

**ANALISIS DAN OPTIMASI 3D *PRINTING* PADA PRODUK  
KOPLING DENGAN MATERIAL PLA MENGGUNAKAN  
METODE *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)**

**PROYEK AKHIR**

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



Diusulkan Oleh:

Khairun Nisah      NIM: 1042117

**POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI**

**BANGKA BELITUNG**

**TAHUN 2024**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**ANALISIS DAN OPTIMASI 3D *PRINTING* PADA PRODUK KOPLING  
DENGAN MATERIAL PLA MENGGUNAKAN METODE *RESPONSE*  
*SURFACE METHODOLOGY* (RSM)**

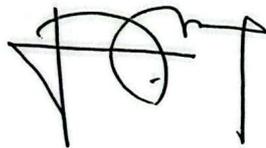
Oleh:

Khairun Nisah / 1042117

Laporan akhir ini telah disetujui dan disahkan sebagai salah satu syarat kelulusan  
Program Sarjana Terapan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Menyetujui,

Pembimbing 1



(Angga Sateria, S.S.T., M.T)

Pembimbing 2



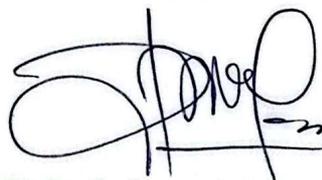
(Yudi Oktriadi, S.Tr., M.Eng)

Penguji 1



(Eko Yudo, S.S.T., M.T.)

Penguji 2



(Zaldy S. Suzen, S.S.T., M.T.)

## PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa 1 : Khairun Nisah

NIM: 1042117

Dengan Judul : ANALISIS DAN OPTIMASI 3D *PRINTING* PADA  
PRODUK KOPLING DENGAN MATERIAL PLA  
MENGUNAKAN METODE *RESPONSE SURFACE*  
*METHODOLOGY* (RSM)

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

Sungailiat, 24 Juli 2024

Nama Mahasiswa

1. Khairun Nisah

Tanda Tangan



## ABSTRAK

*Teknologi 3D-printing merupakan teknologi yang memungkinkan untuk mencetak objek tiga dimensi dengan membangun lapisan per lapisan material yang digunakan berdasarkan desain yang sudah di kontrol komputer. Teknologi ini semakin banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk industri manufaktur, otomotif, dan medis, untuk memproduksi komponen dengan presisi tinggi. Salah satu aplikasi teknologi ini adalah dalam pembuatan komponen kopling sumbu Z pada mesin 3D printer dengan menggunakan filamen PLA. PLA (Polylactic Acid) merupakan filamen yang paling umum dan populer digunakan karena mudah dicetak atau diproses. Penelitian ini dibuat untuk mengetahui pengaruh parameter proses terhadap respon dan menentukan setting variabel proses yang optimal untuk menghasilkan kekasaran permukaan minimal dan akurasi dimensi maksimal pada produk kopling. Parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini adalah suhu nozzle, layer height, dan printing speed. Suhu nozzle yang digunakan adalah 215°C, 230°C, dan 245°C. Layer height yang digunakan adalah 0.2 mm, 0.25 mm, dan 0.3 mm. Sedangkan untuk printing speed sebesar 50 mm/s, 65 mm/s, dan 80 mm/s. Parameter respon yang digunakan adalah kekasaran permukaan dan akurasi dimensi. Parameter yang memiliki pengaruh yang signifikan pada kekasaran permukaan adalah suhu nozzle dan layer height yang memiliki persentase 85,77%, sedangkan untuk akurasi dimensi adalah suhu nozzle dan interaksi suhu nozzle dengan print speed dengan persentase 69,28%. Hasil paling optimal untuk kekasaran permukaan dan akurasi dimensi pada produk kopling ini terdapat pada nilai suhu nozzle 255°C, layer height pada 0,18 mm, dan print speed sebesar 90 mm/s dengan hasil optimasi kekasaran permukaan sebesar 12.4493  $\mu\text{m}$  dan akurasi dimensi sebesar 18.6249 mm.*

*Kata Kunci : 3D-Printing; Akurasi ; Kekasaran ; Metode RSM; Optimasi*

## ABSTRACT

*3D printing technology is a technique that allows for the creation of three-dimensional objects by building materials layer by layer based on a computer-controlled design. This technology is increasingly used in various fields, including manufacturing, automotive, and medical industries, to produce highly precise components. One of its applications is in producing Z-axis coupling components for 3D printers using PLA filament. PLA (Polylactic Acid) is the most commonly and widely used filament due to its ease of printing and processing. This research aims to investigate the effect of process parameters on responses and determine the optimal process variable settings to achieve minimal surface roughness and maximal dimensional accuracy in coupling products. The process parameters used in this study are nozzle temperature, layer height, and printing speed. The nozzle temperatures tested are 215°C, 230°C, and 245°C, while the layer heights are 0.2 mm, 0.25 mm, and 0.3 mm. The printing speeds used are 50 mm/s, 65 mm/s, and 80 mm/s. The response parameters analyzed are surface roughness and dimensional accuracy. The parameters that significantly affect surface roughness are nozzle temperature and layer height, which account for 85.77%, while for dimensional accuracy, the nozzle temperature and its interaction with printing speed account for 69.28%. The most optimal results for surface roughness and dimensional accuracy in the coupling product occur at a nozzle temperature of 255°C, a layer height of 0.18 mm, and a print speed of 90 mm/s, yielding an optimized surface roughness of 12.4493  $\mu\text{m}$  and dimensional accuracy of 18.6249 mm.*

*Keywords: 3D-Printing; Accuracy; Roughness; RSM Method; Optimization*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa dan dengan karunia-nyalah penulis dapat menyelesaikan proyek akhir dengan judul **“ANALISIS DAN OPTIMASI 3D *PRINTING* PADA PRODUK KOPLING DENGAN MATERIAL PLA MENGGUNAKAN METODE *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)*”**. Penulisan proyek akhir ini dilakukan untuk memenuhi syarat kelulusan D-IV di jurusan Teknik Mesin Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.

Dalam penulisan proyek akhir ini penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak baik langsung ataupun tidak langsung penulis tidak akan menyelesaikan proyek akhir ini. Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orangtua, Adik, dan Tante penulis yang selalu memberikan doa dan dukungannya selama penulis mengerjakan proyek akhir ini.
2. Bapak Angga Sateria, S.S.T., M.T, selaku pembimbing utama yang telah menyetujui tugas akhir ini serta telah banyak memberikan konsep pemikiran dan dukungan selama mengerjakan proyek akhir ini.
3. Bapak Yudi Oktriadi, S.Tr., M.Eng , selaku pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam mengerjakan proyek akhir ini.
4. Bapak I Made Andik Setiawan, M. Eng., Ph.D., selaku Direktur Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.
5. Bapak Pristiansyah S.S.T., M.Eng. selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.
6. Bapak Boy Rollastin, S.Tr., M.T. selaku ketua prodi D IV Teknik Mesin dan Manufaktur Politeknik Negeri Bangka Belitung.
7. Seluruh Dosen dan Staf Jurusan Teknik Mesin yang telah membantu dalam pelaksanaan proyek akhir ini

8. Teman-teman seperjuangan TMM Angkatan 28 terkhusus teman-teman kelas 3 TMM A, Sherin, Wahyudi, Vanessa, Azora, Angita, Ainur, Peter, Peony serta teman-teman lainnya yang selalu membantu dan memberikan dukungan serta motivasi selama mengerjakan proyek akhir ini.

Akhir kata penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa dapat membalas segala kebaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan proyek akhir ini. Semoga proyek akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung serta bagi pembacanya pada masa yang akan datang. Aamiin.

Sungailiat, 24 Juli 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	4
<b>BAB II DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Mesin 3D <i>Printer</i> .....	5
2.1.1 Pengertian 3D <i>Printing</i> .....	5
2.1.2 Mekanisme Proses Kerja 3D <i>Printing</i> .....	6
2.1.3 Parameter Proses 3D <i>Printing</i> .....	7
2.2 Filamen PLA ( <i>Polylactid Acid</i> ).....	7
2.3 Metode RSM ( <i>Response Surface Methodology</i> ) .....	8
2.3.1 Model Dan Analisis Variansi /ANOVA <i>Response Surface Methodology</i>	9

2.3.2	Uji Kesesuaian Model.....	13
2.3.3	Pemeriksaan Asumsi Residual.....	15
2.3.4	Pengujian Koefisien Determinasi ( $R^2$ ).....	16
2.3.5	Grafik Permukaan Respon dan Penentuan Titik Optimum Faktor .....	16
2.4	Kekasaran Permukaan.....	18
2.5	Akurasi Dimensi .....	20
2.6	Penelitian Sebelumnya.....	20
<b>BAB III METODE PELAKSANAAN.....</b>		<b>23</b>
3.1	Metode Penelitian .....	23
3.2	Studi Literatur .....	24
3.3	Persiapan Alat dan Bahan .....	24
3.3.1	Alat Penelitian .....	24
3.3.2	Bahan Penelitian .....	28
3.4	Rancangan Percobaan .....	29
3.4.1	Desain Spesimen Percobaan.....	29
3.4.2	Variabel Penelitian .....	30
3.4.3	Parameter Percobaan .....	31
3.4.4	Model Orde Kedua <i>Central Composite Design (CCD)</i> .....	31
3.5	Identifikasi Level Proses .....	33
3.6	Proses Percobaan .....	34
3.6.1	Proses Pencetakan.....	34
3.6.2	Proses Pengukuran Keakuratan Dimensi.....	36
3.6.3	Proses Pengujian Kekasaran Permukaan .....	36
3.7	Pengambilan Data Hasil.....	39
3.8	Analisis dan Pembahasan.....	39

3.9	Kesimpulan dan Saran .....	39
<b>BAB IV PEMBAHASAN.....</b>		<b>40</b>
4.1	Pengambilan Data Nilai Kekasaran Permukaan .....	40
4.2	Pengambilan Data Nilai Keakurasian Dimensi.....	41
4.3	Pengolahan Data Menggunakan <i>Response Surface Methodology</i> .....	42
4.4	<i>Analysis Of Variance</i> .....	48
4.5	Pengujian Kesesuaian Model .....	52
4.5.1	Uji <i>Lack of Fit</i> .....	52
4.5.2	Uji Individu.....	54
4.6	Pemeriksaan Asumsi Residual .....	58
4.6.1	Uji Identik.....	58
4.6.2	Uji Independen .....	60
4.6.3	Uji Normalitas .....	62
4.7	Melakukan Pengujian Koefisien Determinasi ( $R^2$ ) .....	64
4.8	Penentuan Titik Optimum Faktor .....	66
4.9	Penyusunan Model Matematis .....	71
4.10	Plot Permukaan .....	71
4.11	Optimasi Respon.....	76
4.12	Percobaan Konfirmasi Hasil Optimasi.....	78
4.13	Uji <i>One-Sample T</i> Percobaan Konfirmasi Hasil Optimasi.....	79
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>80</b>
5.1	Kesimpulan .....	80
5.2	Saran .....	80
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>82</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2. 1 Tabel ANOVA Metode Respon Permukaan.....	9
2. 2 Tabel Uji <i>Lack of Fit</i> .....	14
2. 3 Tabel Uji Serentak .....	14
2. 4 Tabel Uji Individu.....	15
3. 1 Variabel Bebas.....	30
3. 2 Parameter Penelitian .....	31
3. 3 Kode Sampel Percobaan <i>Central Composite Design</i> (CCD) .....	32
3. 4 Tabel Nilai Rotabilitas .....	32
3. 5 Variasi Level pada Varibel Penelitian .....	33
4. 1 Data Hasil Uji Kekasaran Permukaan .....	40
4. 2 Data Hasil Pengukuran Dimensi.....	41
4. 3 Model <i>Summary</i> ANOVA Kekasaran Permukaan Dengan Minitab .....	48
4. 4 ANOVA Kekasaran Permukaan dengan Minitab.....	49
4. 5 Model <i>Summary</i> ANOVA Akurasi Dimensi Menggunakan Minitab.....	50
4. 6 ANOVA Uji Akurasi Dimensi dengan Menggunakan Minitab.....	51
4. 7 Pengujian Uji Individu Kekasaran Permukaan.....	54
4. 8 Pengujian Uji Individu Akurasi Dimensi.....	56
4. 9 Batasan Optimasi Respon pada Fungsi <i>Desirability</i> .....	76
4. 10 Hasil Optimasi dengan Fungsi <i>Desirability</i> .....	77
4. 11 Pengujian <i>One Sampel</i> T Percobaan Konfirmasi.....	79

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2. 1 Profil Geometri Ideal Permukaan Benda .....	19
2. 2 Profil Permukaan Benda .....	20
3. 1 Flowchart Penelitian .....	23
3. 2 Mesin 3D <i>Creality Ender 3 Pro</i> .....	24
3. 3 Mikrometer Luar Ket. 0,001 mm .....	25
3. 4 <i>Surface Roughness Tester</i> Mitutoyo SJ-210.....	26
3. 5 <i>V-Block</i> .....	26
3. 6 <i>SOLIDWORKS</i> .....	27
3. 7 <i>Creality Slicer</i> .....	28
3. 8 Filamen PLA.....	28
3. 9 Gambar Spesimen.....	29
3. 10 Contoh titik pengukuran untuk uji akurasi dimensi.....	29
3. 11 Garis untuk pengukuran uji kekasaran permukaan .....	30
3. 12 Proses <i>Slicing</i> di <i>Software Creality Slicer</i> .....	34
3. 13 Proses Pencetakan Spesimen Percobaan .....	35
3. 14 Proses Pengukuran Sampel.....	36
3. 15 Sampel 3D <i>Print</i> .....	37
3. 16 Proses Kalibrasi <i>Surface Roughness Tester</i> .....	37
3. 17 Proses Pengujian Kekasaran Permukaan dengan <i>Surface Roughness Tester</i> .....	38
4. 1 Plot Uji Identik Kekasaran Permukaan.....	59
4. 2 Plot Uji Identik Keakurasian Dimensi .....	59
4. 3 Plot Uji Independen Kekasaran Permukaan .....	60
4. 4 Plot Uji Independen Keakurasian Dimensi.....	61
4. 5 Plot Normalitas Kekasaran Permukaan .....	63
4. 6 Plot Normalitas Akurasi Dimensi .....	64
4. 7 <i>Surface Plot</i> Suhu <i>Nozzle</i> dan <i>Layer Height</i> Terhadap Kekasaran Permukaan .....	72

4. 8 <i>Surface Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Kekasaran Permukaan</i>	72
4. 9 <i>Surface Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Kekasaran Permukaan</i>	72
4. 10 <i>Contour Plot Suhu Nozzle dan Layer Height Terhadap Kekasaran Permukaan</i>	73
4. 11 <i>Contour Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Kekasaran Permukaan</i>	73
4. 12 <i>Contour Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Kekasaran Permukaan</i>	73
4. 13 <i>Surface Plot Suhu Nozzle dan Layer Height Terhadap Akurasi Dimensi</i>	74
4. 14 <i>Surface Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Akurasi Dimensi</i>	74
4. 15 <i>Surface Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Akurasi Dimensi</i>	74
4. 16 <i>Contour Plot Suhu Nozzle dan Layer Height Terhadap Akurasi Dimensi</i>	75
4. 17 <i>Contour Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Akurasi Dimensi</i>	75
4. 18 <i>Contour Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Akurasi Dimensi</i>	75
4. 19 <i>Plot Hasil Optimasi</i>	78

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Daftar Riwayat Hidup

Lampiran 2 : Perhitungan Tabel Uji Individu

Lampiran 3 : Perhitungan Pengujian Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Lampiran 4 : Hasil pengujian pada benda kopling hasil optimasi

Lampiran 5 : Dokumentasi Sampel Hasil Penelitian



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur dalam beberapa tahun ini telah mengalami perkembangan pesat dalam bidang teknologinya. Salah satunya yaitu perkembangan dalam teknologi *3D-printing*. Teknologi *3D-printing* merupakan suatu teknologi yang memungkinkan untuk membentuk objek tiga dimensi dengan membangun lapisan per lapisan material yang digunakan berdasarkan desain yang sudah di kontrol komputer. Berkembang pesatnya teknologi *3D-printing* ini mempermudah industri manufaktur untuk menciptakan suatu objek tiga dimensi yang memiliki detail dan tingkat kompleksitas yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk mengeksplor berbagai ide baru yang dapat menciptakan produk-produk inovatif dengan cepat dan efisien. Salah satu contoh produknya yaitu produk kopling. Kopling sendiri merupakan sebuah komponen mekanik yang memiliki fungsi sebagai penghubung dua poros atau lebih sehingga dapat berputar bersama untuk menghasilkan tenaga dari satu bagian ke bagian mesin lainnya. Kopling adalah komponen utama yang sangat penting dalam kendaraan, yang berfungsi untuk mentransfer daya dari mesin ke transmisi secara perlahan guna menghindari hentakan atau getaran saat perpindahan gigi, sehingga pergerakan awal kendaraan dapat berlangsung dengan halus dan nyaman.(Surbakti et al., n.d.)

Salah satu komponen pada mesin 3D *Printer* adalah kopling yang terdapat pada sumbu z mesinnya. Pada mesin 3D *Printer*, kopling memiliki peran penting dalam memastikan presisi dan akurasi gerakan. Penggunaan kopling yang tepat sangat penting untuk memastikan gerakan yang halus dan presisi. Ketidaksejajaran yang tidak terkompensasi dapat menyebabkan hasil cetakan yang buruk dan keausan yang cepat pada komponen mesin.

Di antara variasi filamen yang digunakan dalam pencetakan 3D, jenis yang paling umum adalah PLA (*Polylactic Acid*). Berdasarkan penelitian dari Casalini et al., (2019), PLA adalah polimer yang berasal dari sumber alami, sehingga dapat

diurai secara alami dan bersifat biodegradable. Bahan ini sering digunakan dalam bidang biomedis, contohnya untuk membuat benang jahit, sekrup fiksasi tulang, dan perangkat pengiriman obat. Penggunaan PLA di pencetakan 3D, seperti yang dijelaskan oleh Carlota V. (2019) , mencakup pembuatan prototipe, produk pangan, dan objek yang tidak membutuhkan banyak kekuatan mekanik. PLA populer dalam pencetakan 3D karena mudah dalam pencetakan dan prosesnya. Filamen PLA tidak memerlukan suhu *nozzle* yang sangat tinggi, sementara filamen ABS misalnya membutuhkan suhu *nozzle* di atas 230°C, PLA dapat dicetak dalam rentang suhu *nozzle* 190-220°C. Selain itu, harganya lebih terjangkau dibandingkan dengan jenis filamen lainnya, menjadikannya pilihan yang banyak digunakan dalam industri pencetakan 3D.

Pada penelitian yang mengkaji mengenai pengaruh *printing speed* terhadap kekasaran permukaan benda dengan bahan filamen PLA dengan spesimen berupa kubus yang memiliki ukuran 20mm x 20mm x 20mm. Penelitian ini menggunakan *print temperature* sebesar 205-225°C, *bed temperature* 25-70°C, dan *print speed* masing-masing yaitu 50%, 100%, 150%. Berdasarkan pada penelitian ini didapatkan bahwa adanya peningkatan kekasaran permukaan pada setiap pengujian yang dimulai dari spesimen 50%, 100%, dan 150%. Hasil kekasaran permukaan benda yang menggunakan *print speed* sebesar 50% rata-rata memiliki kekasaran permukaan sebesar 15.086 pada sisi kubus A, pada sisi B sebesar 14.828, pada sisi C sebesar 16.002 dan pada sisi D sebesar 16.594. Untuk hasil kekasaran pada spesimen dengan *print speed* sebesar 100% masing-masing pada sisi A, B, C dan D yaitu rata-rata sebesar 19.246, 20.262, 21.568 dan 21.084. Hasil uji kekasaran untuk *print speed* 150% masing-masing pada sisi A, B, C dan D yaitu rata-rata sebesar 21.594, 20.428, 20.247 dan 23.541. (Taufik et al., 2020)

Penelitian yang menggunakan suhu *nozzle* sebesar 220°C, 230°C, 240°C dan 250°C pada percobaan dengan spesimen berupa filamen PETG yaitu suhu *nozzle* tidak terlalu berpengaruh terhadap hasil uji kekasaran benda. Pada percobaan pertama dengan *layer height* 0,12 mm, suhu *nozzle* 220°C dan *print speed* 40mm/s menghasilkan tingkat kekasaran sebesar 2.056 m. Pada percobaan ketiga dengan *layer height* sebesar 0,12 mm, suhu *nozzle* 240°C dan *print speed* 60 mm/s serta

dengan sebelas percobaan dengan berbagai *layer height* 0,20 mm, suhu *nozzle* 220°C dan *print speed* 60 m/s yang dimana pada kedua percobaan ini menghasilkan tingkat kekasaran sebesar 2.455  $\mu\text{m}$  dan 3.354. (M.H Evan et al. n.d.)

