

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Objek Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Proses Manufaktur Program Studi Teknik Industri, Universitas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta. Objek penelitian yang digunakan adalah mesin 3D *printing* LDM Tronxy Moore 1 dengan model *slurry extrusion*. *Slurry extrusion* merupakan proses pembuatan produk melalui pengendapan material komposit. Material yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari tanah liat dan aquades yang dicampur sehingga menghasilkan material berbentuk pasta. Material tanah liat yang digunakan merupakan material tanah liat komersial yang memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan material tanah liat konvensional. Keunggulan tersebut dapat dilihat dari konsistensi material yang terjamin, sifat-sifat material yang terukur dengan baik, serta ketersediaan tanah liat yang mudah didapatkan.

##### **3.1.1 Parameter Penelitian**

Nilai-nilai parameter yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada parameter dari penelitian sebelumnya. Terdapat dua parameter yang digunakan, yaitu:

##### **1. Parameter Respons**

Parameter respons merupakan parameter yang nilainya dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan pada parameter lain dan hasilnya didapatkan setelah melakukan eksperimen. Parameter respons pada penelitian ini adalah nilai akurasi dimensi hasil cetak mesin 3D *printing* LDM.

##### **2. Parameter Proses**

Parameter proses adalah parameter yang nilainya ditentukan dan divariasikan dengan tujuan untuk mendapatkan analisis pengaruh terhadap parameter respons. Parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini (Tabel 3.1).

**Tabel 3. 1** Parameter Proses yang Diteliti

| Parameter              | Keterangan                                                                                                                                          | Satuan |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <i>Print Speed</i>     | Kecepatan proses <i>printing</i> bagian luar. Bergerak secara vertikal dan horizontal pada sumbu x dan y.                                           | mm/s   |
| <i>Layer Height</i>    | Jarak setiap <i>layer</i> yang menggambarkan ketebalan antar lapisan. Bergerak mengikuti sumbu z positif.                                           | mm     |
| <i>Wall Thickness</i>  | Ketebalan dinding dari permukaan vertikal objek yang dicetak yang meliputi lapisan atas dan bawah cetakan. Bergerak secara vertikal dan horizontal. | mm     |
| <i>Nozzle Diameter</i> | Ukuran bukaan di ujung nosel ekstruder pada mesin 3D <i>printing</i> .                                                                              | mm     |

### 3.1.2 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat dua variabel penelitian yaitu variabel independen (faktor) dan variabel dependen (respons). Variabel independen terbagi menjadi faktor kontrol dan faktor *noise* (Tabel 3.2). sedangkan variabel dependen atau respons pada penelitian ini yaitu nilai pengukuran dari hasil cetak.

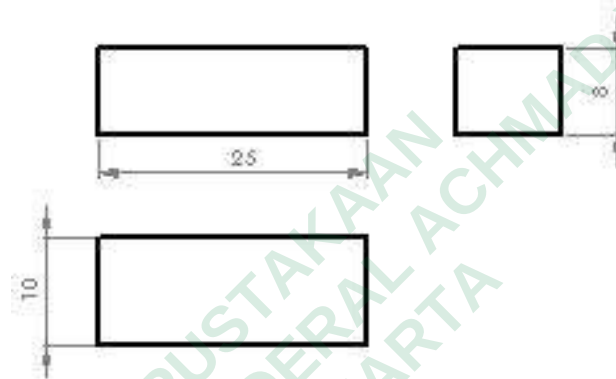
**Tabel 3. 2** Variabel Penelitian

| Variabel            | Keterangan             | Satuan |
|---------------------|------------------------|--------|
| Faktor Kontrol      | Print Speed            | mm/s   |
|                     | <i>Layer Height</i>    | mm     |
|                     | <i>Wall Thickness</i>  | mm     |
|                     | <i>Nozzle Diameter</i> | mm     |
| Faktor <i>Noise</i> | Suhu                   | °C     |
|                     | Kelembapan             | % RH   |

Variabel independen pada penelitian ini memiliki variasi nilai yang didapatkan dari hasil pilot *study*. Nilai tersebut kemudian akan dikombinasikan menggunakan DOE sehingga didapatkan kombinasi parameter cetak untuk mesin 3D *printing* LDM. Spesimen yang telah dicetak kemudian diukur untuk mendapatkan nilai *error* dimensi sehingga dapat diketahui dimensi yang optimal sesuai dengan dimensi desain. Hasil akurasi dimensi tersebut menjadi nilai variabel dependen (respons). Selain dari parameter cetak, suhu dan kelembapan juga termasuk variabel independen sebagai faktor *noise*. Faktor *noise* merupakan faktor pengganggu yang mempengaruhi keakuratan dan validitas hasil penelitian. Pada penelitian ini fluktuasi suhu dan kelembapan secara tidak langsung mempengaruhi kualitas hasil cetak mesin 3D *printing* LDM. Sehingga diperlukan pengukuran suhu dan kelembapan menggunakan *4 in 1 environmental meter*.

