0,0558	0,0558	0,78	0,397
Error	11	0,7895	0,0718		
Lack-of-Fit	9	0,7845	0,0872	34,87	0,028
Pure Error	2	0,0050	0,0025		
Total	19	14,7455			

Gambar 4. 5 Hasil Uji ANOVA *Weight*

Hasil ANOVA untuk *response weight* menunjukkan bahwa model memiliki *p-value* sebesar 0,000. Faktor dengan *p-value* signifikan meliputi *Infill Density* (*p-value* = 0,000) dan *Infill Pattern* (*p-value* = 0,002), sedangkan *Layer Thickness* memiliki *p-value* sebesar 0,568. Nilai *Lack-of-Fit* sebesar 0,028.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	108,070	13,5087	14,08	0,000
Linear	3	90,919	30,3064	31,59	0,000
Layer Thickness	1	1,062	1,0625	1,11	0,315
Infill Density	1	86,576	86,5763	90,24	0,000
Infill Patern	1	3,281	3,2805	3,42	0,091
Square	2	1,477	0,7383	0,77	0,487
Layer Thickness*Layer Thickness	1	0,242	0,2417	0,25	0,626
Infill Density*Infill Density	1	1,473	1,4733	1,54	0,241
2-Way Interaction	3	15,674	5,2247	5,45	0,015
Layer Thickness*Infill Density	1	0,047	0,0465	0,05	0,830
Layer Thickness*Infill Patern	1	0,042	0,0425	0,04	0,837
Infill Density*Infill Patern	1	15,585	15,5850	16,24	0,002
Error	11	10,554	0,9594		
Lack-of-Fit	9	9,568	1,0631	2,16	0,357
Pure Error	2	0,986	0,4930		
Total	19	118,624			

Gambar 4. 6 Hasil Uji ANOVA *Tensile Strength*

Hasil ANOVA untuk *response tensile strength* menunjukkan bahwa model memiliki *p-value* sebesar 0,000. Faktor dengan *p-value* signifikan adalah Infill Density (*p-value* = 0,000), sedangkan faktor lainnya memiliki *p-value* lebih besar dari 0,05. Nilai *Lack-of-Fit* sebesar 0,357.

4.2.3 Uji Regresi

Analisis Regresi dilakukan untuk menunjukkan hubungan antara variabel-variabel tersebut dengan respons melalui representasi dalam bentuk persamaan regresi. Pemodelan persamaan regresi nantinya akan dilakukan secara terpisah berdasarkan kategori faktor yang memiliki karakteristik berbeda secara signifikan agar hasil analisis lebih akurat dan representatif. Berikut merupakan hasilnya:

Regression Equation in Uncoded Units

Infill Patern

Cubic Subdivision Weight = 7,31 - 27,2 Layer Thickness + 0,0725 Infill Density
+ 62,1 Layer Thickness*Layer Thickness
- 0,000411 Infill Density*Infill Density
+ 0,047 Layer Thickness*Infill Density

Gyroid Weight = 7,10 - 25,3 Layer Thickness + 0,0784 Infill Density
+ 62,1 Layer Thickness*Layer Thickness
- 0,000411 Infill Density*Infill Density
+ 0,047 Layer Thickness*Infill Density

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,267911	94,65%	90,75%	79,85%

Gambar 4. 7 Hasil Uji Regresi *Weight*

Dari hasil model persamaan yang diperoleh, didapatkan tingkat keakuratan yang tinggi, ditunjukkan oleh nilai *R-squared* 94.65% dan *R-squared (Adjusted)* 90.75% yang menandakan hasil yang signifikan. Begitu juga untuk *tensile strenght*, berikut merupakan hasilnya

Regression Equation in Uncoded Units

Infill Patern

Cubic Subdivision Tensile Strength = 11,60 + 46,8 Layer Thickness + 0,189 Infill Density
- 92 Layer Thickness*Layer Thickness
- 0,001031 Infill Density*Infill Density
- 0,095 Layer Thickness*Infill Density

Gyroid Tensile Strength = 6,95 + 49,3 Layer Thickness + 0,289 Infill Density
- 92 Layer Thickness*Layer Thickness
- 0,001031 Infill Density*Infill Density
- 0,095 Layer Thickness*Infill Density

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,979503	91,10%	84,63%	69,36%

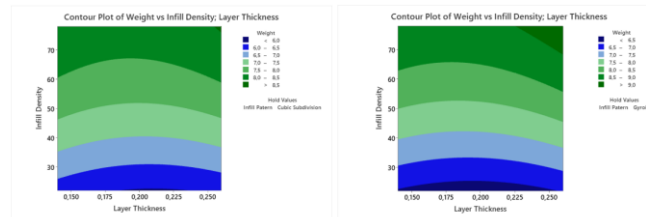
Gambar 4. 8 Hasil Uji Regresi *Tensile Strength*

Dari hasil model persamaan yang diperoleh, didapatkan tingkat keakuratan yang cukup tinggi, ditunjukkan oleh nilai *R-squared* 91.10% dan *R-squared (Adjusted)* 84.63% yang menandakan hasil yang signifikan.

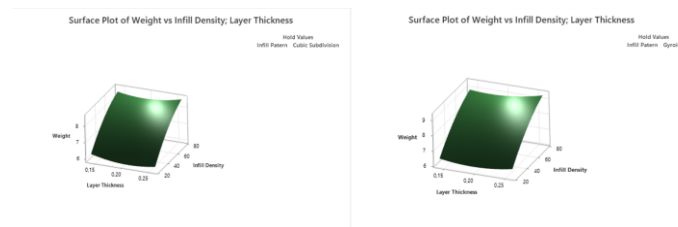
4.2.4 Pengolahan Contour Plot dan Surface Plot

Pada tahap ini, data hasil eksperimen diolah menggunakan *software Minitab* untuk memvisualisasikan hubungan antara faktor kendali dan variabel respons dalam bentuk *Contour Plot* dan *Surface Plot*. Plot ini digunakan untuk memahami pola perubahan respons terhadap kombinasi faktor, serta mengidentifikasi tren atau interaksi yang terjadi dalam proses optimasi. Berikut merupakan visualisasinya:

a. y_1 (Weight)



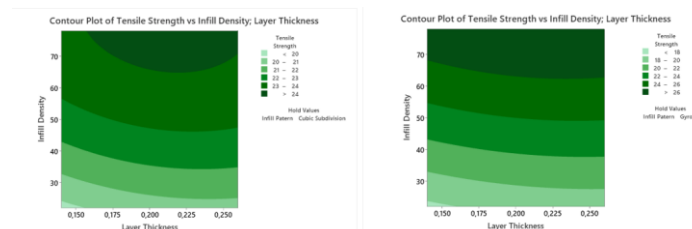
Gambar 4. 9 *Contour Plot Weight*



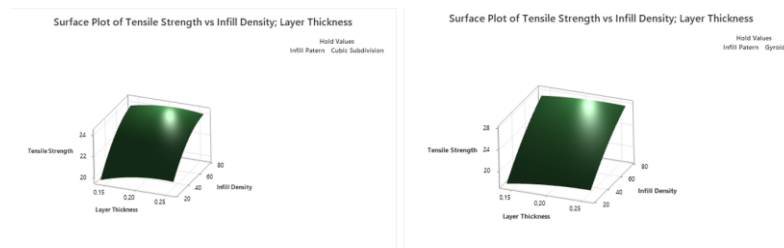
Gambar 4. 10 *Surface Plot Weight*

Dari kedua gambar *plot* dan *surface* diatas dapat diterjemahkan sebagai semakin besar *infill density* dan semakin tebal *layer thickness*, maka *weight* (berat) semakin meningkat. Hal ini ditunjukkan oleh pola warna pada *Contour Plot* dan bentuk permukaan pada *Surface Plot*, di mana area dengan nilai berat lebih tinggi berada pada kombinasi nilai *infill density* dan *layer thickness* yang lebih besar. Dimana *plot* dengan gradasi warna hijau menunjukkan daerah dengan nilai berat yang serupa, di mana semakin gelap warnanya menandakan berat yang lebih tinggi.

b. y_2 (Tensile Strength)



Gambar 4. 11 *Contour Plot Tensile Strength*



Gambar 4. 12 *Surface Plot Tensile Strength*

Dari *Contour Plot* dan *Surface Plot* diatas, terlihat bahwa daerah dengan warna lebih gelap menunjukkan nilai *Tensile Strength* yang lebih rendah, sedangkan warna yang lebih terang menunjukkan nilai yang lebih tinggi. Pada grafik ini, terlihat bahwa *Tensile Strength* meningkat dengan meningkatnya *Infill Density* dan menurun dengan meningkatnya *Layer Thickness*. semakin besar *infill density* dan semakin kecil *layer thickness*, maka *tensile strength* semakin tinggi.

4.2.5 *Pengolahan Response Optimizer*

Setelah visualisasi data dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengolahan *Response Optimizer* menggunakan Minitab. Hal ini dilakukan untuk menentukan kombinasi optimal dari faktor kendali sehingga mencapai nilai respons terbaik. Optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan model yang telah diperoleh dari analisis sebelumnya. Pada tahap ini, dilakukan optimasi terhadap *tensile strength* dan *weight* dengan tiga skenario perbandingan bobot, yaitu 50:50, 60:40, dan 70:30. Namun ketiga skenario ini tetap memiliki target *tensile strength* maksimal dan *weight* minimal. Optimasi ini bertujuan untuk menemukan kombinasi parameter yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara *tensile strength* dan *weight*.