Penelitian yang menggunakan filamen PLA dengan campuran metal seperti *Stainless Steel* menyatakan bahwa faktor yang berpengaruh paling signifikan terhadap sifat elastisitas produk metal 3D-*printing* ialah *reaster angle* dengan kontribusi 43,22%. Sedangkan kontribusi untuk faktor lainnya adalah *layer height* dan *nozzle temperature* masing-masing sebesar 24,08% dan 12,6% dengan kontribusi error yang terjadi sebesar 20,10% pada penelitian tersebut. *Nozzle temperature* yang paling optimal untuk mendapatkan sifat elastisitas pada produk metal 3D-*printing* yang baik yaitu sebesar 220°C, *layer height* yang paling optimal yaitu sebesar 0,4 mm serta *raster angle* yang paling baik untuk produk metal 3D *printing* sebesar 0°/90°. (Wahyu n.d.)

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada pembahasan yang dibahas pada latar belakang maka, perumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh parameter proses terhadap respon menggunakan ANOVA?
2. Bagaimana pengaturan *setting variable* proses yang optimal untuk menghasilkan akurasi dimensi maksimal dan kekasaran permukaan minimal?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini harus ditentukan agar proses penelitian yang dilakukan dapat terarah dan mencapai tujuan yang diinginkan. Batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian ini yaitu:

1. Penelitian ini menggunakan mesin 3D *Printing* jenis *Creality Ender 3 Pro*
2. Filamen yang digunakan adalah filamen PLA
3. Ukuran benda kerja yang akan dicetak adalah  $\emptyset 19 \times 25$  mm
4. Variabel yang digunakan adalah suhu *nozzle*, *layer height* dan *print speed*

5. Pengujian yang dilakukan adalah uji kekasaran permukaan dan akurasi dimensi
6. Menggunakan metode *Response Surface Methodology*
7. Pengolahan dan analisis data hasil uji kekasaran dan akurasi dimensi menggunakan bantuan *software* Minitab

#### **1.4 Tujuan**

Tujuan dari proyek akhir ini berdasarkan dengan rumusan masalah yang telah dijabarkan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis pengaruh parameter proses terhadap respon menggunakan ANOVA.
2. Menentukan *setting variable* proses yang optimal untuk menghasilkan akurasi dimensi maksimal dan kekasaran permukaan minimal.

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Mesin 3D Printer**

Mesin 3D *printer* adalah perangkat yang digunakan untuk mencetak objek tiga dimensi dari model digital. Proses pencetakan ini dilakukan dengan cara menambahkan material secara bertahap (*layer by layer*) hingga membentuk objek yang diinginkan. Material yang biasa digunakan dalam 3D *printing* termasuk plastik, resin, logam, atau bahan lainnya yang bisa diendapkan lapis demi lapis. Teknologi ini memungkinkan pembuatan prototipe cepat, produk custom, hingga komponen industri dengan desain yang kompleks.

3D *Printer* adalah mesin pembuat benda tiga dimensi dari sebuah desain secara digital menjadi bentuk 3D yang dapat dilihat tapi juga dipegang dan memiliki volume. 3D *printer* dicapai dengan menggunakan proses aditif, dimana sebuah obyek dibuat dengan meletakkan lapisan yang berurut dari bahan baku. *Printer* 3D juga sering disebut dengan *addictive manufacture* atau manufaktur tambahan. (Diki Mulyawan, n.d.)

##### **2.1.1 Pengertian 3D Printing**

Pencetakan 3D atau manufaktur aditif adalah teknik untuk menciptakan objek 3D dari model digital dengan meletakkan material secara bertahap melalui proses aditif yang dikontrol oleh komputer, seperti yang dijelaskan oleh Gokhare (2017). Prinsip kerja 3D *Printing* pada dasarnya yaitu membuat suatu benda dengan membangun lapisan per lapisan yang akhirnya membentuk suatu objek benda 3D yang sempurna. Dalam proses 3D *Printing* ada 3 *software* yang dibutuhkan yaitu CAD sebagai *software* untuk mendesain objek benda, CAM (*Computer-aided Manufacturing*) menerjemah desain bentuk 3D yang dikonversikan dalam bentuk *G-code* dan ada *software control printer* untuk memberikan arahan untuk *printer* mengenai tata cara pencetakan (Saxena et al., 2020) .

3D *Printing* mempunyai potensi besar dalam industri manufaktur karena kelebihanannya dalam membuat produk-produk flexibel yang memiliki bentuk atau geometri yang kompleks. Munculnya teknologi 3D *Printing* berdampak signifikan terhadap beberapa bidang industri manufaktur terutama dalam segi ekonomi. Namun, pada proses pencetakan produk-produk yang dihasilkan masih mempunyai kekurangan dalam hal keakuratan dimensinya karena hasil akhir produk mengalami penambahan atau pengurangan ukuran sehingga produk yang dihasilkan tidak sesuai dengan desain. Hal ini menunjukkan bahwa parameter dalam proses pencetakan sangatlah penting untuk menghasilkan produk cetakan yang sesuai dengan desain yang diinginkan. Teknologi 3D *Printing* yang terkenal dan murah salah satunya adalah FFF (*Fused Filament Fabrication*) atau yang dikenal juga disebut *Fused Deposition Modelling (FDM)*. Prinsip kerja dari FDM yaitu dengan mengekstruksi filamen *thermoplastic* melalui *nozzle* dengan suhu panas pada *melting temperature* yang kemudian dibentuk menjadi sebuah objek 3D secara *layer per layer*

### **2.1.2 Mekanisme Proses Kerja 3D *Printing***

Terdapat tiga mekanisme proses kerja 3D *Printing* yaitu sebagai berikut (Setiawan, n.d.) :

1. Model 3D *Printing*

Model objek 3D *Printing* dapat dibuat dengan menggunakan *software* khusus desain yang didukung oleh *printer* seperti *Solidwork*, *Catia*, *Delcam* dan lain sebagainya.

2. Proses pencetakan/*Printing*

Setelah desain objek 3D dikonversi ke *G-code* telah siap, masukkan *G-code* kedalam mesin *printer* untuk selanjutnya dicetak berdasarkan desain yang diinginkan. Lamanya proses pencetakan berdasarkan model/bentuk benda yang sedang dicetak tersebut.

3. Proses *Finishing*

Pada proses ini bagian-bagian kompleks yang disebabkan oleh penambahan ukuran atau pengurangan ukuran dapat disempurnakan. Teknik *multiple*

material atau tambahan warna dapat digunakan sebagai teknik tambahan untuk menyempurkan hasil cetakan agar sesuai dengan desain yang diinginkan.

### 2.1.3 Parameter Proses 3D Printing

Parameter proses merupakan acuan kontrol yang digunakan pada mesin 3D *Printer* untuk mencetak sebuah objek solid 3D sehingga hasil objek 3D yang dicetak sesuai dengan desain yang dibuat. Parameter proses tersebut dimasukkan melalui *software slice* yang menghasilkan *G-code* yang kemudian dibaca sebagai perintah oleh mesin *printer* selama proses pencetakan. Berikut beberapa parameter yang digunakan dalam proses 3D-Printing yaitu:

1. *Nozzle temperature* adalah *temperature* atau suhu yang digunakan untuk mengekstruksi filamen. Sering disebut juga sebagai *extruder temperature*.
2. *Layer height* ialah ketebalan atau ketinggian lapisan per lapisan pembentuk objek 3D-Printing. Semakin detail produk dibuat maka semakin kecil *layer height* yang digunakan. *Layer height* diatur dengan menyesuaikan diameter *nozzle* mesin *printer* yang digunakan.
3. *Bed temperature* adalah *temperature bed* atau papan tempat produk menempel saat proses pencetakan.
4. *Printing speed* adalah kecepatan *printer* bergerak saat digunakan dalam dalam proses pencetakan.
5. *Infill density* adalah tingkat kepadatan pencetakan filamen yang digunakan dalam proses pencetakan. Semakin padat dan banyak filamen yang mengisi produk maka semakin tinggi *infill density* yang digunakan.
6. *Raster angle* adalah penggunaan sudut dalam proses pengisian filamen pada produk selama proses pencetakan.
7. *Infill pattern* adalah pola pengisian yang digunakan saat mencetak.

## 2.2 Filamen PLA (*Poly lactid Acid*)

PLA merupakan *biopolymer* atau polimer yang dihasilkan dari bahan alami yang bersifat *biodegradable* atau dapat dengan mudah diuraikan. Biasanya polimer ini digunakan dalam bidang biomedis seperti pembuatan benang jahit, sekrup

tulang dan perangkat pengiriman obat (Casalini et al., 2019). Filamen PLA digunakan oleh banyak orang selain karena harganya yang murah adalah karena filamen jenis ini lebih mudah digunakan dalam proses pencetakannya. Filamen PLA dapat dicetak pada rentang suhu *nozzle* 190-220 °C, berbeda dengan filamen ABS yang memerlukan suhu *nozzle* di atas 230 °C untuk dapat dicetak atau di proses karena filamen PLA bersifat termoplastik.

Karakteristik dari filamen PLA yaitu filamen ini adalah transparan, bersifat kaku, berbentuk butiran, memiliki ketahanan terhadap kelembapan serta polimer yang elastis (Mita , n.d. 2019)

### 2.3 Metode RSM (*Response Surface Methodology*)

*Response Surface Methodology* (RSM) adalah teknik penyelesaian masalah menggunakan matematika dan statistika dalam bentuk model matematika atau fungsi dan menganalisis permasalahan tersebut, respon yang dicapai dipengaruhi oleh variable independen sehingga respon tersebut berada pada titik optimumnya (Montgomery, n.d. 1983).

Sebuah eksperimen memerlukan  $k$  faktor, yaitu  $x_1, x_2, \dots$  dan  $x_k$ . Variabel bebas atau variabel kontrol yang menghasilkan nilai  $Y$  adalah istilah yang digunakan untuk menyebut faktor-faktor ini.  $Y$  adalah singkatan dari variabel terikat, variabel tak bebas, atau variabel respon. Semua variabel tersebut dapat diukur, dan  $Y$  adalah tanggapan dari  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Akibatnya,  $Y$  dapat ditulis sebagai fungsi dari  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Berikut ini adalah hubungan antara respons  $Y$  dan variabel bebas  $x$ :

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$Y$  = respon

$x_i$  = variabel bebas ;  $i = (1,2,3,\dots,k)$

$\epsilon$  = error

Jika  $y = f(x_1 + x_2) = n$ , maka  $n = f(x_1 + x_2)$  dapat disebut permukaan respon.

Nilai optimal dari suatu respon dapat dicari dengan bantuan statistik yang merupakan ide dasar dari *response surface* itu sendiri. Dengan demikian dapat memudahkan untuk mencari nilai optimum suatu eksperimen. Dengan metode ini peneliti dapat menghemat waktu dan biaya dalam melakukan sebuah eksperimen karena tidak perlu melakukan eksperimen secara berulang-ulang.

Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan saat menggunakan metode *response surface* yaitu perhatikan bentuk persamaanya apakah fungsinya berorde satu atau berorde dua. Jika fungsinya berorde satu maka rancangan dapat menggunakan  $2^k$  *factorial* yang setiap perlakuan memiliki dua level perlakuan. Sedangkan jika fungsi berorde dua, dapat menggunakan metode rancangan percobaan *Central Composite Design (CCD)* dan *Box-Behnken Design (BBD)* dengan jumlah percobaan yang lebih banyak dibandingkan rancangan fungsi berorde satu.  $k$  adalah banyaknya faktor perlakuan.

### 2.3.1 Model Dan Analisis Variansi /ANOVA *Response Surface Methodology*

ANOVA atau Analisis Variansi adalah salah satu metode analisis yang digunakan untuk menentukan perbedaan rerata antara dua kelompok dengan membandingkan variansinya. ANOVA berfungsi sebagai penentu sumber dan nilai signifikansi dari faktor kuadrat, faktor linear, dan faktor interaksi pada respon. Oleh karena itu, ANOVA digunakan untuk menentukan kondisi optimal dalam metode respon *surface*.

Hipotesis yang digunakan dalam metode *response surface* yaitu sebagai berikut:

$$H_0: \varphi_i = 0$$

$$H_1: \varphi_i \neq 0$$

Tabel 2. 1 Tabel ANOVA Metode Respon Permukaan

Sumber Variansi	db	Jumlah Kuadrat	Rata-Rata Jumlah Kuadrat	F <sub>hitung</sub>
Regresi	p	JKR	JKR/p	RJKR/RJK(RES)

<b>Linier</b>	3	JKL	JKL/3	RJKL/RJK(RES)
<b>Kuadratik</b>	3	JKK	JKK/3	RJKK/RJK(RES)
<b>Interaksi</b>	3	JKI	JKI/3	RJKI/RJK(RES)
<b>Residual</b>	n-p-1	JK(RES)	JK/(RES)/n-p-1- ne	
<b>Lack of Fit</b>	n-p-1-ne	JK(LoF)	JK(LoF)/n-p-1-ne	RJK(LoF)/JK(Pure Error)
<b>Pure Error</b>	ne	JK(Pure Error)	JK(Pure Error)/ne	
<b>Total</b>	n-1	JKT		

Tahapan-tahapan uji ANOVA dalam rancangan metode *response surface* adalah sebagai berikut:

1. Tentukan sumber variansi rancangan pada eksperimen.
2. Tentukan derajat bebas untuk setiap sumber variansi, yang mana derajat bebas untuk setiap variansi yaitu:  
 $p$  = banyak variabel predictor  
 $n$  = banyak pengamatan  
 $n_e$  = banyak pengulangan -1
3. Menentukan jumlah kuadrat setiap sumber variasi yang dirumuskan dengan rumus sebagai berikut:

$$JK(\text{Regresi}) = b^t X^t Y - JKR \dots\dots\dots (2.2)$$

$$JK(\text{Linier}) = (b_L)^t (X_K)^t Y - JKR$$

$$JK(\text{Kuadratik}) = (b_k)^t (X_k)^t Y - JKR$$

$$JK(\text{Interaksi}) = (b_I)^t (X_I)^t Y - JKR \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Dengan, } JKR = \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \dots\dots\dots (2.4)$$

Adapun rumus untuk menghitung jumlah kuadrat total dan error yaitu:

$$JKT = [(Y_1)^2 + (Y_2)^2 + \dots + (Y_n)^2] - JKR \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$JK(\text{Residual}) = Y^tY - b^tX^tY \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$JK(\text{Lack of Fit}) = JK(\text{Residual}) - JK(\text{Pure Error}) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$JK(\text{Pure Error}) = (\bar{Y}_{u1} - \bar{Y}_u)^2 + (\bar{Y}_{u2} - \bar{Y}_u)^2 + (\bar{Y}_{u3} - \bar{Y}_u)^2 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

4. Tentukan rerata jumlah kuadrat setiap sumber variansi dengan membagi setiap jumlah kuadrat dengan derajat bebasnya.

$$RJK(\text{regresi}) = \frac{JK^{(\text{regresi})}}{p} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$RJK(\text{linier}) = \frac{JK^{(\text{linier})}}{3}$$

$$RJK(\text{kuadratik}) = \frac{JK^{(\text{kuadratik})}}{3}$$

$$RJK(\text{interaksi}) = \frac{JK^{(\text{interaksi})}}{3} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Adapun untuk perumusan perhitungan rata-rata jumlah kuadrat error yaitu sebagai berikut:

$$RJK(\text{residual}) = \frac{JK^{(\text{residual})}}{5} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$RJK(\text{lack of fit}) = \frac{JK^{(\text{lack of fit})}}{3} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$$RJK(\text{pure error}) = \frac{JK^{(\text{pure error})}}{2} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

5. Tentukan  $F_{hitung}$  setiap variansi dengan rumus berikut:

$$F_{\text{regresi}} = \frac{RJK(\text{regresi})}{RJK(\text{residual})} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$F_{\text{linier}} = \frac{RJK(\text{regresi})}{RJK(\text{residual})}$$

$$F_{\text{kuadratik}} = \frac{RJK(\text{kuadratik})}{RJK(\text{residual})}$$

$$F_{\text{interaksi}} = \frac{RJK(\text{interaksi})}{RJK(\text{residual})} \dots\dots\dots (2.15)$$

Untuk Fhitung error memiliki rumus sendiri yaitu:

$$F_{\text{lack of fit}} = \frac{RJK(\text{lack of fit})}{RJK(\text{pure error})} \dots\dots\dots (2.16)$$

6. Syarat pengujian yaitu jika  $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$ , maka  $H_0$  ditolak begitupun sebaliknya.

7. Membuat kesimpulan.

Berikut adalah rumus yang merupakan model polynomial yang bersifat kuadratik:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} X_i X_j \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan:

- Y = variabel respon
- $\beta_0$  = koefisien konstanta
- $\beta_i$  = koefisien linier
- $\beta_{ii}$  = koefisien kuadratik
- $\beta_{ij}$  = koefisien interaksi perlakuan
- $X_1$  = variabel ;  $i=1,2,3,\dots,k$
- $X_j$  = variabel ;  $j = 2,3,\dots,k$
- $\varepsilon$  = error

Tentukan parameter atau nilai koefisien untuk konstanta, koefisien linier, koefisien kuadratik, dan koefisien interaksi dengan persamaan regresi linier berganda untuk mengidentifikasi model metode *respons surface*. Metode OLS (*Ordinary Least Square*) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengestimasi parameter atau koefisien pada analisis regresi linier dengan tujuan untuk mengurangi atau meminimumkan kesalahan pengganggu kuadrat

dalam mengestimasi parameter atau koefisien. Pendekatan matriks dapat dilakukan dalam memperkirakan parameter atau koefisien regresi.

Bentuk matriks dalam persamaan regresi adalah sebagai berikut:

$$Y = Xb + \varepsilon \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1n} \\ 1 & X_{21} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{k1} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

Dapat dilihat bahwa  $n$  adalah koefisien regresi berganda,  $b$  adalah *vector* kolom,  $\varepsilon$  adalah *vector* kolom dengan  $k$  sebagai komponen sebagai *vector* kesalahan pengganggu. Persamaan matriks *vector*  $b$  dapat didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$\vec{b} = (X^tX)^{-1}X^tY \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

### 2.3.2 Uji Kesesuaian Model

Uji kesesuaian model dilakukan untuk mengetahui variabel yang digunakan akan mempengaruhi model atau tidak. Untuk mencapai tujuan ini dilakukan uji *lack of fit*, pengujian individu serta pengujian secara serentak.

#### 2.3.2.1 Uji Lack of Fit

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui apakah model yang digunakan sudah sesuai. Berikut hipotesis yang akan digunakan dalam uji *lack of fit*.

$H_0$  = tidak ada *lack of fit* (model sesuai)

$H_1$  = ada *lack of fit* (model tidak sesuai)

Tabel 2. 2 Tabel Uji *Lack of Fit*

<b>Sumber Variansi</b>	<b>db</b>	<b>Jumlah Kuadrat</b>	<b>Rata-Rata Jumlah Kuadrat</b>	<b>F<sub>hitung</sub></b>
<b>Regresi</b>	p	JK(Regresi)	RJK(Regresi)	F(Regresi)
<b>Residual</b>	5	JK(RES)	RJK(RES)	
<b>Lack of Fit</b>	3	JK(LoF)	RJK(Lof)	F(LoF)
<b>Pure Error</b>	2	JK(Pure Error)	RJK(Pure Error)	
<b>Total</b>	n-1	JKT		

### 2.3.2.2 Uji Serentak

Uji serentak bertujuan mengidentifikasi hubungan linier antara parameter tidak bebas Y dengan parameter bebasnya  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . Pengujian serentak memiliki hipotesis yaitu:

$$H_0: = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

Dimana,  $H_1$ : minimal ada satu I seingga  $\beta_i \neq 0 = i = 1, 2, \dots, k$

Tabel 2. 3 Tabel Uji Serentak

<b>Sumber Variansi</b>	<b>db</b>	<b>Jumlah Kuadrat</b>	<b>Rata-Rata Jumlah Kuadrat</b>	<b>F<sub>hitung</sub></b>
<b>Regresi</b>	p	JK(Regresi)	RJK(Regresi)	F(Regresi)
<b>Residual</b>	5	JK(RES)	RJK(RES)	
<b>Total</b>	n-1	JKT		

### 2.3.2.3 Pengujian Individu

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui regresi  $y_i$  pada suatu parameter bebas  $X_i$  tertentu, bila parameter bebas  $X_i$  dianggap konstan.