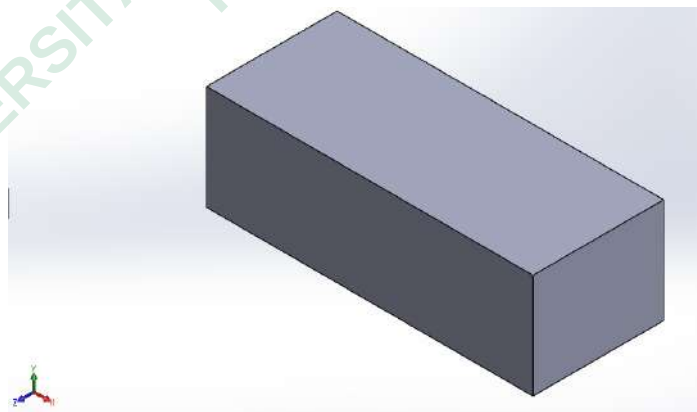
### 3.1.3 Desain Spesimen

Material komposit yang digunakan dalam penelitian ini kemudian dicetak dalam bentuk balok menggunakan mesin 3D *printing* LDM. Desain balok dipilih karena strukturnya yang sederhana dan mudah untuk membedakan setiap sisi atau titik-titik pengukuran secara jelas dan konsisten. Sehingga dapat meminimalkan variasi hasil pengukuran. Menurut Latif *et al.*, (2024) dimensi balok yang dapat digunakan sebagai spesimen cetak memiliki dimensi panjang 25 mm lebar 10 mm dan tinggi 8 mm (Gambar 3.1).



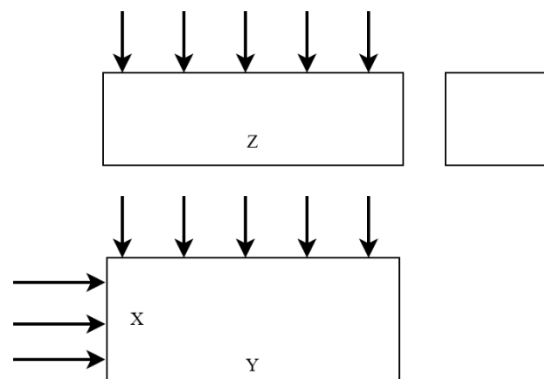
**Gambar 3. 1** Dimensi Spesimen Balok

Selanjutnya, spesimen cetak tersebut dimodelkan menggunakan perangkat lunak CAD (Gambar 3.2).



**Gambar 3. 2** Desain Spesimen

Pengukuran akurasi dimensi dilakukan menggunakan jangka sorong pada sisi x, y, dan z. Pengukuran pada sisi x dilakukan pada 3 titik, sisi y 5 titik dan sisi z 5 titik (Gambar 3.3).



Gambar 3. 3 Titik Pengukuran Spesimen

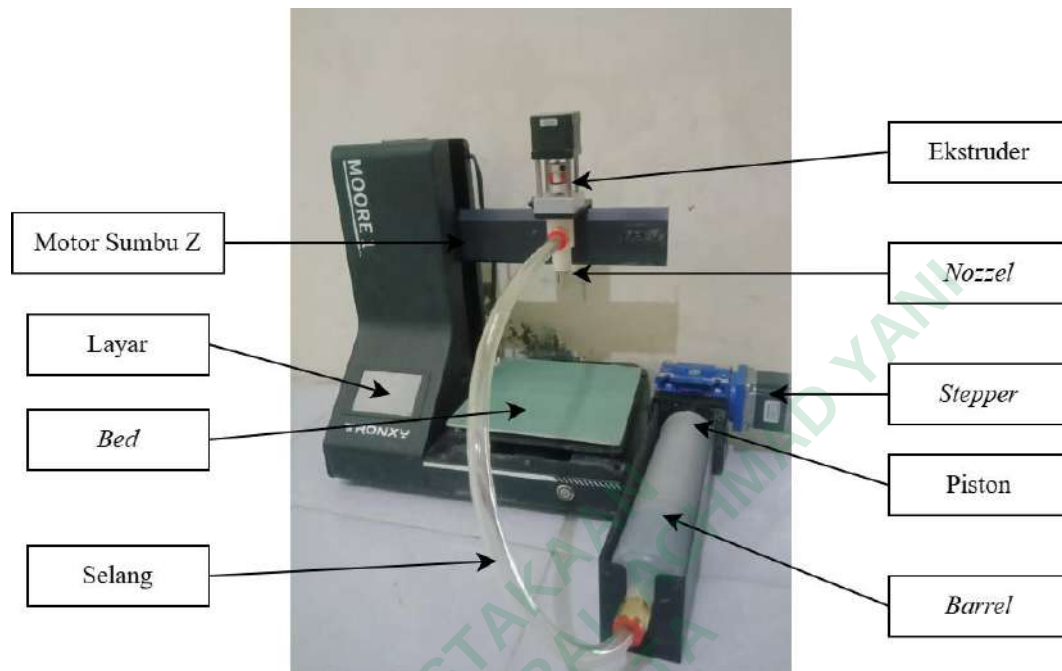
### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