Solution

Solution	Layer Thickness	Infill Density	Infill Patern	Tensile		
				Strength Fit	Weight Fit	Composite Desirability
1	0,216364	42,3636	Cubic Subdivision	22,6914	7,10104	0,714591

Gambar 4. 13 *Response Optimizer Skema 1*

Berdasarkan hasil optimasi skema 50:50, parameter optimal yang diperoleh meliputi *Layer Thickness* (0.216364 mm), *Infill Density* (42.3636%), dan *Infill Patern* berbentuk *Cubic Subdivision*. Kombinasi parameter ini menghasilkan prediksi *Tensile Strength* sebesar 22.6914 MPa dan *weight* sebesar 7.10104gram dengan nilai *desirability* sebesar 0.714591.

Solution

Solution	Layer Thickness	Infill Density	Infill Patern	Tensile		Composite Fit Desirability
				Strength Fit	Weight	
1	0,198182	57,0707	Gyroid	25,1194	8,20156	0,704123

Gambar 4. 14 *Response Optimizer Skema 2*

Kemudian hasil optimasi skema 60:40, parameter optimal yang diperoleh meliputi *Layer Thickness* (0.198182 mm), *Infill Density* (57.0707%), dan *Infill Pattern* berbentuk *Gyroid*. Kombinasi parameter ini menghasilkan prediksi *Tensile Strength* sebesar 25.12 MPa dan *weight* sebesar 8.2gram dengan nilai *desirability* sebesar 0.704123.

Solution

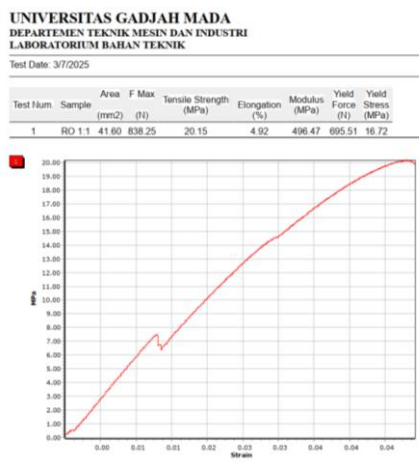
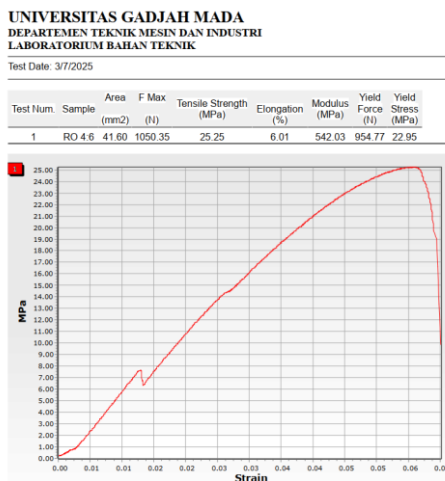
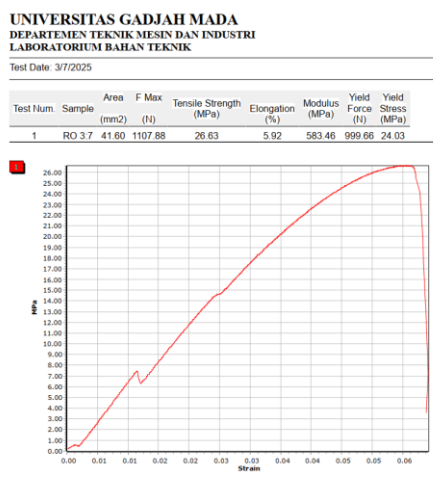
Solution	Layer Thickness	Infill Density	Infill Patern	Tensile		Composite Fit Desirability
				Strength Fit	Weight	
1	0,193333	65,5556	Gyroid	26,3026	8,50810	0,737055

Gambar 4. 15 *Response Optimizer Skema 3*

Serta hasil optimasi skema 70:30, parameter optimal yang diperoleh untuk komposisi 70:30 meliputi *Layer Thickness* (0.193333 mm), *Infill Density* (65.5556%), dan *Infill Pattern* berbentuk *Gyroid*. Kombinasi parameter ini menghasilkan prediksi *Tensile Strength* sebesar 26.63 MPa dan berat sebesar 8.5gram dengan nilai *desirability* sebesar 0.737055.

4.2.6 *Validasi Expert*

Berdasarkan pernyataan Bapak Safarun Najib Dwi Atmoko S.Pd. selaku Teknisi Laboratorium *Engineering Materials Laboratory*, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gajahmada. Beliau berspekulasi bahwa dalam konteks *aeromodeling*, bobot kepentingan antara *tensile strength* dan *weight* sama pentingnya karena untuk menentukan keseimbangan antara kekuatan yang tinggi dari material tersebut namun juga berat dari materialnya diupayakan serendah mungkin agar gaya yg digunakan untuk menerbangkan nya tidak terlalu besar. Untuk memverifikasi hasil ini, dilakukan pengujian pada semua *sample* hingga mendapatkan hasil sebagai berikut:

Gambar 4. 16 Validasi Uji *Tensile Strength* Skema 1Gambar 4. 17 Validasi Uji *Tensile Strength* Skema 2Gambar 4. 18 Validasi Uji *Tensile Strength* Skema 3

Tabel 4. 2 Hasil Validasi Uji *Tensile Strength* dan *Weight*

<i>Test Num</i>	<i>Response Optimizer</i>	<i>Area (mm²)</i>	<i>F max (N)</i>	<i>Elongation (%)</i>	<i>Modulus (Mpa)</i>	<i>Yield Force (N)</i>	<i>Yield Stress (Mpa)</i>	<i>Tensile Strength (Mpa)</i>	<i>Weight (gram)</i>
1	50 : 50	41.60	838.25	4.92	496.47	695.51	16.72	20.15	6.8
2	60 : 40	41.60	1050.35	6.01	542.03	954.77	22.95	25.25	8.3
3	70 : 30	41.60	1107.88	5.92	583.46	999.66	24.03	26.63	8.8

Dari tabel diatas kemudian akan dilakukan perhitungan akurasi perbandingan antara nilai prediksi dengan nilai aktual yang didapatkan serta akan dilakukan perhitungan nilai *specific strength* dengan membandingkan nilai *tensile strength* terhadap *weight sample* untuk menentukan *optimizer response* mana yang terbaik.

1. *Tensile Strength*

$$\text{Response Optimizer 1} = \frac{20.15}{22.69} \times 100\% = 88.85\%$$

$$\text{Response Optimizer 2} = \frac{25.12}{25.25} \times 100\% = 99.48\%$$

$$\text{Response Optimizer 3} = \frac{26.30}{26.63} \times 100\% = 98.76\%$$

2. *Weight*

$$\text{Response Optimizer 1} = \frac{6.8}{7.1} \times 100\% = 95.77\%$$

$$\text{Response Optimizer 2} = \frac{8.2}{8.3} \times 100\% = 98.80\%$$

$$\text{Response Optimizer 3} = \frac{8.5}{8.8} \times 100\% = 96.59\%$$

Dari data diatas dapat dilakukan perhitungan *Specific Strength (Weight-to-Strength Ratio)* dengan rumus berikut:

$$\text{Specific Strength (Weight-to-Strength Ratio)} = \frac{\sigma}{\rho} \text{ atau } \frac{\sigma}{m}$$

Dimana :

σ = *Tensile Strength* (MPa atau N/m²)

ρ = *Density* (kg/m³)

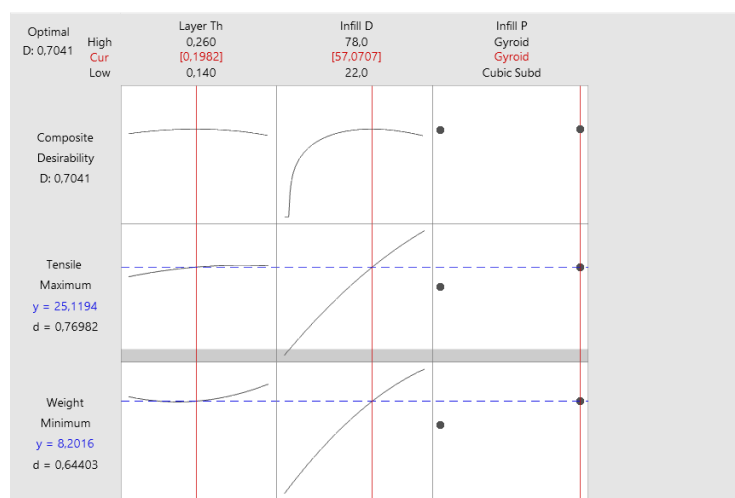
m = *Weight* (gram)

$$\frac{20.15 \text{ Mpa}}{6.8 \text{ g}} = 2.96 \text{ MPa/g}$$

$$\frac{25.25 \text{ Mpa}}{8.3 \text{ g}} = 3.04 \text{ MPa/g}$$

$$\frac{26.63 \text{ MPa}}{8.8 \text{ g}} = 3.03 \text{ MPa/g}$$

Dari skema terpilih diperoleh grafik *Desirability Function Plot* berikut untuk mengetahui bagaimana setiap faktor kendali (*Layer Thickness*, *Infill Density*, dan *Infill Pattern*) mempengaruhi variabel respon (*Tensile Strength* dan *Weight*) berdasarkan tujuan tertentu (maksimal, minimal, target tertentu).



Gambar 4. 19 *Desirability Function Plot*

Berdasarkan grafik diatas, *Layer thickness* tidak disarankan melebihi 0,26 mm untuk menjaga performa. *Infill density* yang lebih tinggi meningkatkan *tensile strength*, tetapi juga menambah berat, sehingga 78% menjadi pilihan optimal. Untuk *infill pattern*, *Gyroid* menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan *Cubic Subdivision*. Selain itu parameter ini dikatakan optimal karena nilai *composite desirability* sebesar 0,7041 berada dalam kategori *good optimization* (Derringer, 1980), di mana nilai $D > 0,7$ menandakan kombinasi parameter cukup memenuhi target performa multi-respon.