Pengujian individu memiliki hipotesis sebagai berikut:

$$H_0: = \beta_i = 0; i = 1, 2, \dots, k$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 = i = 1, 2, \dots, k$$

Tabel 2. 4 Tabel Uji Individu

<b>Variabel</b>	<b>Koefisien (<i>b<sub>i</sub></i>)</b>	<b>Standar Error (Se) Koefisien</b>	<b><i>t</i><sub>hitung</sub></b>
<b>X<sub>1</sub></b>	( <i>b</i> <sub>1</sub> ) X <sub>1</sub>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>1</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>1</sub> )
<b>X<sub>2</sub></b>	( <i>b</i> <sub>2</sub> ) X <sub>2</sub>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>2</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>2</sub> )
<b>X<sub>3</sub></b>	( <i>b</i> <sub>3</sub> ) X <sub>3</sub>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>3</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>3</sub> )
<b>X<sub>1</sub>X<sub>2</sub></b>	( <i>b</i> <sub>12</sub> ) X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>12</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> )
<b>X<sub>1</sub>X<sub>3</sub></b>	( <i>b</i> <sub>13</sub> ) X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>13</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> )
<b>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub></b>	( <i>b</i> <sub>23</sub> ) X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>23</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> )
<b>X<sub>1</sub><sup>2</sup></b>	( <i>b</i> <sub>11</sub> ) X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>11</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>1</sub> <sup>2</sup> )
<b>X<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	( <i>b</i> <sub>22</sub> ) X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>22</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>2</sub> <sup>2</sup> )
<b>X<sub>3</sub><sup>2</sup></b>	( <i>b</i> <sub>33</sub> ) X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	S <sub>e</sub> ( <i>b</i> <sub>33</sub> )	<i>t</i> <sub>hitung</sub> (X <sub>3</sub> <sup>2</sup> )

### 2.3.3 Pemeriksaan Asumsi Residual

Residual akan dianggap sebagai sebuah kesalahan dalam pengukuran apabila memenuhi syarat identik, independen, dan berdistribusi secara normal. Hal ini dikarenakan model regresi yang dibentuk didasarkan pada minimisasi jumlah kuadrat error.

#### 2.3.3.1 Uji Identik

Pengujian ini dilakukan untuk guna mengidentifikasi apakah penyebaran residual bersifat acak dan memiliki pola tertentu. Hal ini terlihat dari plot antara residual dengan nilai taksiran (*Y*). Jika plot tidak menunjukkan tanda-tanda adanya kecenderungan naik ataupun turun (nilai residual tersebar secara acak), maka residual dianggap identik.

### 2.3.3.2 Uji Independen

Uji independensi ini bertujuan untuk menentukan apakah terdapat ketergantungan antara residual pada pengamatan dalam jangka waktu tertentu. Uji ini dapat dilakukan dengan menggunakan plot fungsi *Auto Correlation Function* (ACF). Residual dianggap independen jika nilai ACF berada dalam interval  $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$ , di mana n adalah jumlah pengamatan.

### 2.3.3.3 Uji Normalitas

Uji normalitas bertujuan untuk menemukan apakah data yang dikumpulkan berdistribusi secara normal atau berasal dari populasi yang berdistribusi normal. Terdapat beberapa metode uji statistik normalitas yang dapat digunakan, antara lain *Chi-Square*, *Kolmogorov-Smirnov*, *Lilliefors*, dan *Shapiro-Wilk*.

### 2.3.4 Pengujian Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Pengujian ini merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengidentifikasi apakah terdapat pengaruh dari faktor-faktor yang diujikan terhadap respon *R-square* ( $R^2$ ) yang menunjukkan koefisien determinasi pada nilai antara 0-1. Hubungan variabel semakin lemah apabila  $R^2$  semakin kecil, begitu pula sebaliknya hubungan diantara variabel akan semakin kuat jika  $R^2$  mendekati 1. Berikut rumus untuk memperoleh nilai  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{JK(\text{Regresi})}{JKT} \quad (2.20)$$

### 2.3.5 Grafik Permukaan Respon dan Penentuan Titik Optimum Faktor

Membuat *contour* plot respon dari berbagai faktor yang berpengaruh terhadap respon merupakan salah satu metode dalam menunjukkan model *response surface*. *Range* merupakan *contour* plot yang menunjukkan besaran respon yang dihasilkan dari pengujian. Untuk menemukan kombinasi level variabel bebas yang

paling optimal maka digunakanlah *range* ini sebagai petunjuk letak titik optimum variabel.

Bentuk persamaan untuk 3 faktor variabel ialah sebagai berikut:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Nilai  $x_1, x_2, \dots, x_k$  adalah nilai optimal respon yang diinginkan agar sesuai dengan data yang diprediksi. Analisis yang dihasilkan akan disederhanakan dengan mengurangi persamaan kedua menjadi bentuk kanonik sehingga dapat ditetapkan turunan  $Y$  terhadap vektor  $X$  yaitu sama dengan 0, maka dapat dihasilkan rumusan sebagai berikut:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = \frac{\partial Y}{\partial X_2} = \dots = \frac{\partial Y}{\partial X_k} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Berdasarkan pada dua persamaan diatas maka titik optimum dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial X_1} &= b_1 + 2b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + b_{13}X_3 \quad \dots\dots\dots (2.23) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial X_2} &= b_2 + b_{12}X_1 + b_{22}X_2 + b_{23}X_3 = \quad \dots\dots\dots (2.24) \\ &0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial X_3} &= b_3 + b_{13}X_1 + b_{23}X_2 + 2b_{33}X_3 \quad \dots\dots\dots (2.25) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Persamaan-persamaan tersebut diselesaikan dengan cara menggunakan metode matriks sehingga dihasilkan bentuk persamaan matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 2b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ -b_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ -b_3 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya menentukan titik-titik optimum setiap faktor dengan menggunakan rumus berikut:

$$\varphi_i = X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + \dots \dots \dots (2.26)$$

$X_0$

Ket:

$\varphi_i$  = nilai faktor – i; i = 1,2, ..., k

$X_1$  = faktor ke – i; i = 1,2, ..., k

$\Delta X_{+1,-1}$  = nilai faktor level tertinggi – terendah

$X_0$  = nilai faktor terhadap titik pusat

Untuk mengetahui besaran nilai optimal respon dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Y = b_0 + \frac{1}{2} \begin{matrix} X_1 & t \\ [X_2] & b \\ X_3 \end{matrix}$$

Ket:

Y = nilai optimal respon

$b_0$  = koefisien konstanta

$X_1$

$[X_2]$  = titik level masing-masing faktor

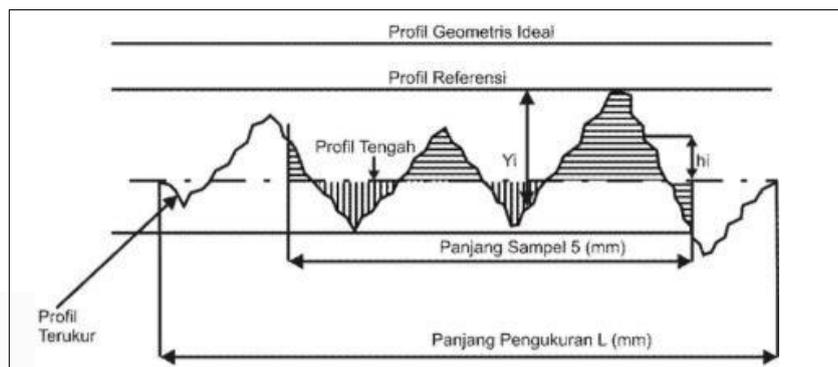
$X_3$

Setelah mengetahui kondisi optimum setiap faktor dan nilai optimal respon maka dapat ditentukan kondisi optimalnya dengan titik stasioner yang dibentuk dari kurva tiga dimensi sebagai buktinya.

## 2.4 Kekasaran Permukaan

Kekasaran mengacu pada jarak deviasi dari permukaan nominal dan ditentukan oleh sifat bahan dan metode proses yang menghasilkan bentuk permukaan tersebut. *Waviness* menunjukkan besar penyimpangan jarak sayatan saat proses pengerjaan. Kondisi ini bisa disebabkan oleh getaran, pembengkokan, perlakuan panas, dan faktor lainnya. Kekasaran permukaan adalah sifat terukur

yang mengacu pada perubahan. Permukaan akhir atau *surface finish* adalah istilah terkait yang mencerminkan kehalusan atau kualitas keseluruhan permukaan. Secara umum, sering digunakan sebagai kata lain untuk kekasaran permukaan. Profil geometri sebuah permukaan benda ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut.

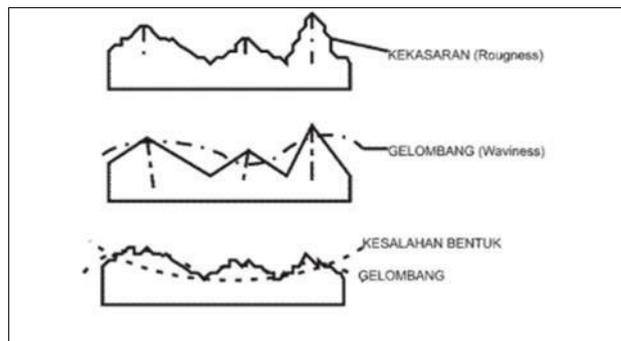


Gambar 2. 1 Profil Geometri Ideal Permukaan Benda

Suatu kekasaran permukaan memberikan kesan bila benda atau produk tersebut disentuh. Karakteristik permukaan adalah hal yang penting dalam dunia produksi yang mengharuskan para pelaku produksi memahami metode dan cara produksi agar menghasilkan produk dengan kekasaran permukaan yang diharapkan.

Tingkatan kekasaran permukaan mempunyai peranan penting terhadap proses perencanaan sebuah komponen pemesinan terutama menyangkut permasalahan pelumasan gesekan, keausan permukaan, ketahanan tekanan, kelelahan dan sebagainya. Terdapat beberapa satuan yang dipakai dalam pengukuran kekasaran permukaan, antara lainnya yaitu  $R_a$  (*Roughness Average*),  $R_z$  (*Roughness Depth*),  $R_p$  (*Roughness Profile*), dan sebagainya.

Pada suatu permukaan benda terdapat kekasaran permukaan, gelombang pada permukaan benda dan kesalahan bentuk gelombang pada permukaan benda seperti gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2. 2 Profil Permukaan Benda

## 2.5 Akurasi Dimensi

Akurasi dimensi merupakan ukuran yang menunjukkan kepresisian ukuran sebuah produk yang diukur dengan nilai yang sebenarnya. Menurut Iuliano dkk, Mengenai hasil akurasi objek 3D menemukan bahwa terdapat penyimpangan dimensi pada objek sebesar 0,7 mm. Adapun menurut penelitian Mahesa dkk. terdapat penyimpangan dimensi sebesar 5-15% yang berdasarkan karakterisasi geometri objek 3D *printing*. Penyimpangan ukuran dimensi geometri ini tentu mempengaruhi proses produksi objek-objek 3D *printing* terutama pada industri yang melakukan proses perakitan.

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai pengaruh *printing speed* terhadap *surface roughness* produk yang dibuat menggunakan teknologi 3D *Printing*. Dalam penelitian ini, filamen yang digunakan adalah filamen *Polylactic Acid* (PLA) dengan alat *surface roughness tester* dari Mitutoyo SJ-210. Parameter yang divariasikan yaitu *printing speed* yang divariasikan menjadi 50% untuk spesimen 1, 100% untuk spesimen 2 dan 150% untuk spesimen 3. Spesimen 3D *Printing* berbentuk kubus dengan dimensi 20 mm x 20 mm x 20 mm dengan sisi yang akan diukur tingkat kekasaran permukaannya yaitu keempat sisi samping kubus. Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa rata-rata nilai hasil kekasaran permukaan (Ra) cenderung semakin kasar jika *print speed* semakin tinggi. (Taufik et al., 2020)

Penelitian mengenai optimasi parameter proses pada mesin 3D *Printer* untuk mendapatkan nilai keakurasian dimensi pada filamen fleksibel. Pada penelitian ini menggunakan filamen jenis Eflex dengan diameter 1,75 dengan metode Taguchi *L<sub>27</sub> Orthogonal Array*. Parameter proses yang digunakan yaitu *flowrate*, *layer thickness*, *nozzle temperature*, *printing speed*, *overlap*, dan *fan speed* dengan spesimen penelitian berbentuk kubus berukuran 20 mm x 20 mm x 20 mm. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan bahwa parameter proses yang paling optimal untuk mendapatkan nilai keakurasian dimensi terbaik yaitu untuk dimensi X menggunakan parameter *flowrate* 110%, *layer thickness* 0,10 mm, *nozzle temperature* 210°C, *print speed* 40 mm/s, *overlap* 75% dan *fan speed* 50%. Sedangkan untuk dimensi Y adalah *flowrate* 120%, *layer thickness* 0,20 mm, *nozzle temperature* 230°C, *print speed* 30 mm/s, *overlap* 75 %, dan *fan speed* 100%. Serta dimensi Z adalah *flowrate* 120 %, *layer thickness* 0,30 mm, *nozzle temperature* 210°C, *print speed* 30 mm/s, *overlap* 50 %, dan *fan speed* 100%. (Pristiansyah et al., 2019)

Penelitian mengenai pengaruh parameter proses berupa suhu dan orientasi *build* terhadap akurasi dimensi dan kekasaran permukaan dari material *Thermoplastic Elastomer* (TPE) hasil cetak FDM 3D *Printing*. Pengujian kekasaran pada penelitian ini mengacu pada metode standar ASTM D2240 untuk pengukuran *shore D hardness* dan untuk pengukuran akurasi dimensi menggunakan alat *vernier caliper*. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa suhu dan orientasi *build* mempunyai pengaruh terhadap nilai akurasi dimensi dan kekasaran dengan sifat filamen TPE yang berbeda dengan filamen PLA. Namun, nilai porositas tidak berpengaruh signifikan terhadap kekasaran sedangkan jumlah lapisan berpengaruh terhadap nilai kekasaran. (Pratama & Adib, n.d.)

Penelitian mengenai optimasi nilai keakurasian dimensi dengan menggunakan filamen PLA *Food Grade* pada mesin 3D *Printer* dengan teknologi FDM. Pada penelitian ini parameter yang digunakan adalah suhu *nozzle*, suhu meja mesin, dan tebal/tipis layer. Benda yang akan diuji berbentuk silinder dengan ukuran  $\varnothing$  20 mm, tinggi 20 mm dan tebal dinding 2 mm. Benda tersebut akan diukur menggunakan jangka sorong digital dengan tingkat ketelitian 0,01 mm pada

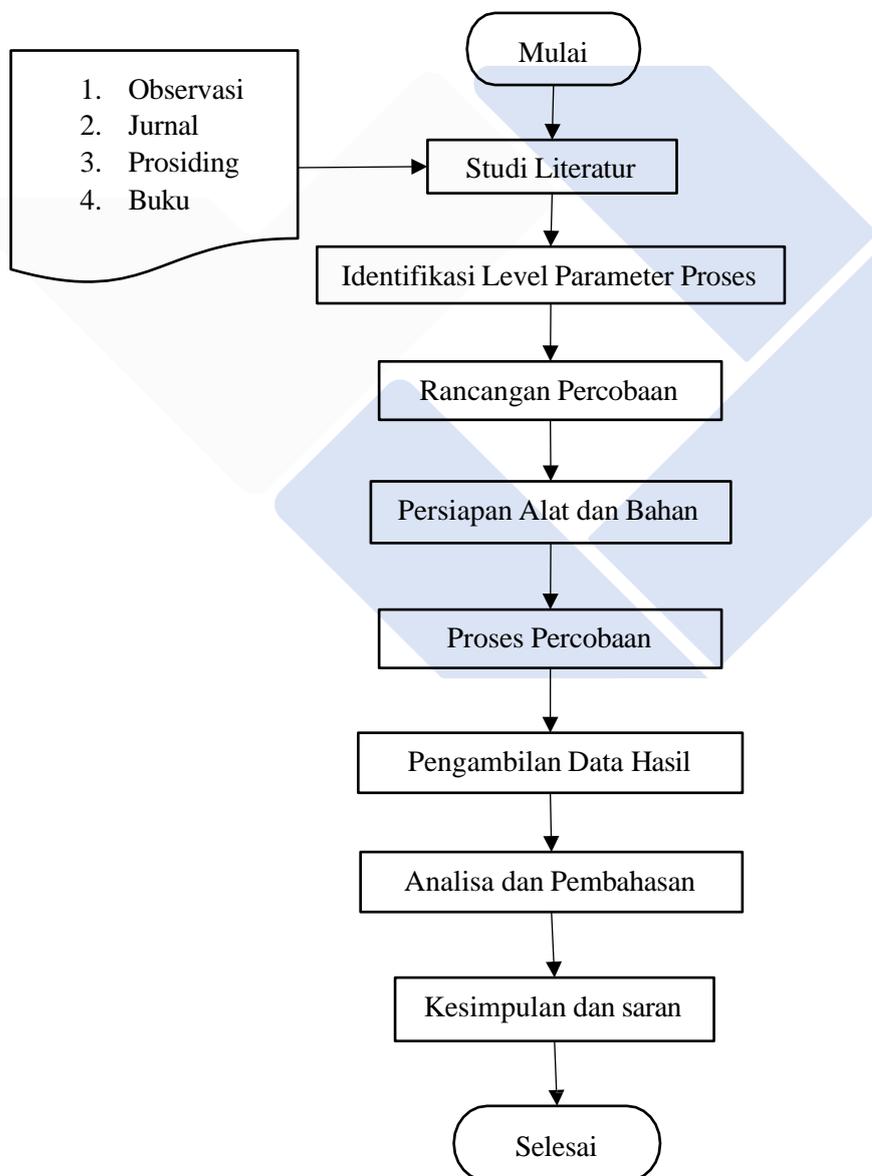
tiga posisi berbeda. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan hasil eksperimen nomor satu mempunyai tingkat akurasi dimensi terbaik dengan nilai 19,921 yang memiliki selisih 0,079 terhadap diameter 20 mm, pada *software slicing* nilai akurasi dimensi paling baik didapatkan dari nilai parameter berupa suhu *nozzle* sebesar 190°C, suhu meja mesin 55°C, dan tebal *layer* 0,2 mm. Nilai akurasi dimensi terburuk didapatkan dari nilai parameter suhu *nozzle* 200°C, suhu meja mesin 60°C, dan tebal *layer* 0,2 mm. (Feriadi, n.d.)



## BAB III METODE PELAKSANAAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode penyelesaian yang digunakan dalam proyek akhir ini ditunjukkan oleh gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

## 3.2 Studi Literatur

Studi literatur perlu dilakukan untuk mendapatkan data pendukung dan referensi teoritis selama proses penelitian berlangsung. Literatur yang dipelajari dapat bersumber dari beberapa buku, jurnal, artikel serta teori-teori *3D printing* yang berkaitan dengan permasalahan yang sedang diteliti.

## 3.3 Persiapan Alat dan Bahan

Dalam melakukan penelitian ini terlebih dahulu disiapkan alat dan bahan yang akan digunakan untuk melakukan penelitian.

### 3.3.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan selama penelitian berlangsung yaitu sebagai berikut:

1. Mesin 3D *Printer Creality Ender 3 Pro*

Mesin *printer* ini memiliki dimensi 220mm×220mm×250mm dengan diameter *nozzle* sebesar 0,8mm. Mesin 3D *Printer Creality Ender 3 Pro* ditunjukkan oleh gambar 3.2 berikut



Gambar 3. 2 Mesin 3D *Creality Ender 3 Pro*

## 2. Laptop

Laptop digunakan untuk membuat desain objek 3D yang akan dicetak dengan menggunakan *software* CAD, untuk menganalisa data hasil percobaan, dan untuk membuat setting untuk parameter mesin menggunakan *software* *Creativity Slicer*.