BAB V PEMBAHASAN

5.1 Analisis Hasil Normalitas

Berdasarkan uji normalitas menggunakan *Kolmogorov-Smirnov*, diperoleh beberapa hasil untuk kedua variable response sebagai berikut:

Tabel 5. 1 Perbandingan Hasil Uji Normalitas

Indikator	<i>Weight</i>	<i>Tensile Strength</i>
<i>Mean</i>	7.815	23.15
<i>Standar Deviasi</i>	0.8810	2.499
<i>KS</i>	0.133	0.192
<i>P-value</i>	> 0.150	0.051

Nilai *KS* untuk *weight* (0.133) dan *tensile strength* (0.192) berada di bawah batas umum 0.2, yang menunjukkan bahwa data tidak memiliki penyimpangan signifikan dari distribusi normal. Semakin besar nilai $KS > 0.2$ maka data menunjukkan penyimpangan yang lebih signifikan dari distribusi normal. Selanjutnya pada indikator standar deviasi *weight* sebesar 0.8810 lebih kecil dibandingkan *tensile strength* yang mencapai 2.499, mengindikasikan bahwa variasi data *tensile strength* lebih tinggi dibandingkan *weight*. Standar deviasi yang lebih tinggi menunjukkan data lebih tersebar dari rata-rata, sementara nilai yang lebih kecil menunjukkan data lebih terkonsentrasi.

Selain itu, *p-value* untuk *weight* lebih dari 0.150, yang berada di atas batas umum 0.05 dan 0.10, menunjukkan distribusi yang sangat mendekati normal. Sementara itu, *p-value* *tensile strength* sebesar 0.051 mendekati batas signifikansi 0.05, tetapi masih dapat diterima untuk analisis parametrik. Secara umum, data dianggap berdistribusi normal jika *p-value* > 0.05, sehingga kedua variabel ini tetap memenuhi asumsi normalitas dan dapat digunakan dalam analisis regresi atau ANOVA.

5.2 Analisis Hasil ANOVA

Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk menguji signifikansi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap *tensile strength* dan *weight*. Pada tahap ini, diuji hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara variabel independen terhadap variabel dependen. Jika *p-value* < 0.05, maka hipotesis nol ditolak, yang berarti faktor tersebut

berpengaruh signifikan terhadap respons. Model ANOVA yang digunakan yaitu *quadratic model* dimana analisis tidak hanya akan dilakukan berdasarkan model linear saja namun mempertimbangkan model *square* dan *2 way interaction factor* juga. Berikut merupakan analisis hasil uji ANOVA:

Tabel 5. 2 Faktor kendali Coded

Code	Faktor kendali
A	<i>Layer Thickness</i>
B	<i>Infill Density</i>
C	<i>Infill Patern</i>

1. Weight

Tabel 5. 3 Hasil Keputusan ANOVA Weight

Variasi	Parameter	P-Value	Keputusan
<i>Linear</i>	A	0.568	Tidak Signifikan
	B	0.000	Signifikan
	C	0.002	Signifikan
<i>Square</i>	A ²	0.243	Tidak Signifikan
	B ²	0.099	Tidak Signifikan
	A × B	0.738	Tidak Signifikan
<i>2-Way Interaction</i>	A × C	0.700	Tidak Signifikan
	B × C	0.568	Tidak Signifikan

Berdasarkan hasil analisis ANOVA, model secara keseluruhan menunjukkan signifikansi yang sangat tinggi (P-Value = 0,000), menandakan bahwa variabel-variabel dalam penelitian ini memiliki pengaruh terhadap *weight* hasil cetakan. Secara *linear*, faktor *Infill Density* (P-Value = 0,000) dan *Infill Pattern* (P-Value = 0,002) terbukti memiliki dampak yang signifikan terhadap *weight*, menunjukkan bahwa variasi dalam *Infill Density* dan *Infill Pattern* berperan penting dalam menentukan hasil akhir. Sementara itu, *square* atau kuadrat dari *Infill Density* (P-Value = 0,099) tidak signifikansi namun dalam rentang $0.05 < P\text{-Value} < 0.10$, yang mengindikasikan adanya kemungkinan hubungan non-linear yang dapat lebih dieksplorasi dengan pendekatan yang lebih mendetail.

Di sisi lain, meskipun variabel *Layer Thickness* ($P\text{-Value} = 0,568$) serta interaksi antar faktor tidak menunjukkan signifikansi yang kuat secara statistik, hal ini tidak serta-merta meniadakan pengaruhnya dalam hasil akhir. Ketidaksignifikanan statistik dapat disebabkan oleh faktor lain yang lebih berkontribusi sehingga pengaruhnya tertutupi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *Infill Density* dan *Infill Pattern* merupakan faktor dominan yang memengaruhi *weight*, sementara efek dari faktor lainnya dapat lebih diperinci melalui eksplorasi tambahan atau pendekatan optimasi lebih lanjut.

2. Tensile Strength

Tabel 5. 4 Hasil Keputusan ANOVA *Tensile Strength*

Variasi	Parameter	<i>P-Value</i>	Keputusan
<i>Linear</i>	<i>A</i>	0.315	Tidak Signifikan
	<i>B</i>	0.000	Signifikan
	<i>C</i>	0.091	Tidak Signifikan
<i>Square</i>	A^2	0.626	Tidak Signifikan
	B^2	0.241	Tidak Signifikan
<i>2-Way Interaction</i>	$A \times B$	0.830	Tidak Signifikan
	$A \times C$	0.837	Tidak Signifikan
	$B \times C$	0.002	Signifikan

Hasil analisis ANOVA untuk *Tensile Strength* menunjukkan bahwa faktor *Infill Density* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons dengan $P\text{-Value} = 0.000$, menandakan bahwa perubahan pada *infill density* memiliki dampak yang jelas terhadap *Tensile Strength*. Sementara itu, *Layer Thickness* ($P\text{-Value} = 0.315$) tidak menunjukkan pengaruh yang cukup kuat, sedangkan *Infill Pattern* ($P\text{-Value} = 0.091$) memiliki nilai pada rentang $0.05 < P\text{-Value} < 0.10$, yang dapat mengindikasikan adanya potensi pengaruh dalam skala tertentu.

Pada efek kuadratik, baik *Layer Thickness*² ($P\text{-Value} = 0.626$) maupun *Infill Density*² ($P\text{-Value} = 0.241$) tidak memberikan kontribusi yang berarti dalam model. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan respons tidak menunjukkan pola non-linear yang signifikan terhadap kedua faktor tersebut dalam rentang percobaan yang dilakukan. Di sisi lain, pada interaksi antar faktor, hasil menunjukkan bahwa *Infill Density* \times *Infill Pattern* ($P\text{-Value} = 0.002$) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *Tensile Strength*, yang mengindikasikan bahwa kombinasi kedua faktor ini berkontribusi secara nyata terhadap variasi *Tensile Strength*.

Sementara itu, interaksi lainnya seperti *Layer Thickness* \times *Infill Density* (P-Value = 0.830) dan *Layer Thickness* \times *Infill Pattern* (P-Value = 0.837) tidak menunjukkan hubungan yang signifikan.

5.3 Analisis Hasil Regresi

Dari beberapa model yang bisa dicoba dalam analisis regresi, model *non-linear full quadratic (square terms & two-way interaction terms)* menjadi model terbaik dikarenakan memiliki nilai indikator tertinggi diantara yang lain, dimana dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5. 5 Perbandingan Model Regresi

Model	Indikator	Weight	Tensile Strength
<i>non-linear full quadratic (square terms & two-way interaction terms)</i>	<i>R-squared (R²)</i>	94.65%	91.10%
	<i>adjusted R²</i>	90.75%	84.63%
	<i>R² prediktif</i>	79.85%	69.36%
<i>non-linear (square terms)</i>	<i>R-squared (R²)</i>	94.02%	77.89%
	<i>adjusted R²</i>	91.89%	69.99%
	<i>R² prediktif</i>	87.71%	53.70%
<i>non-linear (two-way interaction terms)</i>	<i>R-squared (R²)</i>	90.53%	89.86%
	<i>adjusted R²</i>	86.16%	85.18%
	<i>R² prediktif</i>	73.21%	74.56%
<i>linear</i>	<i>R-squared (R²)</i>	89.90 %	76.65%
	<i>adjusted R²</i>	88.01%	72.27%
	<i>R² prediktif</i>	83.15%	62.35%

Kemudian dari model *non-linear full quadratic (square terms & two-way interaction terms)* tersebut didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 5. 6 Perbandingan Hasil Uji Regresi

Indikator	Weight	Tensile Strength
<i>R-squared (R²)</i>	94.65%	91.10%
<i>adjusted R²</i>	90.75%	84.63%
<i>R² prediktif</i>	79.85%	69.36%
Regression	<i>Cubic</i>	11.60 + 46.8 A + 0.189 B
	<i>Subdivision</i>	- 92 A ²
		- 0.001031 B ²

Indikator	Weight	Tensile Strength
Gyroid	+ 0.047 $A \times B$	- 0.095 $A \times B$
	7.10 – 25.3 A + 0.0784 B	6.95 + 49.3 A + 0.289 B
	+ 62.1 A^2	- 92 A^2
	- 0.000411 B^2	- 0.001031 B^2
	+ 0.047 $A \times B$	- 0.095 $A \times B$

1. Weight

Analisis regresi untuk *Weight* menunjukkan bahwa model memiliki *R-squared* (R^2) sebesar 94,65%, yang mengindikasikan bahwa model persamaan mampu menjelaskan sebagian besar variabilitas dalam data. Nilai *adjusted R²* sebesar 90,75% tetap tinggi, menandakan bahwa model tetap stabil meskipun mempertimbangkan jumlah variabel prediktor. Sementara itu, *R² prediktif* sebesar 79,85% menunjukkan bahwa kemampuan model dalam memprediksi data baru sedikit lebih rendah. Hal ini dapat mengindikasikan adanya faktor-faktor lain di luar model yang masih berkontribusi terhadap variabilitas respons.

Perbedaan antar pola terlihat dari besarnya pengaruh masing-masing faktor kendali, di mana *Gyroid* menunjukkan efek yang sedikit lebih rendah terhadap *Layer Thickness* tetapi lebih responsif terhadap perubahan *Infill Density* dibandingkan *Cubic Subdivision*. pola *Cubic Subdivision* memiliki intercept yang lebih besar (7.31) dibanding *Gyroid* (7.10) yang berarti *Cubic Subdivision* cenderung lebih berat pada kondisi awal. Namun, *Cubic Subdivision* memiliki koefisien *Layer Thickness* yang lebih besar (-27.2 dibanding -25.3), sehingga mampu mengurangi berat dengan lebih signifikan seiring meningkatnya *layer thickness*. Selain itu, koefisien *Infill Density* pada *Cubic Subdivision* lebih kecil (+0.0725 dibanding +0.0784), sehingga peningkatan *infill density* lebih lambat menaikkan berat pada pola ini dibanding *Gyroid*.

2. Tensile Strength

Analisis regresi untuk *Tensile Strength* menunjukkan bahwa model memiliki *R-squared* (R^2) sebesar 91,10%, yang berarti model dapat menjelaskan sebagian besar variasi dalam data. Nilai *adjusted R²* sebesar 84,63% cukup kuat, menunjukkan bahwa model tidak terlalu dipengaruhi oleh jumlah variabel prediktor yang digunakan. Namun, *R² prediktif* sebesar 69,36% yang lebih rendah mengindikasikan bahwa akurasi prediksi model terhadap data baru lebih terbatas, kemungkinan karena adanya faktor lain yang belum dimasukkan dalam model.

Cubic Subdivision memiliki intercept yang lebih besar (11.60) dibanding *Gyroid* (6.95), sehingga pada kondisi awal *Cubic Subdivision* memiliki *tensile strength* yang lebih tinggi. Namun, *Gyroid* memiliki koefisien *Layer Thickness* (+49.3) dan *Infill Density* (+0.289) yang lebih besar dibanding *Cubic Subdivision* (+46.8 dan +0.189), menandakan bahwa *Gyroid* lebih efektif dalam meningkatkan *tensile strength* seiring bertambahnya *Layer Thickness* dan *Infill Density*.

5.4 Analisis Hasil *Countour Plot* dan *Surface Plot*

1. *Weight*

Contour Plot dan *Surface Plot* menunjukkan bagaimana *Layer Thickness* dan *Infill Density* memengaruhi *Weight* untuk dua *Infill Patern*, yaitu *Cubic Subdivision* dan *Gyroid*. Secara umum, *Cubic Subdivision* menghasilkan berat yang lebih rendah dibandingkan *Gyroid* pada kombinasi parameter yang sama. Pada *Contour Plot*, terlihat bahwa *Weight* berkisar antara 6.0 hingga 9.5 gram, dengan pola *Cubic Subdivision* memiliki nilai lebih rendah, terutama pada *Infill Density* di bawah 50% dan *Layer Thickness* di bawah 0.2 mm. Sementara itu, pola *Gyroid* cenderung menghasilkan bobot yang lebih tinggi, dengan perbedaan sekitar 0.5 – 1.0gram dibandingkan *Cubic Subdivision*.

Pada *Surface Plot*, visualisasi peningkatan *weight* semakin jelas. *Infill Density* berkontribusi lebih signifikan terhadap peningkatan *Weight*, terutama setelah melewati 40% *infill*, di mana perubahan warna dan kemiringan permukaan menunjukkan lonjakan bobot yang lebih besar. *Layer Thickness* juga memengaruhi *Weight*, tetapi dampaknya lebih kecil dibandingkan *Infill Density*. Perbedaan antara pola *Cubic Subdivision* dan *Gyroid* terlihat dari kemiringan permukaan, di mana *Gyroid* memiliki gradien lebih curam, menandakan bahwa peningkatan *Infill Density* berdampak lebih besar pada bobot akhir. *Cubic Subdivision* menjadi pilihan yang lebih optimal karena menghasilkan bobot lebih kecil dengan efisiensi material yang lebih baik. Sebaliknya, jika diperlukan struktur yang lebih padat dan kuat, pola *Gyroid* dapat menjadi pilihan meskipun memiliki konsekuensi peningkatan berat.

2. *Tensile Strength*

Berdasarkan *contour plot* dan *surface plot*, terdapat perbedaan yang signifikan antara *Infill Patern Cubic Subdivision* dan *Gyroid* dalam mempengaruhi *tensile strength*. Secara umum, pola *Gyroid* menunjukkan *tensile strength* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *Cubic Subdivision* pada seluruh rentang *infill density* dan *layer thickness*. Hal ini kemungkinan

disebabkan oleh struktur internal *Gyroid* yang lebih optimal dalam mendistribusikan beban, sehingga meningkatkan kekuatan tarik material.

Dari segi pengaruh variabel, *infill density* memiliki dampak yang lebih signifikan terhadap *tensile strength* dibandingkan dengan *layer thickness*. Semakin tinggi *infill density*, *tensile strength* cenderung meningkat untuk kedua pola *infill* yang diuji. Sementara itu, *layer thickness* yang lebih kecil cenderung menghasilkan *tensile strength* yang lebih tinggi, tetapi efeknya tidak sebesar pengaruh *infill density*. Untuk pola *Cubic Subdivision*, *tensile strength* berkisar antara <20 hingga >24, sedangkan pola *Gyroid* memiliki *tensile strength* yang lebih tinggi, berkisar antara <18 hingga >26. Dengan demikian, jika tujuan utama adalah memperoleh *tensile strength* yang lebih tinggi, maka pola *Gyroid* dengan *infill density* yang lebih besar menjadi pilihan yang lebih optimal.

5.5 Analisis Hasil *Response Optimizer*

Tabel 5. 7 Perbandingan Prediksi dan Aktual

Skema	Tensile Strength		Percentage (%)	Weight (gram)		Percentage (%)
	(Mpa)			Prediksi	Aktual	
	Prediksi	Aktual				
50 : 50	22.69	20.15	88.85	7.1	6.8	95.77
60 : 40	25.12	25.25	99.48	8.2	8.3	98.80
70 : 30	26.30	26.63	98.76	8.5	8.8	96.59

1. 50:50

Pada skema 50:50, *tensile strength* yang diprediksi memiliki akurasi sebesar 88.85%, yang berarti terdapat selisih sekitar 11.15% lebih buruk dari nilai aktual. Hal ini menunjukkan bahwa model cukup akurat, tetapi masih bisa ditingkatkan untuk mendapatkan hasil yang lebih presisi. Di sisi lain, prediksi *weight* memiliki akurasi yang jauh lebih tinggi, yaitu 95.77%, dengan selisih hanya 4.23% lebih baik dari nilai aktual.

2. 60:40

Pada skema 60:40, model menunjukkan akurasi yang sangat tinggi baik untuk *tensile strength* maupun berat. Prediksi *tensile strength* memiliki akurasi sebesar 99.48%, dengan selisih hanya 0.52% dari nilai aktual, menunjukkan bahwa model hampir sempurna dalam memprediksi

karakteristik ini. Begitu pula dengan prediksi berat, yang memiliki akurasi sebesar 98.80%, dengan selisih hanya 1.20% dari nilai aktual. Dengan tingkat akurasi yang tinggi untuk kedua indikator ini, skema 60:40 dapat dikatakan sebagai skema yang paling optimal dibandingkan skema lainnya. Model yang digunakan dalam skema ini sudah sangat baik, sehingga dapat dijadikan referensi utama untuk perhitungan prediksi yang lebih akurat.

3. 70:30

Pada skema 70:30, *tensile strength* memiliki akurasi sebesar 98.76%, dengan selisih 1.24% dari nilai aktual. Meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan skema 60:40, akurasi ini tetap berada dalam kategori sangat baik. Sementara itu, prediksi berat memiliki akurasi sebesar 96.59%, dengan selisih 3.41% dari nilai aktual. Meskipun hasilnya masih cukup akurat, prediksi berat pada skema ini sedikit lebih rendah dibandingkan skema sebelumnya. Secara keseluruhan, skema 70:30 tetap memiliki tingkat akurasi yang tinggi, tetapi jika dibandingkan dengan skema 60:40, skema ini sedikit kurang optimal terutama dalam prediksi berat. Namun, dengan selisih yang masih tergolong kecil, skema ini tetap dapat digunakan dengan tingkat kepercayaan yang tinggi.