## 3. Mikrometer Luar

Mikrometer luar digunakan pada saat proses pengambilan data untuk mengukur keakuratan dimensi benda hasil pencetakan 3D apakah sesuai dengan desain yang diinginkan. Mikrometer luar ditunjukkan oleh gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3. 3 Mikrometer Luar Ket. 0,001 mm

## 4. *Surface Roughness Tester*

*Surface roughnes tester* merupakan alat pengujian untuk mengukur nilai kekasaran permukaan produk hasil pencetakan 3D yang digunakan pada saat proses pengambilan data. Alat *surface roughness tester* ditunjukkan oleh gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3. 4 *Surface Roughness Tester* Mitutoyo SJ-210

#### 5. *V-block*

*V-block* adalah peralatan bantuan presisi yang terbuat dari balok baja yang dibentuk memiliki alur v pada permukaannya. *V-block* digunakan sebagai dudukan benda kerja yang berbentuk seperti silinder agar tetap stabil. *V-block* ditunjukkan pada gambar 3.5 dibawah ini.



Gambar 3. 5 *V-Block*

#### 6. *Software Solidworks*

*Solidworks* merupakan sebuah perangkat lunak *Computer Aided Design (CAD)* yang dibuat untuk membantu para desainer untuk membuat gambar rancangan produk model 3D. Dengan bantuan *software* ini, desainer dapat membuat model 3D yang memiliki kompleksitas beragam, merancang produk serta membuat

gambar kerja dengan cepat dan efisien. *Solidworks* memiliki beragam fitur di antara lainnya adalah fitur *Solidworks Composer*, *Solidworks Simulation*, *Solidworks Electrical*, *Solidworks Flow Simulation*, *Solidworks Motion*, *Solidworks Visualize*, *Solidworks Plastics*, *Solidworks Routing*, *Photoview 360*, *Solidworks Toolbox*, dan *Solidworks Utilities*.



Gambar 3. 6 *SOLIDWORKS*

#### 7. *Software Creality Slicer*

*Slicer* adalah alat perantara yang mengubah model 3D dengan perintah tertentu yang disesuaikan untuk *printer* 3D tertentu, *Slicer* akan menghasilkan *G-code* yang diperlukan yang mana merupakan bahasa pemrograman *Control Numeric Computer* (CNC) yang diperlukan untuk pencetakan 3D. *Software Creality Slicer* digunakan untuk mengkonversi desain objek 3D *print* menjadi *G-code* yang bisa dibaca oleh mesin serta memasukkan parameter percobaan.



Gambar 3. 7 *Creality Slicer*

### 3.3.2 Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini bahan yang digunakan adalah filamen PLA (*Polylactid Acid*) dengan diameter 1,75mm berwarna *silver*. Filamen PLA yang digunakan ditunjukkan oleh gambar 3.8 dibawah ini.

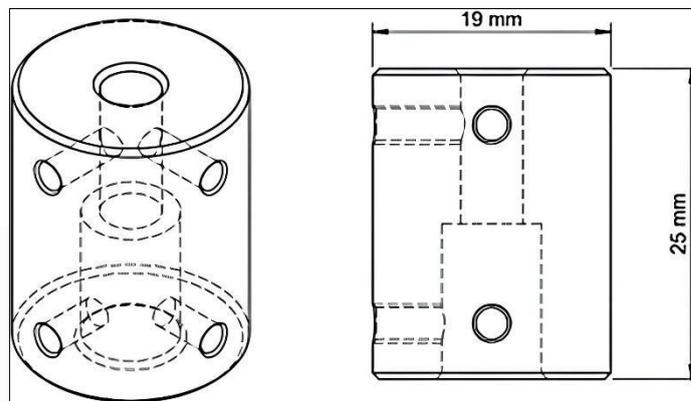


Gambar 3. 8 Filamen PLA

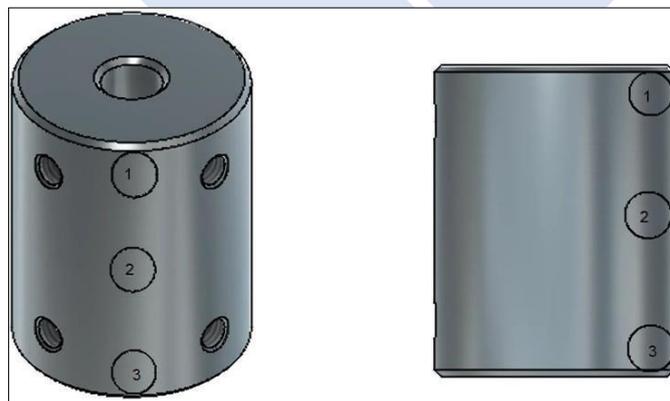
### 3.4 Rancangan Percobaan

#### 3.4.1 Desain Spesimen Percobaan

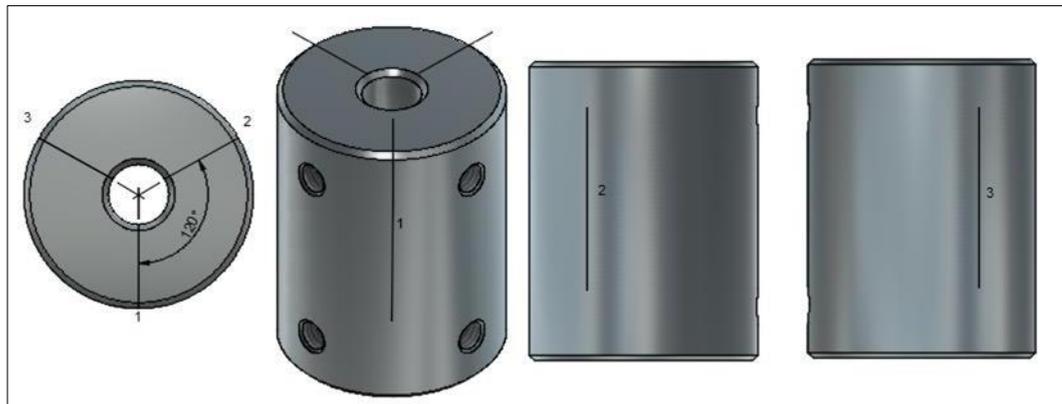
Spesimen yang akan dibuat adalah koping. Berikut ditunjukkan gambar rancangan spesimen pada gambar 3.9, 3.10, dan 3.11 dibawah ini.



Gambar 3. 9 Gambar Spesimen



Gambar 3. 10 Contoh titik pengukuran untuk uji akurasi dimensi



Gambar 3. 11 Garis untuk pengukuran uji kekasaran permukaan permukaan

### 3.4.2 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan beberapa variabel yang berbeda untuk mendapatkan data hasil percobaan yaitu sebagai berikut:

#### 1. Variabel Respon

Variabel respon adalah variabel yang hasil nilainya selalu berubah tergantung pada perlakuan yang didapatkan oleh sampel percobaan saat proses pengujian. Variabel respon pada penelitian ini adalah kekasaran permukaan dan akurasi dimensi.

#### 2. Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel berisikan faktor-faktor yang dapat memiliki pengaruh terhadap nilai hasil percobaan saat proses pengujian. Pada penelitian ini, variabel bebasnya adalah suhu *nozzle*, *layer height*, dan *print speed*. Berikut disajikan tabel variabel bebas percobaan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Variabel Bebas

	<i>Nozzle</i>	<i>Layer Height</i>	<i>Print</i>
<b>Level</b>	<i>Temperature</i> (°C)	(mm)	<i>Speed</i> (mm/s)
<b>1</b>	215	0,2	50

2	230	0,25	65
3	245	0,3	80

### 3.4.3 Parameter Percobaan

Pada rancangan percobaan ini akan menggunakan parameter yang dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Parameter Penelitian

<b>Parameter Penelitian</b>			
<b>A. Parameter Proses</b>			
<b>a. Suhu Nozzle</b>	215°C	230°C	245°C
<b>b. Layer Height</b>	0,2 mm	0,25 mm	0,3 mm
<b>c. Print Speed</b>	50 mm/s	65 mm/s	80 mm/s
<b>B. Parameter Konstan</b>			
<b>a. Layer Thickness</b>	1,2 mm		
<b>C. Parameter Respon</b>			
<b>a. Kekasaran Permukaan</b>			
<b>b. Akurasi Dimensi</b>			

### 3.4.4 Model Orde Kedua *Central Composite Design* (CCD)

Pada sebuah penelitian banyaknya sampel ditentukan sebelum memulai percobaan. Pada penelitian ini jumlah banyaknya percobaan ditentukan dengan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) rancangan orde model kedua *Central Composite Design* (CCD) dengan tiga faktor.

Jumlah percobaan dalam penelitian ini sejumlah 20 sampel yang terdiri dari 8 sampel dari sampel *cube point*, 6 sampel dari *axial point*, dan 6 sampel dari sampel *center point*. Kode Sampel Percobaan *Central Composite Design* (CCD) dengan tiga faktor ditunjukkan oleh tabel 3.3 dan tabel 3.4 untuk tabel rotabilitas berikut ini.

Tabel 3. 3 Kode Sampel Percobaan *Central Composite Design* (CCD)

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	-1	-1
<b>-1</b>	-1	-1
<b>0</b>	0	-1,68179
<b>0</b>	1,681793	0
<b>1</b>	1	-1
<b>1</b>	-1	1
<b>0</b>	0	0
<b>-1,68179</b>	0	0
<b>1,681793</b>	0	0
<b>0</b>	0	0
<b>0</b>	0	0
<b>-1</b>	1	-1
<b>-1</b>	1	1
<b>0</b>	-1,68179	0
<b>-1</b>	-1	1
<b>0</b>	0	0
<b>0</b>	0	0
<b>0</b>	0	0
<b>0</b>	0	1,681793
<b>1</b>	1	1

Tabel 3. 4 Tabel Nilai Rotabilitas

<b>Nilai</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>
<b>X1</b>	215	230	245
<b>X2</b>	0,2	0,25	0,3
<b>X3</b>	50	65	80

### 3.5 Identifikasi Level Proses

Berdasarkan kode sampel percobaan diatas maka, pembuatan sampel yang digunakan dalam percobaan ini diurutkan mengikuti kode sampel tersebut sehingga rancangan level proses pada percobaan ini seperti yang terlihat pada tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 5 Variasi Level pada Varibel Penelitian

<b>Nomor Eksperimen</b>	<b>Suhu Nozzle (°C)</b>	<b>Layer Height (mm)</b>	<b>Print Speed (mm/s)</b>
<b>1</b>	245	0,20	50
<b>2</b>	215	0,20	50
<b>3</b>	230	0,25	40
<b>4</b>	230	0,33	65
<b>5</b>	245	0,30	50
<b>6</b>	245	0,20	80
<b>7</b>	230	0,25	65
<b>8</b>	205	0,25	65
<b>9</b>	255	0,25	65
<b>10</b>	230	0,25	65
<b>11</b>	230	0,25	65
<b>12</b>	215	0,30	50
<b>13</b>	215	0,30	80
<b>14</b>	230	0,17	65
<b>15</b>	215	0,20	80
<b>16</b>	230	0,25	65
<b>17</b>	230	0,25	65
<b>18</b>	230	0,25	65
<b>19</b>	230	0,25	90

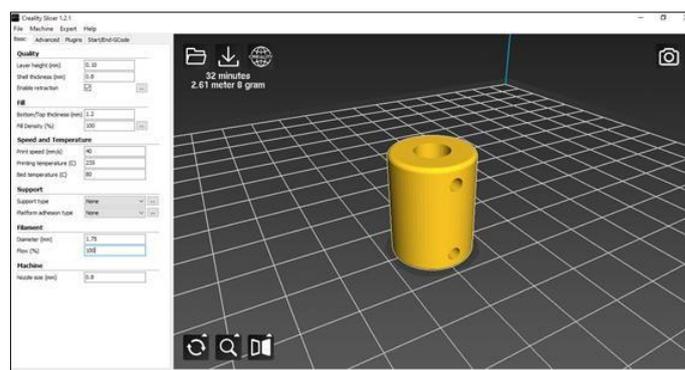
<b>Nomor Eksperimen</b>	<b>Suhu Nozzle (°C)</b>	<b>Layer Height (mm)</b>	<b>Print Speed (mm/s)</b>
<b>20</b>	245	0,30	80

### 3.6 Proses Percobaan

#### 3.6.1 Proses Pencetakan

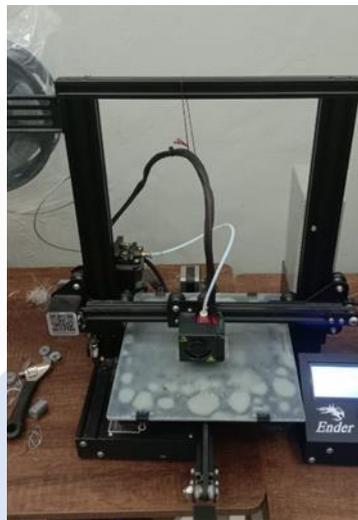
Tahapan-tahapan proses penyetakan spesimen dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Desain spesimen yang telah dibuat di *solidworks* diekspor atau diubah ke dalam format STL.
2. Buka *software slicer* dan masukkan file *design* format STL tadi untuk memasukkan parameter proses yang ada pada tabel percobaan.
3. Setelah memasukkan dan mengatur parameter proses di *slicer* maka selanjutnya simpan file *G-Code* yang dibuat lalu masukkan file *G-Code* tersebut ke dalam kartu SD atau kartu memori. Proses *slicing* ditunjukkan oleh gambar 3.12 dibawah ini.



Gambar 3. 12 Proses *Slicing* di *Software Creality Slicer*

4. Setelah itu masukkan kartu SD atau memori ke dalam mesin *3D print*, kemudian nyalakan mesin *3D print*.
5. Setelah mesin dihidupkan, pasang filamen PLA pada mesin kemudian kalibrasi mesin atau *auto home* pada menu pengaturan mesinnya.
6. Klik *print from SD* untuk memilih file *G-code* mana yang akan dicetak. Proses pencetakan dilakukan sesuai dengan *G-code* yang terbaca pada mesin 3D. Proses pencetakan spesimen ditunjukkan oleh gambar 3.13 berikut.



Gambar 3. 13 Proses Pencetakan Spesimen Percobaan

7. Setelah spesimen selesai dicetak, selanjutnya akan dilakukan proses pengukuran untuk uji keakuratan dimensi menggunakan mikrometer luar. Pada spesimen akan diukur diameternya apakah sesuai dengan design gambar kerja yang dirancang atau mengalami perubahan ukuran baik itu bertambah atau berkurang ukurannya. Setelah diukur keakuratan dimensinya maka selanjutnya dilakukan proses pengujian kekasaran permukaannya.

### 3.6.2 Proses Pengukuran Keakuratan Dimensi

Pada pengukuran keakuratan dimensi ini yang diukur adalah diameter luar dari spesimen. Langkah - langkah dalam proses pengukuran keakuratan dimensi adalah sebagai berikut:

1. Lakukan kalibrasi pada mikrometer luar terlebih dahulu agar hasil pengukuran lebih akurat. Mikrometer yang digunakan yaitu mikrometer luar dengan tingkat ketelitian 0,001 mm.
2. Lakukan proses pengukuran diameter luar spesimen di tiga titik berbeda pada permukaan yang sama. Tandai setiap titik yang diukur menggunakan spidol. Proses pengukuran spesimen dapat dilihat pada gambar 3.14 berikut.



Gambar 3. 14 Proses Pengukuran Sampel

3. Catat hasil pengukuran dimensi spesimen. Lakukan pengujian yang sama terhadap 20 sampel percobaan dengan perlakuan pengukuran yang sama.

### 3.6.3 Proses Pengujian Kekasaran Permukaan

Untuk pengukuran pengujian kekasaran permukaan, digunakan alat pengujian kekasaran permukaan Mitutoyo SJ-210. Berikut langkah-langkah dalam melakukan pengujian kekasaran permukaan:

1. Sampel hasil *3D printing* akan diukur kekasarannya menggunakan *surface roughness tester*. Sampel penelitian *3D Printing* dapat dilihat pada gambar 3.15 berikut ini.



Gambar 3. 15 Sampel 3D Print

2. Lakukan pengujian di tiga garis berbeda pada permukaan sampel uji dengan jarak tertentu. Tandai setiap garis pengujian dengan spidol.
3. Kalibrasi terlebih dahulu alat *surface roughness tester* agar data hasil pengujian lebih akurat. Proses kalibrasi alat *surface roughness tester* ditunjukkan pada gambar 3.16 berikut.



Gambar 3. 16 Proses Kalibrasi *Surface Roughness Tester*

4. Pengujian *surface roughness* dilakukan dengan memposisikan alat uji kekasaran pada *holding dial* dimana sampel yang akan diuji diposisikan pada *V-block* di atas meja perata. Atur ketinggian alat ukur dengan sampel yang akan diukur pada ketinggian yang sama rata pada ujung alat sensor uji dengan permukaan yang akan diuji pada sampel. Proses pengujian *Surface Roughness* dapat dilihat pada gambar 3.17 berikut.



Gambar 3. 17 Proses Pengujian Kekasaran Permukaan dengan *Surface Roughness Tester*

5. Posisi ujung alat sensor *surface roughness* diposisikan bersentuhan pada permukaan sampel yang akan diuji. Jika sensor terlalu jauh atau tidak bersentuhan dengan permukaan sampel maka *surface roughness tester* akan mendeteksi *over rage* sehingga sampel tidak bisa diukur kekasarannya.
6. Tekan tombol *start* pada alat *surface roughness* untuk memulai proses pengukuran permukaan sampel. Nilai hasil pengukuran kekasaran akan terlihat pada *display* layar *surface roughness tester*.

7. Setelah mendapatkan nilai kekasaran permukaan, bebaskan ujung sensor alat uji dengan permukaan sampel. Ulangi pengujian kekasaran permukaan kembali pada 20 sampel.

### **3.7 Pengambilan Data Hasil**

Proses pengambilan dan pengumpulan data hasil dilakukan di kampus Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, lebih tepatnya di Laboratorium Teknik Mesin. Data yang dihasilkan berupa data hasil pengukuran keakuratan dimensi sampel dengan menggunakan mikrometer luar dengan tingkat ketelitian 0,001 dan nilai kekasaran permukaan sampel dengan alat *surface roughness tester* Mitutoyo SJ-210. Data yang dihasilkan tersebut kemudian dicatat dan kemudian dilakukan pengolahan data berdasarkan data yang telah dicatat. Pada penelitian ini, data diolah menggunakan metode *Response Surface*. Penelitian ini tidak menggunakan replikasi pada setiap kombinasi level penelitiannya.

### **3.8 Analisis dan Pembahasan**

Membuat analisis terhadap hasil penelitian untuk mengidentifikasi pengaruh level pada variabel proses pencetakan *3D printing* terhadap keakurasian dimensi dan nilai kekasaran permukaan serta mengetahui kombinasi variabel mana yang paling optimal untuk menghasilkan nilai keakurasian dimensi yang paling mendekati dan menghasilkan nilai kekasaran permukaan paling rendah atau sedikit.

### **3.9 Kesimpulan dan Saran**

Kesimpulan dan saran adalah tahap terakhir dalam proses penelitian. Setelah melakukan analisis terhadap hasil penelitian selanjutnya adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian yang sudah dilakukan.

## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1 Pengambilan Data Nilai Kekasaran Permukaan

Setiap spesimen akan diukur nilai kekasaran permukaannya pada tiga tempat permukaan yang berbeda sepanjang garis 7 mm menggunakan alat *surface roughness tester*. Permukaan yang akan diukur adalah sepanjang sisi diameter spesimen. Berikut disajikan data hasil pengujian kekasaran permukaan pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4. 1 Data Hasil Uji Kekasaran Permukaan

No. Eksperimen	Nilai Kekasaran / Ra ( $\mu m$ )			Rata-Rata Hasil Kekasaran Permukaan/ $\Sigma Ra$ ( $\mu m$ )
	1	2	3	
1	20.334	15.866	17.277	17.826
2	13.727	25.010	13.418	17.385
3	16.660	17.326	16.352	16.779
4	22.919	23.920	20.787	22.542
5	19.054	19.309	19.227	19.197
6	13.285	17.233	12.798	14.439
7	17.897	17.845	15.768	17.170
8	21.980	29.507	21.307	24.265
9	16.210	16.309	16.317	16.279
10	16.686	15.795	16.799	16.427
11	16.493	16.213	18.880	17.195
12	22.166	20.191	18.726	20.361
13	19.304	30.149	18.601	22.685
14	17.178	11.475	11.093	13.249
15	14.654	20.747	24.337	19.913

No. Eksperimen	Nilai Kekasaran / Ra ( $\mu\text{m}$ )			Rata-Rata Hasil Kekasaran Permukaan/ $\Sigma$ Ra ( $\mu\text{m}$ )
	Garis			
	1	2	3	
16	20.802	16.916	15.567	17.762
17	21.105	16.445	16.473	18.008
18	16.605	14.038	14.516	15.053
19	20.671	15.815	15.372	17.286
20	22.481	18.359	20.119	20.320

Berdasarkan pada tabel 4.1 data-data hasil pengujian dapat diketahui bahwa spesimen nomor 13 merupakan spesimen yang mempunyai nilai rata-rata kekasaran permukaan paling rendah yaitu sebesar 13.249  $\mu\text{m}$ . Untuk spesimen yang mempunyai nilai rata-rata kekasaran permukaan paling tinggi adalah spesimen nomor 8 dengan nilai rata-rata kekasaran sebesar 24.265  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2 Pengambilan Data Nilai Keakurasian Dimensi

Spesimen hasil pencetakan kemudian diukur dimensinya dengan diameter luar pada gambar kerja yaitu  $\varnothing 19$  mm. Proses pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali di tiga titik berbeda pada permukaan sampel yang sama. Data hasil pengukuran keakuratan dimensi dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2 Data Hasil Pengukuran Dimensi

No. Eksperimen	Nilai Akurasi Dimensi (mm)			Rata-Rata Hasil Akurasi Dimensi (mm)
	Titik			
	1	2	3	
1	18.108	18.397	18.204	18.236
2	18.381	18.334	18.465	18.393
3	18.165	18.110	18.137	18.137
4	18.110	18.417	18.303	18.277
5	18.406	18.404	18.188	18.333

No. Eksperimen	Nilai Akurasi Dimensi (mm)			Rata-Rata Hasil Akurasi Dimensi (mm)
	Titik			
	1	2	3	
6	18.403	18.471	18.480	18.451
7	18.205	18.437	18.707	18.450
8	17.490	18.193	18.307	17.997
9	18.365	18.439	18.289	18.364
10	18.408	18.382	18.807	18.532
11	18.307	18.399	18.136	18.281
12	18.104	18.391	18.468	18.321
13	18.313	18.181	18.394	18.296
14	18.452	18.238	18.437	18.376
15	17.303	17.427	18.805	17.845
16	18.487	18.413	18.104	18.335
17	18.103	18.441	18.175	18.240
18	18.290	18.190	18.354	18.278
19	18.495	18.371	18.707	18.524
20	18.506	18.452	18.909	18.622

Dari data rata-rata hasil pengujian keakurasian dimensi pada tabel 4.2 diatas dapat diketahui bahwa nilai rata-rata keakurasian dimensi yang paling mendekati nilai diameter pada gambar kerja adalah spesimen nomor 20 dengan nilai rata-rata keakurasian dimensi sebesar 18.622 mm. Spesimen nomor 15 dengan nilai rata-rata keakurasian dimensi sebesar 17.845 mm merupakan spesimen dengan hasil pengukuran paling menjauhi atau tidak akurat.

#### 4.3 Pengolahan Data Menggunakan *Response Surface Methodology*

Dalam melakukan proses olah data dengan menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) dilakukan beberapa perhitungan. Yang pertama dihitung adalah perhitungan untuk menentukan model *response surface* menggunakan rumus persamaan regresi linier ganda.

$$\vec{b} = (X^t X)^{-1} X^t Y$$

Kode matriks X ialah sebagai berikut:

1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1
1	0	0	-1,68	0	0	2.8224	0	0	0	0
1	0	1,68	0	0	2.8224	0	0	0	0	0
1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-1,68	0	0	2.8224	0	0	0	0	0	0
1	1,68	0	0	2.8224	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1
1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1
1	0	-1,68	0	0	2.8224	0	0	0	0	0
1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1,68	0	0	2.8224	0	0	0	0
h1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Kode matriks X diatas adalah kode untuk sampel-sampel variabel percobaan yang dilakukan. Parameter proses yang digunakan pada penelitian ini adalah *nozzle temperature*, *layer height* dan *print speed*. Masing-masing angka mewakili setiap level pada tiap parameter dan terdapat nilai  $\alpha$ .

Matriks Y adalah hasil nilai dari parameter respon yang digunakan dalam melakukan percobaan. Pada penelitian ini akan didapatkan nilai untuk dua variabel respon yaitu nilai rata-rata hasil kekasaran permukaan dan nilai rata-rata hasil pengukuran keakurasian dimensi. Nilai matriks Y adalah hasil rata-rata nilai kekasaran permukaan dan keakurasian dimensi

$$Y = \begin{pmatrix} 17.826 \\ 17.385 \\ 16.779 \\ 22.542 \\ 19.197 \\ 14.439 \\ 17.170 \\ 24.265 \\ 16.279 \\ 16.427 \\ 17.195 \\ 20.361 \\ 22.685 \\ 13.249 \\ 19.913 \\ 17.762 \\ 18.008 \\ 15.053 \\ 17.286 \\ 20.320 \end{pmatrix}$$

(Nilai Rata-Rata  
Kekasaran Permukaan)

$$Y = \begin{pmatrix} 18.236 \\ 18.393 \\ 18.137 \\ 18.277 \\ 18.333 \\ 18.451 \\ 18.450 \\ 17.997 \\ 18.364 \\ 18.532 \\ 18.281 \\ 18.321 \\ 18.296 \\ 18.376 \\ 17.845 \\ 18.335 \\ 18.240 \\ 18.278 \\ 18.524 \\ 18.622 \end{pmatrix}$$

(Nilai Rata-Rata  
Keakuratan Dimensi)

Setelah menentukan matriks X dan matriks Y, selanjutnya dapat melakukan perhitungan untuk mencari persamaan *second order* dengan cara mencari nilai dari persamaan  $[(X^T X)^{-1} (X^T Y)]$ .

### a. Kekasaran Permukaan

#### 1. Menentukan nilai $X^T$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1.68 & 1.68 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1.68 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1.68 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1.68 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1.68 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2.8224 & 2.8224 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 2.8224 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2.8224 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 2.8224 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2.8224 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

#### 2. Menentukan nilai $X^T X$

Nilai  $X^T X$  didapatkan dengan cara mengalikan  $X^T$  dengan matriks X, sehingga dihasilkan nilai  $X^T X$ .

$$\begin{array}{r}
 \mathbf{I} \\
 \mathbf{h}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 20 & 0 & 0 & 0 & 13.644 & 13.644 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 13.644 & 0 & 0 & 0 & 23.93 & 8 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 13.644 & 0 & 0 & 0 & 8 & 23.93 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 13.644 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 23.93 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8
 \end{pmatrix}$$

3. Menentukan nilai  $(X^T X)^{-1}$

Nilai  $(X^T X)^{-1}$  didapatkan dengan meng-invers nilai  $(X^T X)$  yang sudah didapatkan sebelumnya sehingga dapat dihasilkan nilai  $(X^T X)^{-1}$

$$\begin{array}{r}
 \mathbf{I} \\
 \mathbf{h}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 0.1662 & 0 & 0 & 0 & -0.0568 & -0.0568 & -0.05687 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0.0732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0.0732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0.0732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0696 & 0.0068 & 0.0068 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0068 & 0.0696 & 0.0068 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0068 & 0.0068 & 0.0696 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125
 \end{pmatrix}$$

4. Menentukan nilai  $X^T Y$

Nilai  $X^T$  dikalikan dengan nilai matriks  $Y$  nilai rata-rata kekasaran permukaan sehingga dapat dihasilkan nilai  $X^T Y$

$$X^T Y = \begin{pmatrix}
 364.141 \\
 -21.978 \\
 28.612 \\
 3.440 \\
 266.557 \\
 253.143 \\
 248.271 \\
 1.504 \\
 -7.116 \\
 4.306 \\
 4.714
 \end{pmatrix}$$

5. Menentukan nilai  $(X^T X)^{-1} X^T Y$

Untuk menghasilkan nilai dari  $(X^T X)^{-1} X^T Y$  dilakukan perkalian antara nilai matriks  $(X^T X)^{-1}$  dengan nilai dari matriks  $X^T Y$  sehingga dapat dihasilkan nilai dari  $(X^T X)^{-1} X^T Y$  atau nilai  $\beta$ .

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} 16.936 \\ -1.611 \\ 2.097 \\ 0.252 \\ 1.279 \\ 0.436 \\ 0.130 \\ 0.188 \\ -0.8895 \\ 0.538 \\ h \ 0.589 \end{pmatrix}$$

Berdasarkan dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan nilai berikut:

$$\hat{y} = 16.936 - 1.611X_1 + 2.097X_2 + 0.252X_3 + 1.279X_{12} + 0.436X_{22} + 0.130X_{32} + 0.188X_{1X2} - 0.8895X_{1X3} + 0.538X_{2X3} + 0.589X_{1X2X3}$$

## b. Keakurasian Dimensi

### 1. Menentukan nilai $X^T$

Matriks X :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1,68 & 0 & 0 & 2.8224 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1,68 & 0 & 0 & 2.8224 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1,68 & 0 & 0 & 2.8224 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1,68 & 0 & 0 & 2.8224 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1,68 & 0 & 0 & 2.8224 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1,68 & 0 & 0 & 2.8224 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Nilai  $X^T$  :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1.68 & 1.68 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1.68 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1.68 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1.68 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1.68 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2.8224 & 2.8224 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 2.8224 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2.8224 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2.8224 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2.8224 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Menentukan nilai  $X^T X$

$$\begin{pmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 & 13.644 & 13.644 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13.644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13.644 & 0 & 0 & 0 & 23.93 & 8 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13.644 & 0 & 0 & 0 & 8 & 23.93 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13.644 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 23.93 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{pmatrix}$$

3. Menentukan nilai  $(X^T X)^{-1}$

$$\begin{pmatrix} 0.1662 & 0 & 0 & 0 & -0.0568 & -0.0568 & -0.05687 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0732 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0696 & 0.0068 & 0.0068 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0068 & 0.0696 & 0.0068 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0068 & 0.0068 & 0.0696 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix}$$

4. Menentukan nilai  $X^T Y$

$$X^T Y = \begin{pmatrix} 366.288 \\ 1.404 \\ 0.481 \\ 0.581 \\ 249.122 \\ 249.946 \\ 249.969 \\ -0.111 \\ 1.077 \\ 0.597 \\ h & 0.449 \end{pmatrix}$$

5. Menentukan nilai  $(X^T X)^{-1} X^T Y$

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} 18.341 \\ 0.103 \\ 0.0352 \\ 0,0426 \\ -0.0489 \\ 0.0010 \\ 0,0039 \\ -0.0139 \\ 0.1346 \\ 0.0746 \\ h \ 0.056 \end{pmatrix}$$

Menurut data hasil dari perhitungan yang telah dilakukan, maka telah didapatkan hasil berupa nilai sebagai berikut:

$$\hat{y} = 18.341 + 0.103X_1 + 0.0352X_2 + 0.0426X_3 - 0.0489X_1^2 + 0.0010X_2^2 + 0.0039X_3^2 - 0.0139X_1X_2 + 0.1346X_1X_3 + 0.0746X_2X_3 + 0.056X_1X_2X_3$$

#### 4.4 Analysis Of Variance

##### a. Kekasaran Permukaan

Berikut disajikan tabel hasil analisis varian yang telah dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *software minitab* pada Tabel 4.3 dan 4.4 berikut.

Tabel 4. 3 Model *Summary* ANOVA Kekasaran Permukaan Dengan Minitab

<b>Model Summary ANOVA</b>			
<b>S</b>	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
<b>1,41992</b>	86,58%	74,50%	18,77%

Tabel 4. 4 ANOVA Kekasaran Permukaan dengan Minitab

<i>Analysis of Variance</i>					
<i>Source</i>	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Model</b>	9	130,036	14,4484	7,17	0,002
<b>Linear</b>	3	95,357	31,7858	15,77	0,000
<b>Suhu Nozzle</b>	1	35,291	35,2907	17,50	0,002
<b>Layer Height</b>	1	59,197	59,1974	29,36	0,000
<b>Print Speed</b>	1	0,869	0,8694	0,43	0,526
<b>Square</b>	3	25,748	8,5826	4,26	0,035
<b>Suhu Nozzle*Suhu Nozzle</b>	1	23,841	23,8411	11,82	0,006
<b>Layer Height*Layer Height</b>	1	3,003	3,0030	1,49	0,250
<b>Print Speed*Print Speed</b>	1	0,258	0,2583	0,13	0,728
<b>2-Way Interaction</b>	3	8,930	2,9767	1,48	0,280
<b>Suhu Nozzle*Layer Height</b>	1	0,283	0,2828	0,14	0,716
<b>Suhu Nozzle*Print Speed</b>	1	6,330	6,3297	3,14	0,107
<b>Layer Height*Print Speed</b>	1	2,318	2,3177	1,15	0,309
<b>Error</b>	10	20,162	2,0162		
<b>Lack-of-Fit</b>	5	14,404	2,8808	2,50	0,169
<b>Pure Error</b>	5	5,758	1,1516		
<b>Total</b>	19	150,197			

Hipotesis :

$H_0$  : Tidak terdapat pengaruh yang signifikan pada ketiga variabel terhadap kekasaran permukaan.

$H_1$  : Terdapat pengaruh yang signifikan pada ketiga variabel terhadap kekasaran permukaan

Kriteria Uji

Tolak  $H_0$  : jika  $P\text{-Value} < \alpha$

Gagal ditolak : jika  $P\text{-Value} > \alpha$

$\alpha$  : 0.05 (5%)

Analisis :

Berdasarkan hasil data pengujian ANOVA yang dilakukan, didapatkan bahwa nilai *P-Value* pada variabel suhu *nozzle* adalah 0,002 lebih kecil dari  $\alpha : 0.05$ , berarti  $H_0$  ditolak maka dapat disimpulkan bahwa variabel suhu *nozzle* memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan. Pada variabel *layer height* didapatkan nilai *P-Value* sebesar 0,000 yang lebih kecil dari  $\alpha : 0.05$ , berarti  $H_0$  ditolak dan disimpulkan bahwa variabel *layer height* memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan. Pada variabel *print speed* nilai *P-Value* yang didapatkan sebesar 0,526 yang lebih besar dari  $\alpha : 0.05$ , berarti untuk variabel *print speed* tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan karena  $H_0$  gagal ditolak. Nilai *P-Value* untuk interaksi suhu *nozzle* dan *layer height* sebesar 0,716 dan lebih besar dari  $\alpha : 0.05$  yang berarti  $H_0$  gagal ditolak, interaksi antara suhu *nozzle* dan *layer height* tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan. Untuk nilai *P-Value* interaksi suhu *nozzle* dengan *print speed* adalah 0,107, lebih besar dari nilai  $\alpha : 0.05$  yang artinya  $H_0$  gagal ditolak, interaksi antara suhu *nozzle* dengan *print speed* tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan. Nilai *P-Value* untuk interaksi *layer height* dengan *print speed* sebesar 0,309 dan lebih besar dari  $\alpha : 0.05$  sehingga  $H_0$  gagal ditolak dan disimpulkan bahwa interaksi *layer height* dan *print speed* tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan.

#### b. Keakurasian Dimensi

Berikut disajikan tabel hasil analisis varian yang telah dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak *software* minitab pada Tabel 4.5 dan 4.6 berikut ini.

Tabel 4. 5 Model *Summary* ANOVA Akurasi Dimensi Menggunakan Minitab

<b>Model Summary</b>			
<b>S</b>	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
<b>0,136293</b>	69,28%	41,62%	0,00%

Tabel 4. 6 ANOVA Uji Akurasi Dimensi dengan Menggunakan Minitab

<i>Analysis of Variance</i>					
<i>Source</i>	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<b>Model</b>	9	0,418846	0,046538	2,51	0,084
<b>Linear</b>	3	0,186986	0,062329	3,36	0,064
<b>Suhu Nozzle</b>	1	0,144315	0,144315	7,77	0,019
<b>Layer Height</b>	1	0,018196	0,018196	0,98	0,346
<b>Print Speed</b>	1	0,024475	0,024475	1,32	0,278
<b>Square</b>	3	0,040778	0,013593	0,73	0,556
<b>Suhu Nozzle*Suhu Nozzle</b>	1	0,040234	0,040234	2,17	0,172
<b>Layer Height*Layer Height</b>	1	0,000001	0,000001	0,00	0,994
<b>Print Speed*Print Speed</b>	1	0,000004	0,000004	0,00	0,989
<b>2-Way Interaction</b>	3	0,191082	0,063694	3,43	0,060
<b>Suhu Nozzle*Layer Height</b>	1	0,001540	0,001540	0,08	0,779
<b>Suhu Nozzle*Print Speed</b>	1	0,144991	0,144991	7,81	0,019
<b>Layer Height*Print Speed</b>	1	0,044551	0,044551	2,40	0,153
<b>Error</b>	10	0,185757	0,185756		
<b>Lack-of-Fit</b>	5	0,120406	0,024081	1,84	0,259
<b>Pure Error</b>	5	0,065351	0,013070		
<b>Total</b>	19	0,604603			

Hipotesis :

$H_0$  : Tidak terdapat pengaruh yang signifikan pada ketiga variabel terhadap keakurasian dimensi.

$H_1$  : Terdapat pengaruh yang signifikan pada ketiga variabel terhadap keakurasian dimensi

Kriteria Uji

Tolak  $H_0$  : jika  $P\text{-Value} < \alpha$

Gagal ditolak : jika  $P\text{-Value} > \alpha$

$\alpha$  : 0.05 (5%)

Analisis :

Dari hasil data ANOVA tersebut dapat dilihat bahwa nilai *P-Value* untuk variabel suhu *nozzle* adalah sebesar 0,019, lebih kecil dari nilai  $\alpha : 0.05$  maka dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  ditolak yang artinya variabel suhu *nozzle* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keakuratan dimensi. Nilai *P-Value* pada variabel *layer height* adalah 0,346, lebih besar dari nilai  $\alpha : 0.05$  sehingga dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak yang berarti variabel *layer height* tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap keakuratan dimensi. Pada variabel *print speed* dapat dilihat nilai *P-Value* sebesar 0,278, lebih besar dari nilai  $\alpha : 0.05$  yang berarti  $H_0$  gagal ditolak dan menyatakan bahwa variabel *print speed* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keakuratan dimensi. Nilai *P-Value* untuk interaksi suhu *nozzle* dan *layer height* adalah sebesar 0,779, lebih besar dari nilai  $\alpha : 0.05$  yang artinya  $H_0$  gagal ditolak dan interaksi antara suhu *nozzle* dan *layer height* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keakuratan dimensi. Untuk interaksi variabel suhu *nozzle* dan *print speed* memiliki nilai *P-Value* sebesar 0,019, lebih kecil dari nilai  $\alpha : 0.05$  yang artinya  $H_0$  ditolak dan dapat disimpulkan bahwa interaksi antara suhu *nozzle* dengan *print speed* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keakuratan dimensi. Untuk interaksi antara *layer height* dan *print speed* memiliki nilai *P-Value* sebesar 0,153, lebih besar dari nilai  $\alpha : 0.05$  yang berarti  $H_0$  gagal ditolak dan disimpulkan bahwa interaksi antara *layer height* dengan *print speed* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keakuratan dimensi.

#### **4.5 Pengujian Kesesuaian Model**

##### **4.5.1 Uji *Lack of Fit***

###### **a. Kekasaran Permukaan**

Uji *Lack of Fit* dilakukan untuk menentukan kesesuaian model percobaan yang digunakan dalam percobaan ini.

Hipotesis yang akan digunakan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut:

$H_0$  : tidak ada *lack of fit*

$H_1$  : ada *lack of fit*

Daerah yang melakukan penolakan :

Hipotesis awal atau  $H_0$  ditolak apabila nilai *P-Value* lebih kecil dari nilai  $\alpha$  : 0.05. Begitu pula sebaliknya, jika nilai *P-Value* lebih besar dari nilai  $\alpha$  : 0.05, maka  $H_0$  akan gagal ditolak.

$\alpha$  : 0.05 (5%)

Hasil pengujian *lack of fit*:

Berdasarkan data ANOVA pada kekasaran permukaan, ditunjukkan bahwa nilai dari *P-Value lack of fit* adalah sebesar 0,169, lebih besar dari nilai  $\alpha$  : 0.05 sehingga didapatkan kesimpulan bahwa  $H_0$  gagal ditolak artinya tidak terdapat *lack of fit* (model sudah sesuai).