Tabel 5. 8 Perbandingan Akhir

Indikator	50 : 50	60 : 40	70 : 30
<i>Desirability</i>	0.71	0.70	0.74
<i>Print Duration</i>	50 Minutes	69 Minutes	74 Minutes
<i>Tensile Strength</i>	20.15 Mpa	25.25 Mpa	26.63 Mpa
<i>Weight</i>	6.8 gram	8.3 gram	8.8 gram
<i>Specific Strength ratio</i>	2.96	3.04	3.03

Berdasarkan perhitungan *Specific Strength*, skema 60:40 memiliki nilai tertinggi sebesar 3.04 MPa/g, dibandingkan dengan skema 50:50 (2.96 MPa/g) dan 70:30 (3.03 MPa/g). *Specific Strength* menunjukkan efisiensi kekuatan terhadap berat, sehingga semakin tinggi nilainya, semakin optimal material dalam menghasilkan *tensile strength* tanpa meningkatkan berat secara signifikan. Dengan nilai tertinggi pada skema 60:40, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi ini memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan tarik dan bobot, menjadikannya pilihan yang paling optimal dalam penelitian ini.

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis sebelumnya, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil *Response Optimizer* terbaik yaitu pada skema 60:40 terbukti sebagai konfigurasi paling optimal yaitu pada kombinasi level faktor *Layer Thickness* (0.198182 mm), *Infill Density* (57.0707%), dan *Infill Pattern* berbentuk *Gyroid*.
2. Pada kombinasi level faktor untuk *response optimizer* terbaik menghasilkan *Tensile Strength* 25.25 Mpa dan *Weight* sebesar 8.3 gram. Dimana akurasi prediksi *tensile strength* dan *weight* masing-masing sebesar 99.48% dan 98.80%, serta *Specific Strength* tertinggi sebesar 3.04 MPa/g, menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan tarik dan bobot material. nilai *composite desirability* sebesar 0,7041 menunjukkan bahwa hasil masuk ke dalam kategori *Good optimization*.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, berikut merupakan saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperbanyak jumlah sampel yang akan digunakan. Apabila tetap menggunakan metode *Central Composite Design* (CCD) peneliti dapat memperbanyak jumlah *center point*, selain untuk menggantikan adanya replikasi hal ini dilakukan agar penerapan model *Full Quadratic* nantinya lebih akurat dan tidak mengalami *overfitting*
2. Penelitian selanjutnya disarankan tidak hanya fokus pada faktor kendali dalam cakupan klasifikasi *Structural Based* saja namun bisa mempertimbangkan variable faktor lain pada klasifikasi *Geometry Based* dan *Process Based*.
3. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan jenis filamen lain, seperti ABS, PA, atau material lainnya, untuk mengevaluasi apakah kombinasi optimal dalam penelitian ini juga berlaku pada berbagai jenis filamen. Dengan catatan, *specific strength* tetap perlu dilakukan dengan mempertimbangkan *density* masing-masing filamen, karena setiap jenis filamen memiliki nilai *density* yang berbeda, yang dapat memengaruhi efisiensi kekuatan terhadap berat material.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahadi, G. D. & Zain, N. N. L. E., 2023. The Simulation Study of Normality Test Using Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, and Shapiro-Wilk. *Eigen Mathematics Journal*, Volume 6.
- Ahmed, B. A. et al., 2023. Printing Parameter Optimization of Additive Manufactured PLA Using Taguchi Design of Experiment. *Polymers*.
- Algarni, M. & Ghazali, S., 2021. Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals*.
- Apriansyah, I., Zamheri, A. & Arifin, F., 2021. Peningkatan Akurasi Dimensi dan Tingkat Kekerasan Pada Filamen Esteeel Dengan Pendekatan Metode Taguchi. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan*, Volume 2.
- Ashby, M. F., 2011. *Materials Selection - The Basics. Materials Selection in Mechanical Design*. 4 ed. London: Elsevier.
- ASTM, I., 2017. *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, ASTM D790-17*, s.l.: ASTM International.
- ASTM, I., 2022. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D-638-22*, s.l.: International ASTM.
- Borah, J. & Chandrasekaran, 2022. Evaluation of tensile strength of 3D printed PLA component and Taguchi Optimization. *Neuro Quantology*, Volume 20.
- Bowo, F. P., Suzen, Z. S. & Oktriad, Y., 2021. Pengaruh Infill Geometry, Printing Speed Dan Nozzle Temperature Terhadap Kekuatan Impak Menggunakan Filamen ST PLA. *Jurnal Syntax Admiration*, Volume 2.
- Box, G. & Wilson, K., 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Volume XIII, No 1.
- Chowdhry, S., 2022. Improving Strength of the ABS 3D-Print Using RSM. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, Volume 9.
- Constantin, M. A., Nicușor-Alin, S., Marius, C. & Luliana, D., 2022. Influence of 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of the PLA Parts made by FDM Additive Manufacturing Process. *Engineering Innovations*, Volume 2, pp. 7-20.
- Derringer, G. a. S. R., 1980. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, Volume 12, pp. 214-219.
- Dewi, S. S. et al., 2023. ANALISIS PENERAPAN METODE ONE WAY ANOVA MENGGUAKAN ALAT STATISTIK SPSS. *JURNAL RISET AKUNTANSI SOEDIRMAN (JRAS)*, p. 124.
- Dimas, W., Maryanti, B. & Arifin, K., 2022. Analisis Perbandingan Kekuatan Tarik Hasil 3D Printing Dengan Filamen Berbahan Dasar ABS dan Nilon. *Jurnal Rekayasa Mesin dan Inovasi Teknologi*, Volume 3, pp. 209-213.

Dobos, ó., Hanon, M. M. & Oldal, I., 2022. Effect of infill density and pattern on the specific load capacity of FDM 3D-printed PLA multi-layer sandwich. *J Polym Eng*, pp. 118-128.

eSUN, n.d. *eSUN PLA+ Specifications*. [Online] Available at: <https://www.esun3d.com/id/news/7222/> [Accessed 5 January 2025].

Fisher, R., 1955. Statistical methods and scientific induction. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical*, Volume 7(1), pp. 69-78.

Ge Li, M. Z., Fei Xu, B. Y. X. L. X. M. L. T., Sun, F. & Li, Y., 2020. Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid. *molecules*.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M., 2021. *Additive Manufacturing Technologies*. 3 ed. ANSYS, Park City, USA: Springer Cham.

Hidayat, T. P., Sugioko, A. & Williana, C., 2024. Penentuan Setting Optimal Mesin Injection Moulding Menggunakan Metode Response Surface. *Jurnal Sains dan Teknologi* 25, pp. 5-12.

Hozdic, E., 2024. Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM- and SLA-Printed ABS Materials. *Applied Sciences*.

Irfani, M. Y. & Ramadhan, A., 2024. Komparasi Material Filamen 3d Printer Terhadap Hasil Kualitas Cetak Produk Mainan Eggball Submarine. *Jurnal REKAVASI*, Volume 12, pp. 23-34.

ISO/ASTM, 2021. *52900: Additive Manufacturing - General Principles - Fundamentals and vocabulary*, Geneva: International Organization for Standardization and ASTM International.

Jatti, V. S. et al., 2024. Optimization of tensile strength in 3D printed PLA parts via meta-heuristic approaches: a comparative study. *Frontiers in Material*.

Joseph, T. M. et al., 2023. 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 1015–1035.

Kholil, A., Syaefudin, E., Pinto, N. & Syaripuddin, S., 2022. Compression Strength Characteristics of ABS and PLA Materials Affected by Layer Thickness on FDM. *Journal of Physics: Conference Series*.

Kristiawan, R. B. et al., 2021. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, pp. 639-649.

Kumaresan, R. et al., 2022. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

Li, G. et al., 2020. Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid. *molecules*.

Liou, F. F., 2019. *Rapid Prototyping and Engineering Applications A Toolbox Prototype Development*. 2 ed. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.

Magri, A. E., Mabrouk, K. E., Vaudreuil, S. & Touhami, M. E., 2021. Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*.

- Malpure, A. P., Gule, O. R. & Mahajan, H. H., 2024. *Design and Optimization of 3D Printing Process Parameters*, s.l.: s.n.
- Montgomery, D. C., 2017. *Design and Analysis of Experiment*. 9 ed. Arizona: WILEY.
- Mushtaq, R. T. et al., 2023. Investigation and Optimization of Effects of 3D Printer Process Parameters on Performance Parameters. *Materials*.
- Nagy, M., D'Amico, C. & Medina, A. A. S., 2023. *Final Design Review*, California: s.n.
- Njoku, C. N. & Otisi, S. K., 2023. *Application of Central Composite Design with Design Expert v13 in Process Optimization*. s.l.:intechopen.
- Ogaili, A. A. F. et al., 2024. The Effect of Chopped Carbon Fibers on the Mechanical Properties and Fracture Toughness of 3D-Printed PLA Parts: An Experimental and Simulation Study. *Journal of Composite Science*.
- Paksi, D. S., Batubara, H. & Prawatya, Y. E., 2023. Optimalisasi Kekuatan Tarik Produk Drone Propellers Berbahan Material Filament PETG Pada Proses 3D Printing FDM dengan Metode Response Surface Methodology (RSM). *INTEGRATE: Industrial Engineering and Management System*, Volume 7, pp. 75-84.
- Park, S. H. & Park, J. O., 1998. Simultaneous Optimization of Multiple Responses Using a Weighted Desirability Function. *Quality Improvement Through Statistical Methods*, pp. 299-311.
- Rusnaenah, A., I. W. & Kurniasari, N. A., 2024. Edukasi Penggunaan Komposit Polimer ABS / Nanopartikel Untuk Meningkatkan Spesifikasi Pada Salah Satu Produk Komponen Mobil Core Tray. *Jurnal Serambi Engieering*, Volume 9, pp. 7616-7622.
- Saad, M. S. et al., 2021. Optimization of surface roughness in FDM 3D printer using response surface methodology, particle swarm optimization, and symbiotic organism search algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 5121-5137.
- Sani, A. R., Zolfagharian, A. & Kouzani, A. Z., 2024. Artificial Intelligence-Augmented Additive Manufacturing: Insights on Closed-Loop 3D Printing. *Advanced Intelligent Systems*, Volume 6.
- Seber, G. A. F. & Lee, A. J., 2003. *Linear Regression Analysis*. 2 ed. United State: Wiley Interscience .
- Shahrjerdi, A., Karamimoghadam, M. & Bodaghi, M., 2023. Enhancing Mechanical Properties of 3D-Printed PLAs via Optimization Process and Statistical Modeling. *Composites Science*.
- Shang, J. et al., 2020. Controllable inter-line bonding performance and fracture patterns of continuous fiber reinforced composites by sinusoidal-path 3D printing. *Composites Science and Technology* .
- Shang, J. et al., 2023. Z-direction performance and failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composites with sinusoidal structure. *Composites Science and Technology* .

- Shergill, K., Chen, Y. & Bull, S., 2023. An investigation into the layer thickness effect on the mechanical properties of additively manufactured polymers: PLA and ABS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 3651–3665.
- Sivarao, et al., 2014. Comparison between Taguchi Method and Response Surface Methodology (RSM) in Modelling CO2 Laser Machining. *Journal of Scientific and Industrial Research*.
- Suhayri, F. R. & Candra, O., 2021. Design and Build 3 Dimension Printer Using Smart LCD with Arduino Mega 2560. *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, Volume 4, pp. 224-231.
- Sultana, J. et al., 2024. Influences of 3D printing parameters on the mechanical properties of wood PLA filament: an experimental analysis by Taguchi method. *Progress in Additive Manufacturing*.
- Syrlybayev, D. et al., 2021. Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. *Polymers*, Volume 13, p. 1587.
- Syukur, M. A. & Carles, H., 2021. Penentuan Parameter Input Proses Pemesinan Milling Dan Gurdi Untuk Pembuatan Pencekam Spesimen Alat Uji Lelah Dengan Kekuatan Maksimum 370 Mpa. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Volume 7 Nomor 2, pp. 67-73.
- Ultimaker, 2023. *How to choose the right print settings*. *Ultimaker Support*. [Online] Available at: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667337576725> [Accessed 04 02 2025].
- Ultimaker, 2024. *Infill density and infill patterns*. *Ultimaker Support*. [Online] Available at: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667411002588> [Accessed 05 02 2025].
- Usmadi, 2020. PENGUJIAN PERSYARATAN ANALISIS (UJI HOMOGENITAS DAN UJI NORMALITAS). *Inovasi Pendidikan*.
- Veza, I., Spraggon, M., Fattah, R. & Idris, M., 2023. Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. *Results in Engineering*.
- Wang, T., Guo, K., Yang, Q. & Cheng, B., 2023. Estimation of wind-induced response of large membrane structures with nonlinear motion-induced aerodynamic force and nonlinear geometric stiffness. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*.
- Wicaksono, M. B. & Nugraha, F. K. A., 2022. Optimization of 3D Printing Parameters Using the Taguchi Method to Improve Dimensional Precision. *Jurnal Teknologi*, Volume 12, pp. 70-75.
- Wohlers-Associates, 2024. *Wohlers Report 2024: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*., Washington DC: Wohlers Associates.
- Yule, G. U., 1897. On the Theory of Correlation. *Journal of the Royal Statistical*, 60(4), pp. 812-854.

Zulfadly & Ghony, M. A., 2022. Variasi Ampere Terhadap Kekuatan Tarik Pada Hasil Pengelasan Dengan Posisi Down Hand. *Hexatech*, Volume 1.

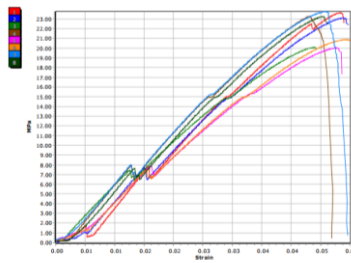
LAMPIRAN

A- Hasil Uji Tarik Sample

UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
LABORATORIUM BAHAN TEKNIK

Test Date: 3/5/2025

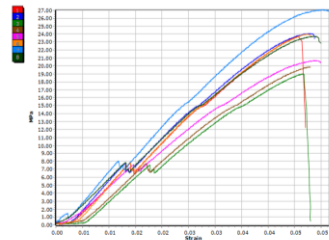
Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	SAMPLE 1	41.60	983.78	23.65	4.90	608.51	928.58	22.32
2	SAMPLE 2	41.60	960.89	23.10	4.98	657.66	908.95	21.80
3	SAMPLE 3	41.60	836.12	20.10	4.43	540.58	724.93	17.43
4	SAMPLE 4	41.60	968.98	23.29	4.71	600.69	941.70	22.54
5	SAMPLE 5	41.60	833.26	20.03	4.89	531.77	704.40	16.93
6	SAMPLE 6	41.60	869.50	20.90	5.00	520.69	737.48	17.73
7	SAMPLE 7	41.60	989.07	23.78	4.96	596.02	924.56	22.23
8	SAMPLE 8	41.60	967.43	23.26	4.64	600.69	907.81	21.82



UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
LABORATORIUM BAHAN TEKNIK

Test Date: 3/5/2025

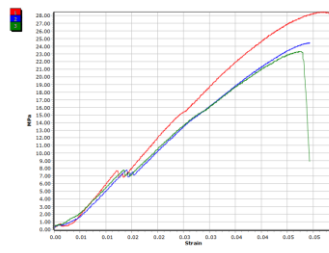
Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	SAMPLE 10	41.60	967.03	23.23	4.74	592.37	962.59	23.14
2	SAMPLE 11	41.60	1001.42	24.07	4.88	599.46	947.48	22.78
3	SAMPLE 12	41.60	789.01	18.97	4.80	544.11	691.76	16.39
4	SAMPLE 13	41.60	826.12	19.86	4.80	520.22	697.74	16.77
5	SAMPLE 14	41.60	850.40	20.66	4.59	542.29	723.44	17.61
6	SAMPLE 15	41.60	997.91	23.99	4.84	607.89	939.39	22.58
7	SAMPLE 16	41.60	1126.00	27.04	5.14	652.73	1054.14	25.34
8	SAMPLE 17	41.60	986.69	23.72	5.00	571.94	920.44	22.13



UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
LABORATORIUM BAHAN TEKNIK

Test Date: 3/5/2025

Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	SAMPLE 18	41.60	1184.58	28.48	5.33	673.53	1101.17	26.47
2	SAMPLE 19	41.60	1016.90	24.44	4.94	587.02	948.60	22.80
3	SAMPLE 20	41.60	969.63	23.31	4.94	567.53	889.95	21.38



Invoice Pengujian



Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Bulaksumur Caturtunggal, Depok Kab. Sleman

Daerah Istimewa Yogyakarta
NPWP/NPPKP : 83.908.869.7-542.000

Informasi Tagihan

No Tagihan / : #250310238018
invoice number

Kode Bayar / : 90403983
billing number

Tanggal Cetak / : 10 Maret 2025
billing date

Tanggal Jatuh / : 30 Juni 2025
payment due date

Kepada,
ZHAFIF RADITHYA NUGROHO
zhafifraditya21@gmail.com
081915420291

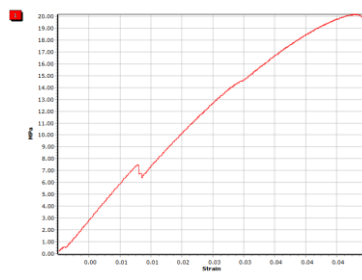
No	Keterangan	Qty	Nominal	Total
1	DTMI-Lab Bahan Teknik-Uji Tarik/Tekan/Bending Komposit & Polymer a.n ZHAFIF RADITHYA NUGROHO	21.00	40.000,00	840.000,00
	Dasar Pengenaan Pajak/ <i>Tax Base</i>			756.757,00
	PPH 23 2%			15.135,00
	PPN			83.243,00
	Total Tagihan			840.000,00

Terbilang : Delapan ratus empat puluh ribu rupiah.

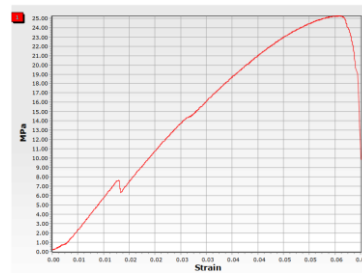


Hasil Uji Tarik dan Weight Response Optimizer

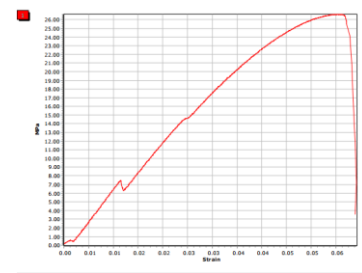
Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	RO 1.1	41.60	838.25	20.15	4.92	486.47	695.51	16.72



Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	RO 4.6	41.60	1050.35	25.25	6.01	542.03	954.77	22.95



Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	RO 3.7	41.60	1107.88	26.63	5.92	583.46	999.66	24.03





B - Rumus Manual

Pengolahan Regresi

1. *Convert data* dan pembuatan tabel bantu

Untuk melakukan perhitungan statistik seperti regresi diperlukan penyesuaian data, khususnya apabila terdapat variabel yang tergolong dalam *categorical variable*.