#### **b. Keakuratan Dimensi**

Untuk menguji model yang digunakan sudah sesuai atau tidak maka perlu dilakukannya uji *lack of fit*. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian kesesuaian model ini adalah sebagai berikut:

$H_0$  : tidak ada *lack of fit* (model sesuai)

$H_1$  : ada *lack of fit* (model tidak sesuai)

Daerah yang menolak :

Hipotesis awal atau  $H_0$  ditolak apabila nilai *P-Value* lebih kecil dari nilai  $\alpha$  : 0.05. Begitu pula sebaliknya, jika nilai *P-Value* lebih besar dari nilai  $\alpha$  : 0.05, maka  $H_0$  akan gagal ditolak.

$\alpha$  : 0.05 (5%)

Hasil pengujian *lack of fit* :

Berdasarkan pada data ANOVA yang diperoleh, dapat diketahui bahwa nilai dari *P-Value* dari *lack of fit* adalah sebesar 0,259, lebih besar  $\alpha$  : 0.05 sehingga dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak, pada pengujian ini model yang digunakan sudah sesuai atau tidak ada *lack of fit*.

#### 4.5.2 Uji Individu

Pengujian ini memiliki tujuan untuk menguji regresi  $y_i$  pada suatu parameter bebas  $X_i$  tertentu yang apabila parameter  $X_i$  dianggap konstan.

##### a. Kekasaran Permukaan

Hipotesis pengujian uji individu adalah sebagai berikut:

$H_0 : \beta_i = 0$ ; faktor tidak memiliki pengaruh terhadap respon

$H_0 : \beta_i \neq 0$ ; faktor memiliki pengaruh terhadap respon

$i = 1,2,3$ .

Tabel 4. 7 Pengujian Uji Individu Kekasaran Permukaan

Variabel	Koefisien ( $b_i$ )	Standar	$t_{hitung}$	$t_{tabel}$	Kesimpulan
		Error ( $S_e$ ) Koefisien			
$X_1$	-1.611	0,386	4.174	1.729	Signifikan
$X_2$	2.097	0.392	5.349	1.729	Signifikan
$X_3$	0.252	0.386	0.653	1.729	Tidak signifikan
$X_1^2$	1.279	0.379	3.375	1.729	Signifikan
$X_2^2$	0.436	0.404	1.079	1.729	Tidak signifikan
$X_3^2$	0.130	0.379	0.343	1.729	Tidak signifikan
$X_1X_2$	0.188	0.502	0.375	1.729	Tidak signifikan
$X_1X_3$	- 0.890	0.502	1.773	1.729	Signifikan
$X_2X_3$	0.538	0.502	1.072	1.729	Tidak signifikan

Hasil pengujian dapat dilihat dari nilai  $t_{hitung}$  pada tabel 4.3. Jika nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  maka variabel tersebut dinyatakan memiliki pengaruh terhadap variabel respon.

Berikut dijelaskan mengenai hasil uji individu:

1. Faktor Suhu *Nozzle* ( $X_1$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} > t_{tabel}$  yaitu sebesar  $4.174 > 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor  $X_1$  atau suhu *nozzle* memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

2. Faktor *Layer Height* ( $X_2$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} > t_{tabel}$  yaitu sebesar  $5.349 > 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor  $X_2$  atau *layer height* memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

3. Faktor *Print Speed* ( $X_3$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.653 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  gagal ditolak yang berarti faktor  $X_3$  atau *print speed* tidak memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

4. Faktor Kuadratik Suhu *Nozzle* ( $X_1^2$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} > t_{tabel}$  yaitu sebesar  $3.375 > 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor kuadratik  $X_1^2$  memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

5. Faktor Kuadratik *Layer Height* ( $X_2^2$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $1.079 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  gagal ditolak yang berarti faktor kuadratik  $X_2^2$  tidak memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

6. Faktor Kuadratik *Print Speed* ( $X_3^2$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.343 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  gagal ditolak yang berarti faktor kuadratik  $X_3^2$  tidak memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

7. Faktor Interaksi Antara Suhu *Nozzle* Dengan *Layer Height* ( $X_1X_2$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.375 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor

interaksi antara suhu *nozzle* dengan *layer height* ( $X_1X_2$ ) tidak memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

8. Faktor Interaksi Antara Suhu *Nozzle* Dengan *Print Speed* ( $X_1X_3$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $1.773 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor interaksi antara suhu *nozzle* dengan *layer height* ( $X_1X_3$ ) tidak memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

9. Faktor Interaksi Antara *Layer Height* Dengan *Print Speed* ( $X_2X_3$ )

Berdasarkan pada tabel 4.7, terlihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $1.072 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor interaksi antara *layer height* dengan *print speed* ( $X_2X_3$ ) tidak memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

**b. Akurasi Dimensi**

Hipotesis pengujian yang digunakan dalam uji individu ini sebagai berikut:

$H_0 : \beta_i = 0$ ; faktor tidak memiliki pengaruh terhadap respon

$H_0 : \beta_i \neq 0$ ; faktor memiliki pengaruh terhadap respon

$i = 1,2,3$

Tabel 4. 8 Pengujian Uji Individu Akurasi Dimensi

Variabel	Koefisien ( $b_i$ )	Standar	$t_{hitung}$	$t_{tabel}$	Kesimpulan
		Error ( $S_e$ ) Koefisien			
$X_1$	0.103	0.0370	2.784	1.729	Signifikan
$X_2$	0.0352	0.0376	0.936	1.729	Tidak Signifikan
$X_3$	0.04259	0.0370	1.151	1.729	Tidak signifikan
$X_1^2$	-0.0489	0.0363	1.322	1.729	Tidak Signifikan

Variabel	Koefisien ( $b_i$ )	Standar	$t_{hitung}$	$t_{tabel}$	Kesimpulan
		Error ( $S_e$ ) Koefisien			
$X_2^2$	0.0010	0.0387	0.026	1.729	Tidak signifikan
$X_3^3$	0.0039	0.0363	0.107	1.729	Tidak signifikan
$X_1X_2$	-0.0139	0.0482	0.288	1.729	Tidak signifikan
$X_1X_3$	0.1346	0.0482	2.793	1.729	Signifikan
$X_2X_3$	0.0746	0.0482	1.548	1.729	Tidak signifikan

Hasil pengujian dapat dilihat dari nilai  $t_{hitung}$  pada tabel 4.4. Jika nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  maka variabel tersebut dinyatakan memiliki pengaruh terhadap variabel respon. Berikut dijelaskan mengenai hasil uji individu:

1. Faktor Suhu *Nozzle* ( $X_1$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} > t_{tabel}$  yaitu sebesar  $2.784 > 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  gagal ditolak yang berarti faktor  $X_1$  atau suhu *nozzle* memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

2. Faktor *Layer Height* ( $X_2$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.936 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor  $X_2$  atau *layer height* tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

3. Faktor *Print Speed* ( $X_3$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat bahwa nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $1.151 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor  $X_3$  atau *print speed* tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

4. Faktor Kuadrat Suhu *Nozzle* ( $X_1^2$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $1.322 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor kuadrat  $X_1^2$  tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

5. Faktor Kuadratik *Layer Height* ( $X_2^2$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.026 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor kuadratik  $X_2^2$  tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

6. Faktor Kuadratik *Print Speed* ( $X_3^2$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.107 < 1.729$ . kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor kuadratik  $X_3^2$  tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

7. Faktor Interaksi Antara Suhu *Nozzle* Dengan *Layer Height* ( $X_1X_2$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $0.288 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor interaksi antara suhu *nozzle* dengan *layer height* ( $X_1X_2$ ) tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

8. Faktor Interaksi Antara Suhu *Nozzle* Dengan *Print Speed* ( $X_1X_3$ )

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat bahwa nilai  $t_{hitung} > t_{tabel}$  yaitu sebesar  $2.793 > 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  gagal ditolak yang berarti faktor interaksi antara suhu *nozzle* dengan *layer height* ( $X_1X_3$ ) memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

9. Faktor Interaksi Antara *Layer Height* Dengan *Print Speed* ( $X_2X_3$ )

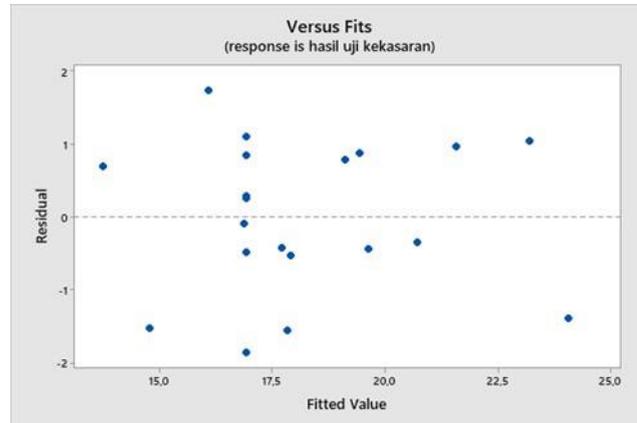
Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat nilai  $t_{hitung} < t_{tabel}$  yaitu sebesar  $1.548 < 1.729$ . Maka kesimpulannya adalah  $H_0$  ditolak yang berarti faktor interaksi antara *layer height* dengan *print speed* ( $X_2X_3$ ) tidak memiliki pengaruh terhadap keakurasian dimensi.

## 4.6 Pemeriksaan Asumsi Residual

### 4.6.1 Uji Identik

Pengujian identik dilakukan bertujuan untuk mengetahui apakah variasi residual model yang diperoleh penyebarannya sama (homoskedistisitas).

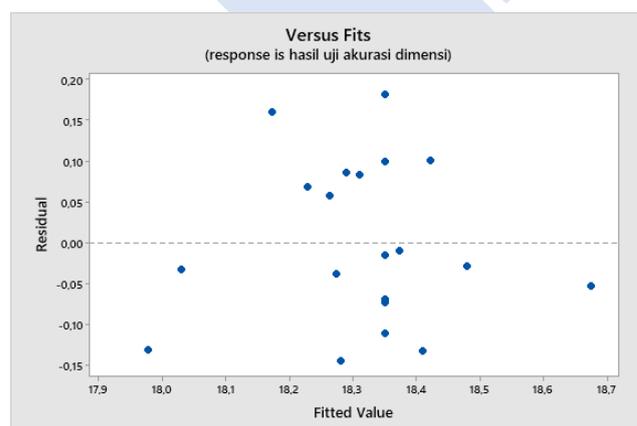
**a. Kekasaran Permukaan**



Gambar 4. 1 Plot Uji Identik Kekasaran Permukaan

Residual dianggap bersifat identik karena dapat dilihat bahwa plot menyebar secara acak dan tidak membentuk suatu pola tertentu yang menunjukkan kecenderungan plot naik atau turun. Hal ini menandakan bahwa residual dari kekasaran permukaan memiliki penyebaran yang sama.

**b. Keakurasian Dimensi**



Gambar 4. 2 Plot Uji Identik Keakurasian Dimensi

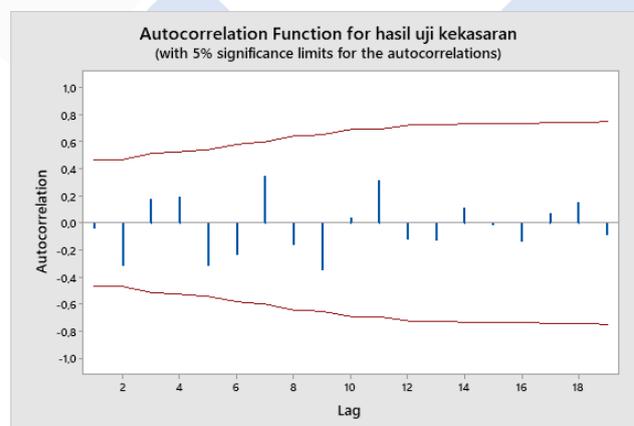
Pada gambar 4.2 dapat dilihat jika residual bersifat identik. Hal ini dilihat pada penyebaran plot secara acak dan tidak ada kecenderungan untuk membentuk suatu pola tertentu. Jadi dapat disimpulkan bahwa residual dari keakuratan dimensi memiliki penyebaran yang sama.

#### 4.6.2 Uji Independen

Uji independen memiliki tujuan menentukan apakah terdapat ketergantungan antara residual terhadap pengamatan dalam jangka waktu tertentu.

##### a. Kekasaran Permukaan

Residual dianggap independen jika nilai ACF berada dalam interval  $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$ , di mana n ialah jumlah pengamatan yang mana pada penelitian  $n = 20$ . Residual yang dianggap independen karena nilai ACF terletak dalam interval  $\pm 0,4472$  yaitu:



Gambar 4. 3 Plot Uji Independen Kekasaran Permukaan

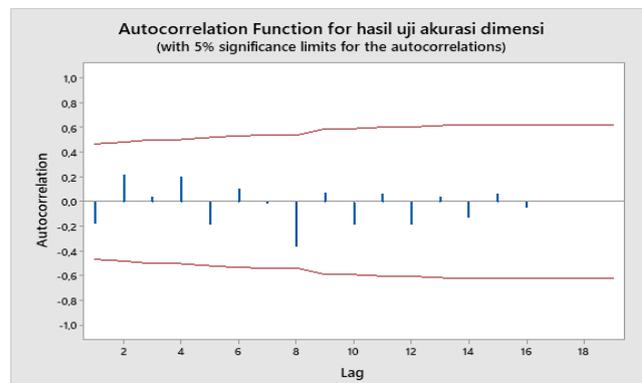
Berdasarkan pada gambar diatas, residual yang dianggap bersifat independen adalah sebagai berikut:

1. Pada Lag 1 diperoleh nilai -0,041531
2. Pada Lag 2 diperoleh nilai -0,315285
3. Pada Lag 3 diperoleh nilai 0,178384

4. Pada Lag 4 diperoleh nilai 0,194360
5. Pada Lag 5 diperoleh nilai -0,314528
6. Pada Lag 6 diperoleh nilai -0,227982
7. Pada Lag 7 diperoleh nilai 0,348131
8. Pada Lag 8 diperoleh nilai -0,163756
9. Pada Lag 9 diperoleh nilai -0,348537
10. Pada lag 10 diperoleh nilai 0,038456
11. Pada Lag 11 diperoleh nilai 0,314167
12. Pada Lag 12 diperoleh nilai -0,122148
13. Pada Lag 13 diperoleh nilai -0,125731
14. Pada Lag 14 diperoleh nilai 0,105899
15. Pada Lag 15 diperoleh nilai -0,011692
16. Pada Lag 16 diperoleh nilai -0,135647
17. Pada Lag 17 diperoleh nilai 0,067453
18. Pada Lag 18 diperoleh nilai 0,151019
19. Pada Lag 19 diperoleh nilai -0,091031

Dari lag 1 – lag 19 yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa nilai ACF berada di dalam interval  $\pm 0,4472$  berarti residual yang independen.

#### b. Keakurasian Dimensi



Gambar 4. 4 Plot Uji Independen Keakurasian Dimensi

Residual bersifat independen apabila nilai *Auto Correlation Function (ACF)* berada pada nilai interval  $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$ , di mana n adalah jumlah pengamatan yang mana pada penelitian ini n = 20. Residual yang dianggap independen karena nilai ACF terletak dalam interval  $\pm 0,4472$  yaitu :

1. Pada Lag 1 diperoleh nilai -0,174448
2. Pada Lag 2 diperoleh nilai 0,214259
3. Pada Lag 3 diperoleh nilai 0,038021
4. Pada Lag 4 diperoleh nilai 0,199135
5. Pada Lag 5 diperoleh nilai -0,183341
6. Pada Lag 6 diperoleh nilai 0,098977
7. Pada Lag 7 diperoleh nilai -0,017716
8. Pada Lag 8 diperoleh nilai -0,363679
9. Pada Lag 9 diperoleh nilai 0,069265
10. Pada Lag 10 diperoleh nilai -0,178809
11. Pada Lag 11 diperoleh nilai 0,064701
12. Pada Lag 12 diperoleh nilai -0,184635
13. Pada Lag 13 diperoleh nilai 0,034533
14. Pada Lag 14 diperoleh nilai -0,124351
15. Pada Lag 15 diperoleh nilai 0,060723
16. Pada Lag 16 diperoleh nilai -0,044627
17. Pada Lag 17 diperoleh nilai -0,003233
18. Pada Lag 18 diperoleh nilai -0,007026
19. Pada Lag 19 diperoleh nilai 0,002252

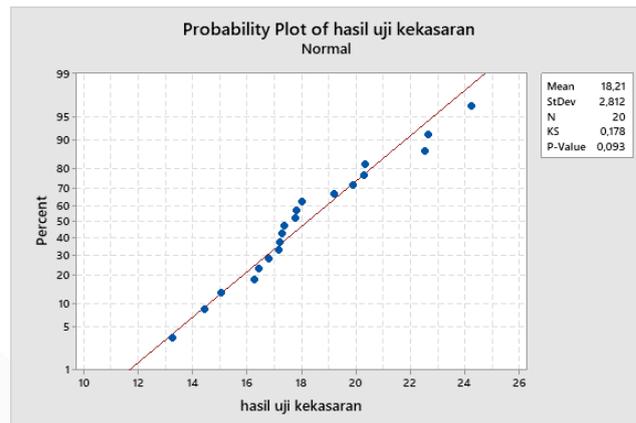
Berdasarkan data pada lag 1 – lag 19 dapat dilihat bahwa residual bersifat independen karena nilai ACF-nya berada dalam interval  $\pm 0,4472$ .

#### **4.6.3 Uji Normalitas**

Pengujian normalitas dilakukan untuk memastikan apakah model yang digunakan mengalami penyimpangan. Plot kenormalan residual dianggap

berdistribusi dengan normal apabila titik-titik residual mendekati garis lurus yang telah ditentukan

#### a. Kekasaran Permukaan



Gambar 4. 5 Plot Normalitas Kekasaran Permukaan

Hipotesis pengujian yang akan digunakan pada uji normalitas yaitu sebagai berikut:

$H_0$  = residual plot berdistribusi secara normal

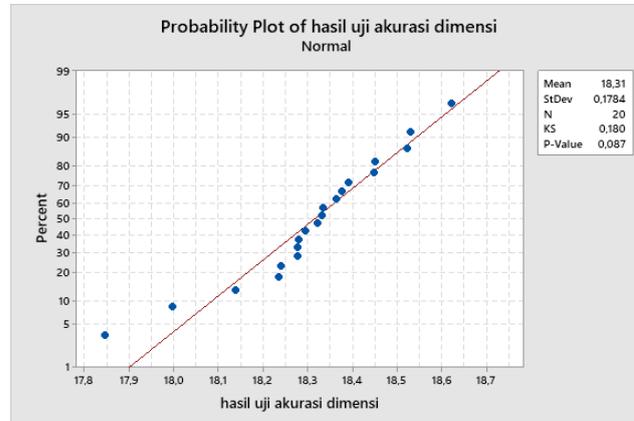
$H_1$  = residual plot berdistribusi tidak normal

$\alpha = 0.05$  (5%)

$n = 20$

Berdasarkan pada hasil pengujian normalitas diatas, nilai tabel uji *Kolmogorov-Smirnov*  $D_{tabel}$  adalah sebesar 0,294. Sedangkan untuk nilai  $D_{hitung}$  pada pengujian normalitasnya adalah sebesar 0,178. Hal ini menunjukkan bahwa nilai  $D_{hitung} < D_{tabel}$ , yang artinya nilai  $0,178 < 0,294$ , maka dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  diterima dan residual plot berdistribusi secara normal.

## b. Keakurasian Dimensi



Gambar 4. 6 Plot Normalitas Akurasi Dimensi

Hipotesis pengujian yang akan digunakan pada uji normalitas yaitu:

$H_0$  = residual plot berdistribusi secara normal

$H_1$  = residual plot berdistribusi tidak normal

$\alpha = 0.05$  (5%)

$n = 20$

Berdasarkan pada hasil pengujian normalitas diatas, nilai tabel uji *Kolmogorov-Smirnov*  $D_{tabel}$  adalah sebesar 0,294. Sedangkan untuk nilai  $D_{hitung}$  pada pengujian normalitasnya adalah 0,180. Hal ini menunjukkan bahwa nilai  $D_{hitung} < D_{tabel}$ , yang artinya nilai  $0,180 < 0,294$ , maka dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  diterima dan residual plot berdistribusi secara normal.