<i>No</i>	<i>Layer Thickness</i>	<i>Infill Density</i>	<i>Infill Patern</i>	<i>Weight</i>	<i>Tensile Strength</i>
1	0,2	78	0	8,4	30,2
2	0,2	50	0	7,4	25
3	0,2	22	1	6,3	28,5
4	0,14	50	1	6,8	31
5	0,24	30	1	7,9	29,2
6	0,2	22	0	6	24,5
7	0,26	50	0	8,3	23,8
8	0,16	70	0	7,2	28,1
9	0,16	70	1	7,3	30,3
10	0,2	50	1	7,5	29,5
11	0,24	70	0	9	26,8
12	0,16	30	1	6,5	27
13	0,16	30	0	6,3	22,5
14	0,24	30	0	7,8	23,7
15	0,26	50	1	8,5	32
16	0,24	70	1	9,1	33,5
17	0,14	50	0	6,7	25,6
18	0,2	78	1	8,5	32,8

No	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_1^2	y_2^2	x_1x_2	x_1x_3	x_1y_1	x_1y_2	x_2x_3	x_2y_1	x_2y_2	x_3y_1	x_3y_2
1	0,2	78	0	8,4	30,2	0,04	6084	0	70,56	912,04	15,60	0,00	1,68	6,04	0,00	655,20	2355,60	0	0
2	0,2	50	0	7,4	25	0,04	2500	0	54,76	625,00	10,00	0,00	1,48	5,00	0,00	370,00	1250,00	0	0
3	0,2	22	1	6,3	28,5	0,04	484	1	39,69	812,25	4,40	0,20	1,26	5,70	22,00	138,60	627,00	6,3	28,5
4	0,14	50	1	6,8	31	0,02	2500	1	46,24	961,00	7,00	0,14	0,95	4,34	50,00	340,00	1550,00	6,8	31
5	0,24	30	1	7,9	29,2	0,06	900	1	62,41	852,64	7,20	0,24	1,90	7,01	30,00	237,00	876,00	7,9	29,2
6	0,2	22	0	6	24,5	0,04	484	0	36,00	600,25	4,40	0,00	1,20	4,90	0,00	132,00	539,00	0	0
7	0,26	50	0	8,3	23,8	0,07	2500	0	68,89	566,44	13,00	0,00	2,16	6,19	0,00	415,00	1190,00	0	0
8	0,16	70	0	7,2	28,1	0,03	4900	0	51,84	789,61	11,20	0,00	1,15	4,50	0,00	504,00	1967,00	0	0
9	0,16	70	1	7,3	30,3	0,03	4900	1	53,29	918,09	11,20	0,16	1,17	4,85	70,00	511,00	2121,00	7,3	30,3
10	0,2	50	1	7,5	29,5	0,04	2500	1	56,25	870,25	10,00	0,20	1,50	5,90	50,00	375,00	1475,00	7,5	29,5
11	0,24	70	0	9	26,8	0,06	4900	0	81,00	718,24	16,80	0,00	2,16	6,43	0,00	630,00	1876,00	0	0
12	0,16	30	1	6,5	27	0,03	900	1	42,25	729,00	4,80	0,16	1,04	4,32	30,00	195,00	810,00	6,5	27
13	0,16	30	0	6,3	22,5	0,03	900	0	39,69	506,25	4,80	0,00	1,01	3,60	0,00	189,00	675,00	0	0
14	0,24	30	0	7,8	23,7	0,06	900	0	60,84	561,69	7,20	0,00	1,87	5,69	0,00	234,00	711,00	0	0
15	0,26	50	1	8,5	32	0,07	2500	1	72,25	1024,00	13,00	0,26	2,21	8,32	50,00	425,00	1600,00	8,5	32
16	0,24	70	1	9,1	33,5	0,06	4900	1	82,81	1122,25	16,80	0,24	2,18	8,04	70,00	637,00	2345,00	9,1	33,5
17	0,14	50	0	6,7	25,6	0,02	2500	0	44,89	655,36	7,00	0,00	0,94	3,58	0,00	335,00	1280,00	0	0
18	0,2	78	1	8,5	32,8	0,04	6084	1	72,25	1075,84	15,60	0,20	1,70	6,56	78,00	663,00	2558,40	8,5	32,8
Σ	3,4	822	9	127,1	473,8	0,7072	45252	9	965,35	13388,16	164,4	1,8	25,878	94,924	450	6330,6	23450,4	68,4	273,8

$$\begin{bmatrix} 18 & 3.4 & 822 & 9 \\ 3.4 & 0.7 & 164.4 & 1.8 \\ 822 & 164.4 & 45252 & 450 \\ 9 & 1.8 & 450 & 9 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 473.8 \\ 94.92 \\ 23450.4 \\ 273.8 \end{bmatrix}$$

Matrix A_1

$$\begin{bmatrix} 473.8 & 3.4 & 822 & 9 \\ 94.92 & 0.7 & 164.4 & 1.8 \\ 23450.4 & 164.4 & 45252 & 450 \\ 273.8 & 1.8 & 450 & 9 \end{bmatrix}$$

Matrix A_2

$$\begin{bmatrix} 18 & 473.8 & 822 & 9 \\ 3.4 & 94.92 & 164.4 & 1.8 \\ 822 & 23450.4 & 45252 & 450 \\ 9 & 273.8 & 450 & 9 \end{bmatrix}$$

Matrix A_3

$$\begin{bmatrix} 18 & 3.4 & 473.8 & 9 \\ 3.4 & 0.7 & 94.92 & 1.8 \\ 822 & 164.4 & 23450.4 & 450 \\ 9 & 1.8 & 273.8 & 9 \end{bmatrix}$$

Matrix A_4

$$\begin{bmatrix} 18 & 3.4 & 822 & 473.8 \\ 3.4 & 0.7 & 164.4 & 94.92 \\ 822 & 164.4 & 45252 & 23450.4 \\ 9 & 1.8 & 450 & 273.8 \end{bmatrix}$$

3. Menentukan nilai determinan

Setelah mendapatkan struktur setiap matrix, dapat dilanjutkan dengan menghitung nilai determinan suatu matrix menggunakan cara berikut:

$$\det A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{33} \\ a_{41} & a_{44} \end{bmatrix}$$

a. y_1 (Weight)

$$\det A = 31958,32$$

$$\det A_1 = 25915,02$$

$$\det A_2 = 728673,4$$

$$\det A_3 = 1281,83$$

$$\det A_4 = 7142,03$$

b. y_2 (Tensile Strength)

$$\det A = 31958,32$$

$$\det A_1 = 212221,07$$

$$\det A_2 = 1753138,94$$

$$\det A_3 = 4507,13$$

$$\det A_4 = 184037,80$$

4. Menentukan nilai b_0, b_1, b_2, b_3

Setelah mendapatkan nilai-nilai determinan yang dibutuhkan dapat dilanjutkan dengan menghitung nilai b_0, b_1, b_2, b_3 dengan rumus berikut:

$$b_0 = \frac{\det A_1}{\det A}$$

$$b_1 = \frac{\det A_2}{\det A}$$

$$b_2 = \frac{\det A_3}{\det A}$$

$$b_3 = \frac{\det A_4}{\det A}$$

a. y_1 (Weight)

$$b_0 = \frac{25915,02}{31958,32} = 0,81$$

$$b_1 = \frac{728673,4}{31958,32} = 22,80$$

$$b_2 = \frac{1281,83}{31958,32} = 0,04$$

$$b_3 = \frac{7142,03}{31958,32} = 0,22$$

b. y_2 (Tensile Strength)

$$b_0 = \frac{212221,07}{31958,32} = 6,64$$

$$b_1 = \frac{1753138,94}{31958,32} = 54,85$$

$$b_2 = \frac{4507,13}{31958,32} = 0,14$$

$$b_3 = \frac{184037,80}{31958,32} = 5,75$$

5. Menentukan persamaan regresi

Setelah nilai b_0, b_1, b_2, b_3 diperoleh, dapat dimasukkan kedalam persamaan rumus regresi berikut:

$$Y = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \dots + b_k x_{ki}$$

a. y_1 (Weight)

$$\hat{Y} = 0.81 + 22.8 x_1 + 0.04 x_2 + 0.22 x_3$$

Dari persamaan regresi diatas dapat dibaca atau diterjemahkan sebagai berikut:

- a. Semakin besar nilai *layer thickness* maka akan semakin besar *weight* atau beratnya, setiap kenaikan 1 mm *layer thickness* akan menambah *weight* 22.8gr
- b. Semakin padat *Infill density*, semakin berat hasil cetakan, setiap kenaikan 1% akan menambah 0.04gr
- c. *Infill Pattern Cubic Subdivission*, meningkatkan *weight* sebesar 0.22

b. y_2 (Tensile Strength)

$$\hat{Y} = 6.64 + 54.86 x_1 + 0.14 x_2 + 5.76 x_3$$

Dari persamaan regresi diatas dapat dibaca atau diterjemahkan sebagai berikut:

- d. Semakin besar nilai *layer thickness* maka akan semakin besar *tensile strength*, setiap kenaikan 1 mm *layer thickness* akan menambah *tensile strength* 54.86 mpa
- e. Semakin padat *Infill density*, semakin kuat hasil cetakan, setiap kenaikan 1% akan menambah 0.14 mpa
- f. *Infill Pattern Cubic Subdivission*, meningkatkan *tensile strength* sebesar 5.75 mpa

4.2.1 Pengolahan ANOVA

Setelah mendapatkan model persamaan regresi linear berganda, dilakukan analisis selanjutnya yaitu perhitungan *Analysis of Variant* (ANOVA) untuk menentukan apakah model regresi secara keseluruhan signifikan dalam menjelaskan variabilitas data. Berikut merupakan langkah perhitungan ANOVA:

1. Membuat bentuk uji hipotesis

Dalam ANOVA akan dilakukan perbandingan antara variabilitas yang dijelaskan oleh model regresi dengan variabilitas yang tidak terjelaskan (*error*) digunakan untuk menilai signifikansi statistik hubungan antara variabel independen dan variabel dependen menggunakan uji f. Untuk melakukan hal tersebut langkah awal yang perlu dilakukan yaitu dengan menentukan hipotesis.