### 4.7 Melakukan Pengujian Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Pengujian uji signifikan dilakukan untuk mengidentifikasi apakah dari berbagai faktor yang telah diujikan tersebut mempunyai pengaruh terhadap kualitas produksi kopling. Pada penelitian ini, tingkat signifikansi atau nilai  $\alpha$  yang ditetapkan menunjukkan bahwa tingkat *error* yang diijinkan yaitu *1-confidence level*. Hal ini berarti *confident level* yang digunakan sebesar 95% dengan nilai  $\alpha = 0.05$ , maka dalam penelitian ini tingkat signifikansi yang digunakan yaitu sebesar

0.05 dimana data hasil penelitian tersebut mempunyai tingkat kepentingan (*confidence interval*) untuk benar sebesar 95% dan kesalahan maksimum 5% (toleransi kesalahan).

Kuadrat R atau  $R^2$  adalah koefisien determinasi yang berkisar 0-1. Hubungan antar variabel semakin lemah apabila nilai  $R^2$  semakin kecil, begitu pula sebaliknya jika besaran nilai  $R^2$  semakin besar dan mendekati 1 maka hubungan antara variabelnya menjadi semakin kuat. Nilai  $R^2$  dapat dihitung menggunakan rumusan sebagai berikut:

**a. Kekasaran Permukaan**

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{JK(\text{Regresi})}{JKT} \\ &= \frac{128.817}{150.217} \\ &= 0.8577 \end{aligned}$$

Nilai  $R^2$  adalah sebesar 0.8577, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh suhu *nozzle*, *layer height*, dan *print speed* serta interaksinya terhadap kualitas kekasaran permukaan adalah sebesar 85.77% dan 14.23% sisanya dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan kedalam model percobaan.

**b. Keakurasian Dimensi**

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{JK(\text{Regresi})}{JKT} \\ &= \frac{0,418846}{0,605} \\ &= 0.6928 \end{aligned}$$

Nilai  $R^2$  adalah sebesar 0.6928, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh suhu *nozzle*, *layer height*, dan *print speed* serta interaksinya terhadap kualitas keakurasian dimensi adalah sebesar 69.28% dan 30.72% sisanya akan dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan kedalam model percobaan.

#### 4.8 Penentuan Titik Optimum Faktor

Penentuan kombinasi untuk semua level tiap variabel proses untuk mendapatkan respon paling optimal dapat dilakukan dengan cara pendekatan matriks. Hasil percobaan perlakuan didapatkan dari hasil rancangan *Central Composite Design* (CCD). Hasil persamaan regresi yang didapatkan sebelumnya adalah sebagai berikut:

##### a. Kekasaran Permukaan

$$y' = 16.936 - 1.611X_1 + 2.097X_2 + 0.252X_3 + 1.279X_1^2 + 0.436X_2^2 + 0.130X_3^2 + 0.188X_1X_2 - 0.8895X_1X_3 + 0.538X_2X_3 + 0.589X_1X_2X_3$$

Masing-masing koefisien regresi dari model tersebut diubah ke dalam bentuk matriks. Titik optimum dicari menggunakan cara perkalian dan invers matriks yaitu dengan rumus sebagai berikut:

$$\frac{\partial y}{\partial X_1} = b_1 + 2b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + b_{13}X_3 = 0$$

$$= -1.611 + 2(1.279)X_1 + 0.188X_2 - 0.8895X_3 = 0$$

$$= 2(1.279)X_1 + 0.188X_2 - 0.889X_3 = 1.611$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_2} = b_2 + b_{12}X_1 + b_{22}X_2 + b_{23}X_3 = 0$$

$$= 2.097 + 0.188X_1 + 2(0.436)X_2 + 0.538X_3 = 0$$

$$= 0.188X_1 + 2(0.436)X_2 + 0.538X_3 = (-2.097)$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_3} = b_3 + b_{13}X_1 + b_{23}X_2 + 2b_{33}X_3 = 0$$

$$= 0.252 + (-0.8895)X_1 + 0.538X_2 + 2(0.130)X_3 = 0$$

$$= (-0.8895)X_1 + 0.538X_2 + 2(0.130)X_3 = (-0.252)$$

Persamaan-persamaan diatas dapat dikerjakan dengan cara menggunakan metode pendekatan matriks dengan rumus persamaan  $AX = b$ .

$$\begin{bmatrix} 2b_{11} & b_{12} & b_{13} & X_1 & -b_1 \\ b_{12} & b_{22} & b_{23} & X_2 & -b_2 \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} & X_3 & -b_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2(1.279) & 0.188 & -0.8895 & X_1 & 1.611 \\ 0.188 & 0.436 & 0.538 & X_2 & -2.097 \\ -0.8895 & 0.538 & 2(0.130) & X_3 & -0.252 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 & 2(1.279) & 0.188 & -0.8895 & -1 & 1.611 \\ X_2 & 0.188 & 0.436 & 0.538 & 0 & -2.097 \\ X_3 & -0.8895 & 0.538 & 2(0.130) & 0 & -0.252 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 & 0.179 & 0.536 & -0.497 & 1.611 \\ X_2 & 0.536 & 0.128 & 1.568 & -2.097 \\ X_3 & -0.497 & 1.568 & -1.097 & -0.252 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 & -0.710 \\ X_2 & 0.199 \\ X_3 & -4.088 \end{bmatrix}$$

Nilai  $X_1 = -0.710$ ,  $X_2 = 0.199$  dan  $X_3 = -4.088$  adalah titik level masing-masing faktor. Titik optimum untuk masing-masing faktor akan dicari dengan melakukan perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\varphi_i = X_1 \left( \frac{\Delta X_{i+1} - 1}{2} \right) + X_0 ; \varphi_i = \text{nilai faktor } i$$

1. Nilai optimum untuk ( $X_1$ ) suhu *nozzle*

$$\begin{aligned} \varphi_i &= X_1 \left( \frac{\Delta X_{i+1} - 1}{2} \right) + X_0 \\ &= (-0.710) \left( \frac{255 - 205}{2} \right) + 230 \\ &= (-0.710) (25) + 230 \\ &= 212.247 \end{aligned}$$

$$= 212 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2. Nilai optimum untuk ( $X_1$ ) *layer height*

$$\begin{aligned} \varphi_i &= X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + X_0 \\ &= (0.199) \left( \frac{0.33 - 0.17}{2} \right) + 0.25 \\ &= (0.199) (0.08) + 0,25 \\ &= 0.266 \\ &= 0.27 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. Nilai optimum untuk ( $X_3$ ) *print speed*

$$\begin{aligned} \varphi_i &= X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + X_0 \\ &= (-4.088) \left( \frac{90 - 40}{2} \right) + 65 \\ &= (-4.088) (25) + 65 \\ &= -37.190 \\ &= |-37| = 37 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

#### b. Akurasi Dimensi

$$y^{\wedge} = 18.341 + 0.103X_1 + 0.0352X_2 + 0.0426X_3 - 0.0489X_{12} + 0.0010X_{22} + 0.0039X_{32} - 0.0139X_{1X_2} + 0.1346X_{1X_3} + 0.0746X_{2X_3} + 0.056X_{1X_2X_3}$$

Masing-masing koefisien regresi dari model tersebut diubah ke dalam bentuk matriks. Titik optimum akan dicari dengan menggunakan cara perkalian dan invers matriks yaitu dengan rumus sebagai berikut:

$$\frac{\partial y}{\partial X_1} = b_1 + 2b_{11} X_1 + b_{12} X_2 + b_{13} X_3 = 0$$

$$= 0.103 + 2(0.0489) X_1 - 0.0139 X_2 + 0.1346 X_3 = 0$$

$$= 2(0.0489) X_1 - 0.0139 X_2 + 0.1346 X_3 = (-0.103)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_2} = b_{22} + b_{12} X_1 + b_{22} X_2 + b_{23} X_3 = 0$$

$$= 0.0352 - 0.0139 X_1 + 2(0.0010) X_2 + 0.0746 X_3 = 0$$

$$= -0.0139 X_1 + 2(0.0010) X_2 + 0.0746 X_3 = (-0.0352)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_3} = b_{33} + b_{13} X_1 + b_{23} X_2 + 2b_{33} X_3 = 0$$

$$= 0.0426 + 0.1346 X_1 + 0.0746 X_2 + 2(0.0039) X_3 = 0$$

$$= 0.1346 X_1 + 0.0746 X_2 + 2(0.0039) X_3 = (-0.0426)$$

Persamaan-persamaan diatas dapat dikerjakan menggunakan metode pendekatan matriks dengan rumus persamaan  $AX = b$ .

$$\begin{bmatrix} 2b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ -b_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2(0.0489) & -0.0139 & 0.1346 \\ -0.0139 & 0.0010 & 0.0746 \\ 0.1346 & 0.0746 & 2(0.0039) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.103 \\ -0.0352 \\ -0.0426 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(0.0489) & -0.0139 & 0.1346 \\ -0.0139 & 0.0010 & 0.0746 \\ 0.1346 & 0.0746 & 2(0.0039) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0.103 \\ -0.0352 \\ -0.0426 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.598 & -12.050 & 1.391 \\ -12.050 & 20.604 & 10.883 \\ 1.391 & 10.883 & 0.113 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.103 \\ -0.0352 \\ -0.0426 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.315 \\ 0.052 \\ -0.531 \end{bmatrix}$$

Nilai  $X_1 = -0.315$ ,  $X_2 = 0,052$  dan  $X_3 = 0.531$  adalah titik level masing-masing faktor. Titik optimum dari setiap faktor dicari dengan melakukan perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut

$$\varphi_i = X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + X_0 ; \varphi_i = \text{nilai faktor } i$$

1. Nilai optimum untuk ( $X_1$ ) suhu *nozzle*

$$\begin{aligned} \varphi_i &= X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + X_0 \\ &= (-0.315) \left( \frac{255-205}{2} \right) + 230 \\ &= (-0.315) (25) + 230 \\ &= 222.133 \\ &= 222^\circ \text{C} \end{aligned}$$

2. Nilai optimum untuk ( $X_1$ ) *layer height*

$$\begin{aligned} \varphi_i &= X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + X_0 \\ &= (0.052) \left( \frac{0.33 - 0.17}{2} \right) + 0.25 \\ &= (0.052) (0.08) + 0,25 \\ &= 0.254 \\ &= 0,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. Nilai optimum untuk ( $X_3$ ) *print speed*

$$\begin{aligned} \varphi_i &= X_1 \left( \frac{\Delta X_{+1,-1}}{2} \right) + X_0 \\ &= (-0.531) \left( \frac{90 - 40}{2} \right) + 65 \end{aligned}$$

$$= (-0.531) (25) + 65$$

$$= 51.720$$

$$= 52 \text{ mm/s}$$

#### 4.9 Penyusunan Model Matematis

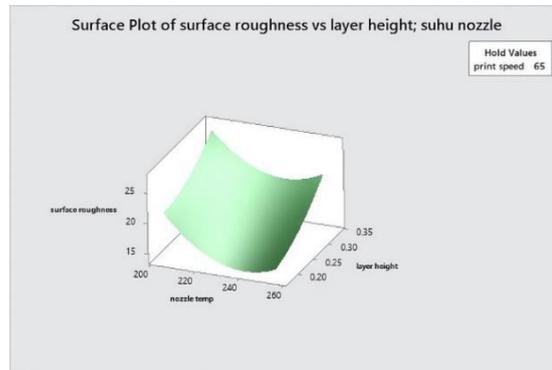
Penyusunan model matematis dilakukan peneliti setelah selesai melakukan pengujian. Model matematis tersebut akan menunjukkan bahwa pengaruh suhu *nozzle* ( $x_1$ ), *layer height* ( $x_2$ ) dan *print speed* ( $x_3$ ) terhadap kekasaran permukaan dan akurasi dimensi terlihat dari persamaan regresi berikut:

$$\hat{y}_{KP} = 16.936 - 1.611X_1 + 2.097X_2 + 0.252X_3 + 1.279X_1^2 + 0.436X_2^2 + 0.130X_3^2 + 0.188X_1X_2 - 0.8895X_1X_3 + 0.538X_2X_3 + 0.589X_1X_2X_3$$

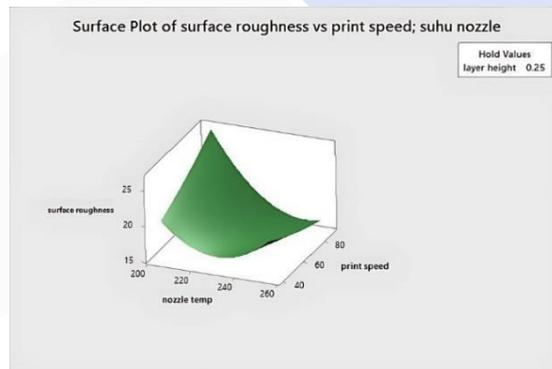
$$\hat{y}_{AD} = 18.341 + 0.103X_1 + 0.0352X_2 + 0.0426X_3 - 0.0489X_1^2 + 0.0010X_2^2 + 0.0039X_3^2 - 0.0139X_1X_2 + 0.1346X_1X_3 + 0.0746X_2X_3 + 0.056X_1X_2X_3$$

#### 4.10 Plot Permukaan

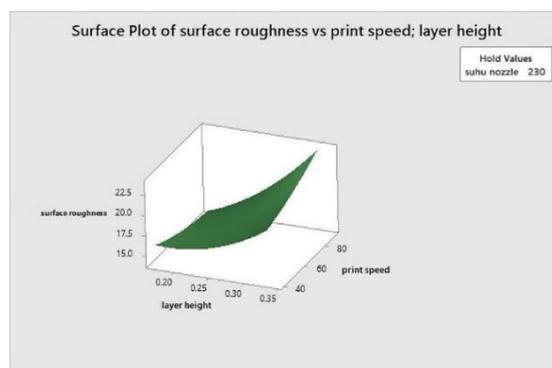
Plot permukaan akan menunjukkan pengaruh setiap faktor terhadap respon. Plot permukaan yang digunakan yaitu *surface* plot dan *contour* plot. Plot permukaan untuk *respon* terhadap kekasaran permukaan ditunjuk oleh gambar 4.7-4.12 dan untuk plot permukaan respon terhadap akurasi dimensi ditunjukkan oleh gambar 4.13-4.18.



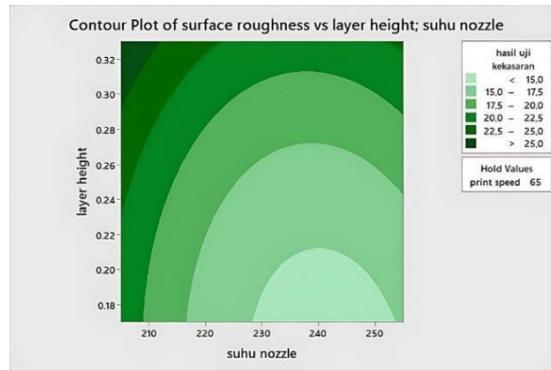
Gambar 4. 7 *Surface Plot* Suhu *Nozzle* dan *Layer Height* Terhadap Kekasaran Permukaan



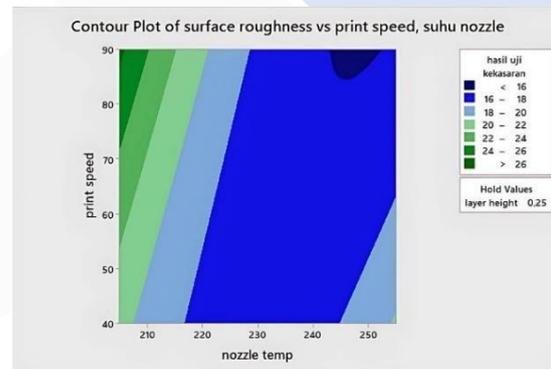
Gambar 4. 8 *Surface Plot* Suhu *Nozzle* dan *Print Speed* Terhadap Kekasaran Permukaan



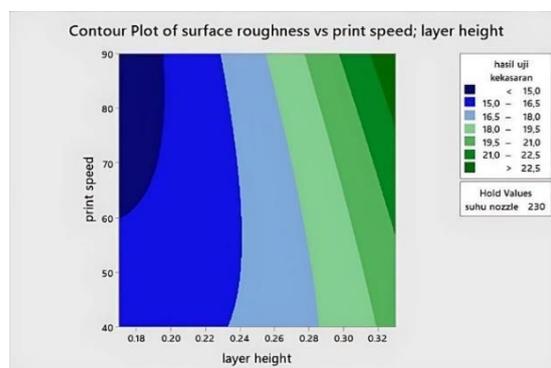
Gambar 4. 9 *Surface Plot* *Layer Height* dan *Print Speed* Terhadap Kekasaran Permukaan



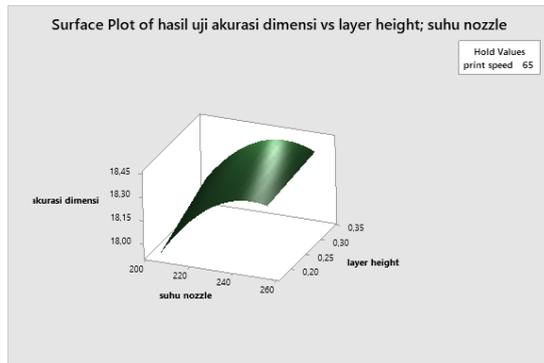
Gambar 4. 10 *Contour Plot Suhu Nozzle dan Layer Height Terhadap Kekasaran Permukaan*



Gambar 4. 11 *Contour Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Kekasaran Permukaan*

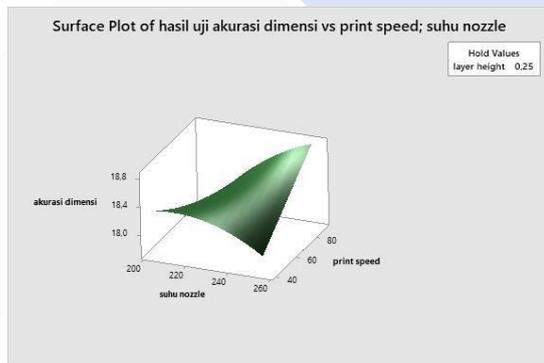


Gambar 4. 12 *Contour Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Kekasaran Permukaan*



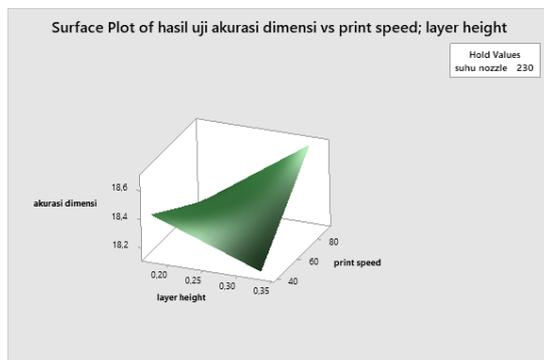
Gambar 4. 13 *Surface Plot Suhu Nozzle dan Layer Height Terhadap Akurasi*

Dimensi



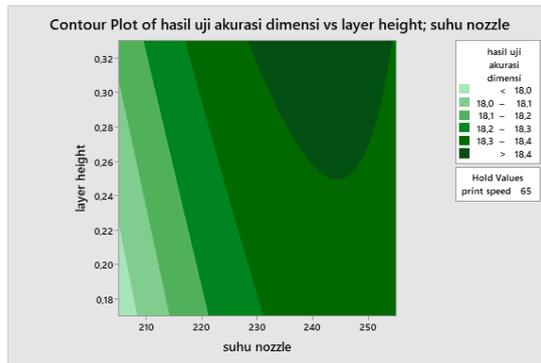
Gambar 4. 14 *Surface Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Akurasi*

Dimensi



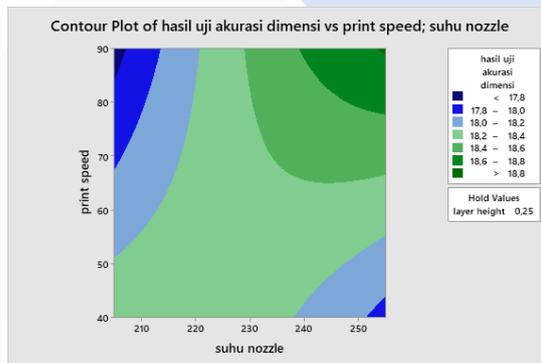
Gambar 4. 15 *Surface Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Akurasi*

Dimensi



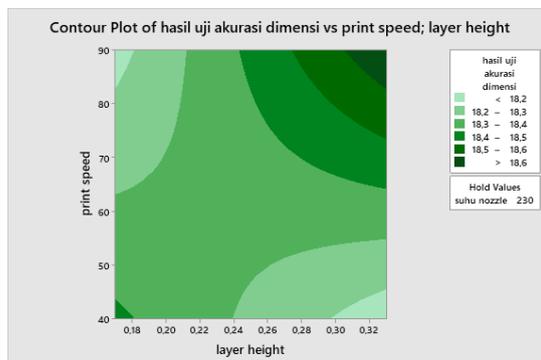
Gambar 4. 16 *Contour Plot Suhu Nozzle dan Layer Height Terhadap Akurasi*

Dimensi



Gambar 4. 17 *Contour Plot Suhu Nozzle dan Print Speed Terhadap Akurasi*

Dimensi



Gambar 4. 18 *Contour Plot Layer Height dan Print Speed Terhadap Akurasi*

Dimensi

#### 4.11 Optimasi Respon

Optimasi respon yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai target dengan cara mendekati nilai kekasaran permukaan dengan akurasi dimensi. Fungsi *desirability* adalah fungsi yang digunakan untuk melakukan optimasi dengan cara memaksimalkan nilai *desirability* (D). Nilai *desirability* adalah nilai fungsi yang bertujuan untuk mengoptimasikan kemampuan respon sesuai dengan kriteria produk akhir yang telah ditetapkan. Nilai *desirability* berkisar dari 0-1,0 yang mana jika nilainya semakin mendekati nilai 1,0 menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan sesuai dengan kriteria produk yang diinginkan atau sempurna. Namun perlu diingat bahwa tujuan optimasi yang baik adalah bukan untuk mencapai nilai *desirability* 1,0 akan tetapi mencari kondisi terbaik untuk mempertemukan semua fungsi tujuan yang ingin dicapai.