H_0 = Tidak ada hubungan yang signifikan antara variabel independen dan variabel dependen
 H_1 = Terdapat ≥ 1 variabel independen yang memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel dependen

2. Menentukan *Level of Significance*

Level of significance (α) ditetapkan untuk mengontrol kemungkinan *Type I error* dalam uji ANOVA.

$$\text{Level of significance } (\alpha) = 0.05 \text{ (5\%)}$$

Nilai 0.05 umum digunakan karena memberikan keseimbangan antara risiko kesalahan dan kekuatan uji, sehingga cukup ketat untuk validitas hasil tetapi tetap memungkinkan deteksi efek yang signifikan.

3. Menentukan derajat kebebasan (*Degrees of Freedom/df*)

Langkah berikutnya yaitu menentukan derajat kebebasan (*Degrees of Freedom*) untuk menentukan distribusi sampel. Penentuan nilai df dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$df \text{ Regression} = k$$

$$df \text{ Error/Residual} = n - k - 1$$

$$df \text{ Total} = n - 1$$

Dimana =

k = Jumlah variabel independen

n = Jumlah *Sample*

Sehingga didapatkan nilai df sebagai berikut:

$$df \text{ Regression} = k$$

$$= 3$$

$$df \text{ Error/Residual} = n - k - 1$$

$$= 18 - 3 - 1$$

$$= 14$$

$$df \text{ Total} = n - 1$$

$$= 18 - 1$$

$$= 17$$

5. Analysis of Variant

Langkah selanjutnya yaitu dengan melengkapi tabel *Analysis of Variant*. Berikut merupakan tabel ANOVA yang perlu dilengkapi

<i>Sumber Variasi</i>	<i>SS</i> (<i>Sum of Squares</i>)	<i>df</i> (<i>Degee of Freedom</i>)	<i>MS</i> (<i>Mean Square</i>)	<i>F-Value</i>
<i>Regresi</i>	$\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	3	$MSR = \frac{SSR}{k}$	$F = \frac{MSR}{MSE}$
<i>Error</i>	$SSE = SST - SSR$	14	$MSE = \frac{SSE}{n - k - 1}$	
<i>Total</i>	$SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$	17		

a. y_1 (Weight)

g. *Sum of Squares Total (SST)*

$$SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$$

Rumus diatas dapat dijabarkan menjadi:

$$\sum(Y_i - \frac{\sum y_1}{n})^2$$

$$\frac{\sum y_1}{n} = \frac{127.1}{18} = 7.06$$

$$\text{Sample 1 } (Y_i - \bar{Y})^2 = (8.4 - 7.06)^2 = 1.79$$

$$\text{Sample 2 } (Y_i - \bar{Y})^2 = (7.4 - 7.06)^2 = 0.11$$

...

$$\text{Sample 18 } (Y_i - \bar{Y})^2 = (8.5 - 7.06)^2 = 2.07$$

Sehingga didapatkan nilai

$$SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$$

$$SST = 19.82$$

h. *Sum of Squares Regression (SSR)*

$$\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

Rumus diatas dapat dijabarkan menjadi:

$$\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

$$\sum(\hat{Y}_1 = 0.81 + 22.8 x_1 + 0.04 x_2 + 0.22 x_3) - \left(\frac{\sum y_1}{n}\right)^2$$

$$\text{Sample 1} = (\hat{Y}_1 = 0.81 + 22.8 \times 0.2 + 0.04 \times 78 + 0.22 \times 0) - (7.06)^2 = 2.07$$

$$\text{Sample 2} = (\hat{Y}_1 = 0.81 + 22.8 \times 0.2 + 0.04 \times 50 + 0.22 \times 0) - (7.06)^2 = 0.10$$

...

$$\text{Sample 18} = (\hat{Y}_1 = 0.81 + 22.8 \times 0.2 + 0.04 \times 78 + 0.22 \times 1) - (7.06)^2 = 2.76$$

Sehingga didapatkan nilai

$$SSR = \sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

$$SSR = 27.84$$

i. *Sum of Squares Error (SSE)*

$$SSE = SST - SSR$$

$$SSE = 19.82 - 27.84$$

$$= -8.03$$

j. *Mean Squares Regression (MSR)*

$$\begin{aligned} MSR &= \frac{SSR}{k} \\ &= \frac{27.84}{3} \\ &= 9.28 \end{aligned}$$

k. *Mean Square Error (MSE)*

$$\begin{aligned} MSE &= \frac{SSE}{n - k - 1} \\ &= \frac{-8.03}{18 - 3 - 1} \\ &= -0.57 \end{aligned}$$

l. *F-stats*

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

$$= \frac{9.28}{-0.57}$$

$$= -16.18$$

Kriteria pengujian

F hitung > F tabel = H0 ditolak, berlaku sebaliknya

Maka =

b. y_2 (Tensile Strength)

m. *Sum of Squares Total (SST)*

$$SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$$

Rumus diatas dapat dijabarkan menjadi:

$$\sum(Y_i - \frac{\sum y_1}{n})^2$$

$$\frac{\sum y_1}{n} = \frac{473.8}{18} = 26.32$$

$$\text{Sample 1 } (Y_i - \bar{Y})^2 = (30.2 - 26.32)^2 = 15.04$$

$$\text{Sample 2 } (Y_i - \bar{Y})^2 = (25 - 26.32)^2 = 1.75$$

...

$$\text{Sample 18 } (Y_i - \bar{Y})^2 = (32.8 - 26.32)^2 = 41.96$$

Sehingga didapatkan nilai

$$SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$$

$$SST = 238.87$$

n. *Sum of Squares Regression (SSR)*

$$\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

Rumus diatas dapat dijabarkan menjadi:

$$\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

$$\sum(\hat{Y}_2 = 6.64 + 54.86 x_1 + 0.14 x_2 + 5.76 x_3) - (\frac{\sum y_1}{n})^2$$

$$\text{Sample 1} = (\hat{Y}_2 = 6.64 + 54.86 \times 0.2 + 0.14 \times 78 + 5.76 \times 0) - (238.87))^2 = 5.26$$

$$\text{Sample 2} = (\hat{Y}_2 = 6.64 + 54.86 \times 0.2 + 0.14 \times 50 + 5.76 \times 0) - (238.87))^2 = 2.75$$

...

$$\text{Sample 18} = (\hat{Y}_2 = 6.64 + 54.86 \times 0.2 + 0.14 \times 78 + 5.76 \times 1) - (238.87))^2 = 64.78$$

Sehingga didapatkan nilai

$$SSR = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

$$SSR = 383.93$$

o. *Sum of Squares Error (SSE)*

$$SSE = SST - SSR$$

$$SSE = 238.87 - 383.93$$

$$= -145.06$$

p. *Mean Squares Regression (MSR)*

$$\begin{aligned} MSR &= \frac{SSR}{k} \\ &= \frac{383.93}{3} \\ &= 127.98 \end{aligned}$$

q. *Mean Square Error (MSE)*

$$\begin{aligned} MSE &= \frac{SSE}{n - k - 1} \\ &= \frac{-145.06}{18 - 3 - 1} \\ &= -10.36 \end{aligned}$$

r. *F-stats*

$$\begin{aligned} F &= \frac{MSR}{MSE} \\ &= \frac{127.98}{-10.36} \\ &= -12.35 \end{aligned}$$

Kriteria pengujian

F hitung > F tabel = H0 ditolak, berlaku sebaliknya

Diketahui Density dari ePLA+ HS yaitu sebesar 1.24 g/cm^3 , sehingga didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Sample 1} = \frac{23.65}{1.24} = 19.07$$

$$\text{Sample 11} = \frac{24.07}{1.24} = 19,41$$

$$\text{Sample 2} = \frac{23.10}{1.24} = 18.63$$

$$\text{Sample 12} = \frac{18.97}{1.24} = 15,30$$

$$\text{Sample 3} = \frac{20.10}{1.24} = 16.21$$

$$\text{Sample 13} = \frac{19.86}{1.24} = 16,02$$

$$\text{Sample 4} = \frac{23.29}{1.24} = 18.78$$

$$\text{Sample 14} = \frac{20.66}{1.24} = 16,66$$

$$\text{Sample 5} = \frac{20.03}{1.24} = 16.15$$

$$\text{Sample 15} = \frac{23.99}{1.24} = 19,35$$

$$\text{Sample 6} = \frac{20.90}{1.24} = 16.85$$

$$\text{Sample 16} = \frac{27.04}{1.24} = 21,81$$

$$\text{Sample 7} = \frac{23.78}{1.24} = 19.18$$

$$\text{Sample 17} = \frac{23.72}{1.24} = 19,13$$

$$\text{Sample 8} = \frac{23.26}{1.24} = 18.76$$

$$\text{Sample 18} = \frac{28.48}{1.24} = 22,97$$

$$\text{Sample 9} = \frac{26.60}{1.24} = 21.45$$

$$\text{Sample 19} = \frac{24.44}{1.24} = 19,71$$

$$\text{Sample 10} = \frac{23.73}{1.24} = 19.14$$

$$\text{Sample 20} = \frac{23.31}{1.24} = 18,80$$

Mean Specific Strength (Weight-to-Strength Ratio)

$$= \frac{\sum \text{Specific Strength}}{n}$$

$$= \frac{373.37}{20}$$

$$= 18,67 \text{ Mpa}/(\text{g/cm}^3)$$