Pembatas optimasi penelitian ini adalah batas atas dan batas bawah pada spesifikasi hasil kekasaran permukaan dan akurasi dimensi. Kekasaran permukaan memiliki batas atas sebesar 24.265 dan batas bawah sebesar 13.249, sedangkan untuk akurasi dimensi untuk batas atasnya adalah 18.622 dan batas bawahnya adalah 17.845. Bobot ( $\alpha$ ) dan tingkat kepentingan (i) untuk seluruh responnya dianggap sama yaitu memiliki bobot normal dan tingkat kepentingan bernilai 1, untuk  $\alpha$  sendiri merupakan tingkatan akurasi hasil optimasi terhadap target dan i adalah perbandingan kepentingan antara respon terhadap hasil optimasi multirespon.

Tabel 4. 9 Batasan Optimasi Respon pada Fungsi *Desirability*

<b>Respon</b>	<b>Tujuan</b>	<b>Batas Bawah</b>	<b>Batas Atas</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>i</b>
<b>Kekasaran Permukaan</b>	Nominal Terbaik	13.249	24.265	1	1
<b>Akurasi Dimensi</b>	Nominal Terbaik	17.845	18.622	1	1

Berdasarkan data di Tabel 4.9 dan pemodelan respon yang dihasilkan, persamaan matematis untuk optimasi adalah sebagai berikut:

Fungsi Tujuan:

Memaksimalkan  $D = (d_{KP} \times d_{AD})^{1/2}$

Pembatas:

$$\hat{y}_{KP} = 16.936 - 1.611X_1 + 2.097X_2 + 0.252X_3 + 1.279X_1^2 + 0.436X_2^2 + 0.130X_3^2 + 0.188X_1X_2 - 0.8895X_1X_3 + 0.538X_2X_3 + 0.589X_1X_2X_3$$

$$\hat{y}_{AD} = 18.341 + 0.103X_1 + 0.0352X_2 + 0.0426X_3 - 0.0489X_1^2 + 0.0010X_2^2 + 0.0039X_3^2 - 0.0139X_1X_2 + 0.1346X_1X_3 + 0.0746X_2X_3 + 0.056X_1X_2X_3$$

$$d_{KP} = \left( \frac{\hat{y}_{KP} - 13.249}{13.249 - 13.249} \right) \quad 13.249 \leq \hat{y}_{KP} \leq 13.249$$

$$d_{KP} = \left( \frac{24.265 - \hat{y}_{KP}}{24.265 - 13.249} \right) \quad 13.249 \leq \hat{y}_{KP} \leq 24.265$$

$$d_{PA} = \left( \frac{\hat{y}_{AD} - 17.845}{18.622 - 17.845} \right) \quad 17.845 \leq \hat{y}_{AD} \leq 18.622$$

$$d_{PA} = \left( \frac{18.622 - \hat{y}_{AD}}{18.622 - 18.622} \right) \quad 18.622 \leq \hat{y}_{AD} \leq 18.622$$

$$\hat{y}_{KP} \leq 24.265 \quad d \geq 0$$

$$\hat{y}_{KP} \geq 13.249 \quad d \leq 1$$

$$\hat{y}_{AD} \leq 18.622$$

Fungsi *desirability* hasil optimasi ditunjukkan oleh Tabel 4.10 sebagai berikut

Tabel 4. 10 Hasil Optimasi dengan Fungsi *Desirability*

Faktor		Respon		<i>Desirability</i>
<b>Suhu Nozzle</b>	255°C	Kekasaran Permukaan	12.4493	1.0
<b>Layer Height</b>	0.179697 mm	Akurasi Dimensi	18.6249	1.0

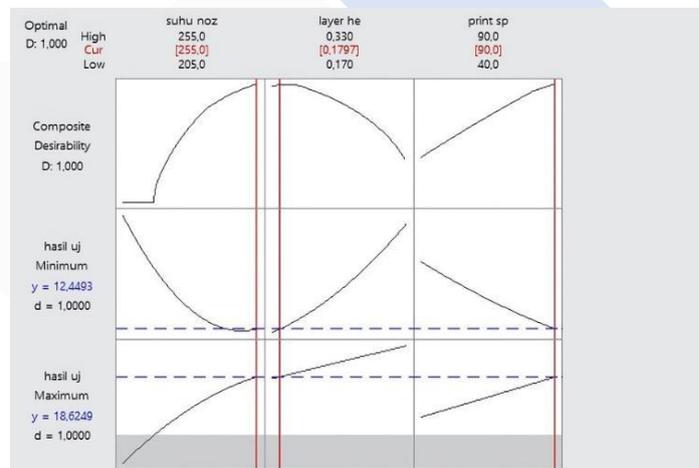
---

**Print Speed**      90 mm/s

---

Nilai optimasi kekasaran permukaan adalah 12.4493 dan akurasi dimensi adalah 18.6249 dengan nilai D sebesar 1.0 dengan pengaturan variabel berdasarkan pada kondisi optimalnya adalah sebesar suhu *nozzle* 255°C, *layer height* 0.179697 mm, dan *print speed* 90 mm/s

Dalam kurva nilai *desirability*, garis merah menunjukkan bahwa nilai D telah mencapai posisi nilai maksimal, garis hitam menunjukkan nilai D untuk setiap respon, dan garis biru putus-putus menunjukkan nilai respon saat mencapai nilai D tertentu.



Gambar 4. 19 Plot Hasil Optimasi

#### 4.12 Percobaan Konfirmasi Hasil Optimasi

Tujuan dilakukannya percobaan konfirmasi ini adalah untuk membuktikan hasil optimasi serta menghitung kemampuan proses yang baru. Nilai hasil optimasi yang telah didapatkan disesuaikan dengan pengaturan variabel pada mesin. Parameter yang digunakan untuk melakukan uji konfirmasi adalah sebagai berikut:

Suhu *Nozzle* =  $X_1 = 255^\circ\text{C}$

*Layer Height* =  $X_2 = 0.179697 \approx 0.18 \text{ mm}$

*Print Speed* =  $X_3 = 90 \text{ mm/s}$

#### 4.13 Uji *One-Sample T* Percobaan Konfirmasi Hasil Optimasi

Hipotesis pengujian *one-sampel t* dengan nilai  $\alpha = 0.05$  adalah sebagai berikut:

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

Jika nilai *P-Value* < 0,05 maka dapat disimpulkan bahwa dalam percobaan terdapat perbedaan secara signifikan antara semua nilai hasil percobaan dengan nilai perkiraan hasil optimasi. Jika Nilai *P-Value* > 0,05 maka kesimpulannya adalah tidak terdapat perbedaan signifikan antara semua nilai hasil percobaan dengan nilai perkiraan hasil optimasi.

Tabel 4. 11 Pengujian *One Sampel T* Percobaan Konfirmasi

Keterangan	Kekasaran Permukaan	Akurasi Dimensi
Nilai Taksiran	12,4493	18,6249
Mean Sampel	15,626	18,467
P-Value	1,000	0,998

Hasil pengujian yang didapatkan yaitu  $H_0$  gagal ditolak untuk semua respon seperti yang ditunjukkan oleh data Tabel 4.11. Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa hasil percobaan konfirmasi telah sesuai dengan nilai perkiraan hasil optimasi.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada data hasil penelitian yang dilakukan tentang optimasi kekasaran permukaan dan akurasi dimensi pada produk kopling dengan menggunakan metode *Response Surface Methodology* dapat disimpulkan terdapat beberapa faktor atau variabel yang memiliki pengaruh terhadap hasil optimasi kekasaran permukaan dan akurasi dimensi pada produk kopling dengan filamen PLA yaitu sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil optimasi, faktor suhu *nozzle* dan *layer height* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan, sedangkan akurasi dimensi dipengaruhi oleh suhu *nozzle* serta interaksinya dengan *print speed*. Persentase kontribusi faktor suhu *nozzle* dan *layer height* terhadap kekasaran permukaan masing-masing sebesar 85,77% dan 14,23%, sementara faktor suhu *nozzle* serta interaksi *layer height* dengan *print speed* berpengaruh terhadap akurasi dimensi dengan kontribusi sebesar 69,28% dan 30,72%. Sisanya dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti dalam penelitian ini.
2. Hasil paling optimal untuk kekasaran permukaan dan akurasi dimensi pada produk kopling ini dengan menggunakan metode *respon surface* terdapat pada nilai suhu *nozzle* 255°C, *layer height* pada 0,18 mm, dan *print speed* sebesar 90 mm/s dengan hasil optimasi kekasaran permukaan sebesar 12.4493  $\mu\text{m}$  dan akurasi dimensi sebesar 18.6249 mm.

#### 5.2 Saran

1. Pada penelitian selanjutnya dapat dikembangkan lagi dari material filament yang berbeda, variasi faktor dan level yang lebih banyak serta menggunakan respon yang lain pada produk hasil 3D *printing*.

2. Pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode *Response Surface Methodology* baik itu *Central Composite Design* (CCD) 3 faktor atau *Box-Benken Design* (BBD), metode Taguchi, Desain Faktorial maupun metode-metode yang lainnya.



## DAFTAR PUSTAKA

- Angger Bagus Prasetyo, K. A. (2021). Application of RSM Method in Bio-composite Materials (Polymethyl-Methacrylate/Hydroxyapatite) Tension Strength Optimization by 3D Printing Machine Process. *JEMMME (Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering)*, Vol.6, No. 2, 2021, 1-8.
- Arya Yudhistira Widarsaputra, Y. E. (2022). Response Surface Methodology (Rsm) Untuk Optimasi Pengolahan Keripik Nanas Menggunakan Mesin Vacuum Frying. *Integrate: Industrial Engineering and Management System*, Volume 6, No. 2, 70-77.
- Bima Agung Setyawan, Y. N. (2022). Analisis Pengaruh Tingkat Kelembapan Filamen Pla Terhadap Nilai Kekuatan Mekanik Hasil Cetak 3d Printing. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, Vol.7 Nomor 1, 1-11.
- Deni Andriyansyah, S. A. (2021). Evaluasi Akurasi Dimensi Pada Objek Hasil 3d Printing. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, Maret 2021, 16-20.
- Deni Andriyansyah, S. A. (2021). Evaluasi Akurasi Dimensi Pada Objek Hasil 3d Printing. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, Maret 2021, 1-6.
- Dira Nurfaedah, R. P. (2021). Optimalisasi Kekuatan Bending Hasil 3d Printing Menggunakan Metode Response Surface Pada Filamen Pla (Poly Lactic Acid). *VOMEK Vol.3, No.3, Agustus 2021*, 58-59.
- Duta Sultan Paksi, H. B. (2023). *Optimalisasi Kekuatan Tarik Produk Drone Propeller Fdm Dengan Filamen Petg Pada Proses 3d Printing Dengan Metode Response Surface Methodology (RSM)*. Skripsi yang dipublikasikan, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

- Hasdiansah, M. I. (2020). Optimasi Parameter Proses Terhadap Akurasi Dimensi Pla Food Grade Menggunakan Metode Taguchi. *NCIET, Vol.1* , A175 - A186
- Joy H Panjaitan, M. T. (2021). Pengaruh Kecepatan, Temperatur dan Infill Terhadap Kualitas dan Kekasaran Kotak Relay Lampu Sign Sepedamotor Hasil dari 3D Printing. *SJoME Vol. 2 No. 2, Februari 2021* , 2, 87-98.
- Juan Pratama, A. Z. (2022). Pengaruh Parameter Cetak Pada Nilai Kekerasan Serta Akurasi Dimensi Material Thermoplastic Elastomer (TPE) Hasil 3D Printing. *Jurnal Ilmiah GIGA, Volume 25(1)*, 35-44.
- Sabariman, W. A. (2021). Analisis Sifat Lentur Produk 3D Printing Dengan Filamen PLA-Stainless Steel.
- Saputra, R. N. (2016). *Optimasi Multirespon Dengan Menggunakan Metode Response Surface Dan Desirability Function Pada Proses Pres Keramik Untuk Mengurangi Biaya Kerugian*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Saputra, R. N. (2016). *Optimasi Multirespon Dengan Menggunakan Metode Response Surface Dan Desirability Function Pada Proses Pres Keramik Untuk Mengurangi Biaya Kerugian*. Tesis Yang Dipublikasikan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Sitti Nurmiah<sup>1\*</sup>, R. S. (2013). Aplikasi Response Surface Methodology Pada Optimalisasi Kondisi Proses Pengolahan Alkali Treated Cottonii (ATC). 10-20.
- Syafaat, W. U. (2015). *Optimasi Produksi Roti Menggunakan Metode Rancangan Percobaan Response Surface Pada Industri Rumahan Tahun 2015*. Skripsi yang dipublikasikan, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, Jakarta.
- Taufik Ikhwan, S. B. (September 2020, Sekolah Tinggi Teknologi Warga Surakarta, Surakarta). "Pengaruh Printing Speed Terhadap Tingkat

Kekasaran Permukaan Hasil Additive Manufacturing Dengan Polilactic Acid Filament". *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.4, No. 2.

Ulumiyah, N. N. (2016). *Optimasi Suhu Dan Waktu Pemanasan Terhadap Karakteristik Kimia Nira Tebu (Saccharum Officinarum) Pasca Penggilingan*. Skripsi Yang Dipublikasikan, Universitas Brawijaya, Malang.



## Lampiran 1

### DAFTAR RIWAYAT HIDUP

#### 1. Data Pribadi

Nama lengkap : Khairun Nisah  
Tempat & tanggal lahir : Sungailiat, 05 Januari 2003  
Alamat rumah : Ling. Nelayan 2 Sungailiat  
Telp : 081279587748  
HP : 089636855934  
Email : [khairun.nisah0153@gmail.com](mailto:khairun.nisah0153@gmail.com)  
Jenis Kelamin : Perempuan  
Agama : Islam



#### 2. Riwayat Pendidikan

Sekolah Dasar	SD Negeri 06 Sungailiat	2009-2015
SMP	SMP Negeri 01 Sungailiat	2015-2018
SMA	SMA Negeri 01 Sungailiat	2018-2021

Sungailiat, 24 Juli 2024

Khairun Nisah

## Lampiran 2

### Perhitungan Tabel Uji Individu

#### a. Kekasaran Permukaan

$$t_{hitung}(X_1) = \frac{(b1)}{Se(b1)} = \frac{-1,611}{0,386} = -4,174$$

$$t_{hitung}(X_2) = \frac{(b2)}{Se(b2)} = \frac{2,097}{0,392} = 5,349$$

$$t_{hitung}(X_3) = \frac{(b3)}{Se(b3)} = \frac{0,252}{0,386} = 0,653$$

$$t_{hitung}(X_1^2) = \frac{(b11)}{Se(b11)} = \frac{1,279}{0,379} = 3,375$$

$$t_{hitung}(X_2^2) = \frac{(b22)}{Se(b22)} = \frac{0,436}{0,404} = 1,079$$

$$t_{hitung}(X_3^2) = \frac{(b33)}{Se(b33)} = \frac{0,130}{0,379} = 0,343$$

$$t_{hitung}(X_1X_2) = \frac{(b12)}{Se(b12)} = \frac{0,188}{0,502} = 0,375$$

$$t_{hitung}(X_1X_3) = \frac{(b13)}{Se(b13)} = \frac{-0,890}{0,502} = -1,773$$

$$t_{hitung}(X_2X_3) = \frac{(b23)}{Se(b23)} = \frac{0,538}{0,502} = 1,072$$

#### b. Akurasi Dimensi

$$t_{hitung}(X_1) = \frac{(b1)}{Se(b1)} = \frac{0,103}{0,037} = 2,784$$

$$t_{hitung}(X_2) = \frac{(b2)}{Se(b2)} = \frac{0,0352}{0,0376} = 0,936$$

$$t_{hitung}(X_3) = \frac{(b3)}{Se(b3)} = \frac{0,04259}{0,037} = 1,151$$

$$t_{hitung}(X_1^2) = \frac{(b11)}{Se(b11)} = \frac{0,0489}{0,037} = -1,322$$

$$t_{hitung}(X_2^2) = \frac{(b22)}{Se(b22)} = \frac{0,001}{0,0387} = 0,026$$

$$t_{hitung}(X_3^2) = \frac{(b33)}{Se(b33)} = \frac{0,0039}{0,0363} = 0,107$$

$$t_{hitung}(X_1X_2) = \frac{(b12)}{Se(b12)} = \frac{-0,0139}{0,0482} = -0,288$$

$$t_{hitung}(X_1X_3) = \frac{(b13)}{Se(b13)} = \frac{0,1346}{0,0482} = 2,793$$

$$t_{hitung}(X_2X_3) = \frac{(b23)}{Se(b23)} = \frac{0,0746}{0,0482} = 1,548$$

### Lampiran 3

Perhitungan Pengujian Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

a. Kekasaran Permukaan

$$JKR = \frac{(\sum_{i=1}^{20})}{20} = \frac{(17,826+17,385+\dots+15,053+17,286+20,320)^2}{20} = 6629,933$$

$$JKT = [(Y1^2) + (Y2^2) + \dots + (Y20^2)] - JKR \\ = [(17,826^2) + (17,385^2) + \dots + (20,320^2)] - 6629,933 = 150,197$$

$$JK(\text{regresi}) = b'X'Y - JKR \\ = 6758,7506 - 6629,933 = 128,817$$

b. Akurasi Dimensi

$$JKR = \frac{(\sum_{i=1}^{20})}{20} = \frac{(18,236+18,393+\dots+18,278+18,524+18,622)^2}{20} = 6708,3449$$

$$JKT = [(Y1^2) + (Y2^2) + \dots + (Y20^2)] - JKR \\ = [(18,236^2) + (18,393^2) + \dots + (18,622^2)] - 6708,3449 = 0,605$$

$$JK(\text{regresi}) = b'X'Y - JKR \\ = 6708,7637 - 6708,3449 = 0,418846$$

#### Lampiran 4

Hasil pengujian pada benda kopling hasil optimasi

No. BK	Kekasaran Permukaan			Rata-Rata Hasil Pengujian
	Garis			
	1	2	3	
1	14,988	13,101	16,406	14,832
2	16,415	12,414	16,285	15,038
3	13,624	12,245	25,156	17,008

No. BK	Akurasi Dimensi			Rata-Rata Hasil Pengujian
	Titik			
	1	2	3	
1	18,414	18,386	18,178	18,326
2	18,503	18,461	18,309	18,381
3	18,900	18,451	18,600	18,650

## Lampiran 5

### Dokumentasi Sampel Hasil Penelitian