#### 3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak antara lain sebagai berikut:

1. Laptop dengan spesifikasi prosesor Intel Core i3, RAM 4 GB, SSD 256 GB, *Windows 10* berfungsi untuk menjalankan *software* dan *Microsoft Office* yang digunakan dalam penelitian ini.
2. *Software* CAD digunakan untuk membuat desain spesimen cetak mesin 3D *printing*.
3. *Software* Ultimaker Cura 5.8.1 digunakan untuk melakukan *slicing* gambar spesimen dari *software* CAD dan digunakan untuk mengatur variasi nilai parameter proses cetak mesin 3D *printing*.
4. *Software* Minitab 21 digunakan untuk analisis data, pengolahan statistik, dan rancangan eksperimen.
5. Mesin 3D *printing* LDM yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Tronxy Moore 1 dengan spesifikasi dimensi *bed* 180×180×180 mm dengan model *slurry extrusion*.

Berikut merupakan gambar mesin 3D *printing* LDM yang digunakan pada penelitian ini (Gambar 3.4)



**Gambar 3. 4** Mesin 3D *Printing* LDM

Mesin 3D *printing* LDM beroperasi dengan cara mendorong material yang berada pada *barrel* oleh piston sehingga material dapat mengalir melalui selang penghubung dan masuk ke dalam ekstruder, lalu dikeluarkan melalui *nozzle* untuk mencetak benda kerja.

6. Jangka sorong merupakan salah satu alat ukur yang dapat menghitung dimensi produk, baik dari sisi panjang, lebar, maupun tinggi. Pada penelitian ini, jangka sorong yang memiliki tingkat ketelitian 0,02 mm bermerek Mitutoyo.



**Gambar 3. 5** Jangka Sorong

7. Timbangan Digital Samono model SW0KS03 dengan berat maksimal 10kg dengan dimensi timbangan 185 x 225 x 21.5 mm, timbangan digunakan untuk menentukan berat dari tanah liat yang diperlukan.



**Gambar 3. 6** Timbangan Digital

8. Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume cairan aquades dalam pembentukan material cetak. Pada penelitian ini gelas ukur yang digunakan memiliki volume maksimal 25 ml.



**Gambar 3. 7** Gelas Ukur

9. *4 in 1 environmental meter* adalah alat untuk mengukur berbagai parameter dalam lingkungan, seperti suhu, kelembaban, tekanan udara, cahaya, kebisingan, dan lain-lain. Dalam penelitian ini *4 in 1 environmental meter* digunakan untuk memantau perubahan suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan kelembaban (% RH) sebagai faktor *noise* penelitian. Pengukuran dilakukan dengan cara mengukur suhu dan kelembaban sebelum dan sesudah proses pencetakan. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh perubahan suhu dan kelembaban terhadap hasil cetak. faktor *noise* tersebut memiliki pengaruh terhadap kadar air yang dimiliki material tanah liat.



**Gambar 3. 8** *4 in 1 Environmental Meter*

10. Oven listrik Han River dengan spesifikasi ukuran 405 x 270 x 245 mm, dan kapasitas oven 12 liter. Memiliki kontrol suhu 100 - 230°C dan pengaturan waktu 60 menit.



**Gambar 3. 9** Oven

### 3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasta tanah liat komersial yang dicetak menggunakan mesin 3D *printing Liquid Deposition Modeling* (LDM) dengan metode *slurry extrusion*. Selain tanah liat material lain yang digunakan pada penelitian ini yaitu aquades. Aquades merupakan air hasil penyulingan yang bebas dari zat-zat pengotor sehingga bersifat murni (Sari *et al.*, 2023). Aquades dipilih karena memiliki standarisasi laboratorium dan biasa digunakan sebagai pelarut yang mampu melarutkan banyak zat kimia seperti garam, gula, asam, beberapa jenis

gas, dan banyak macam molekul organik. Komposisi material tanah liat dan aquades diatur dengan perbandingan 50:1 (w/v) (50 gram tanah liat per 1 ml aquades) (Yousaf *et al.*, 2024). Penyesuaian komposisi ini dilakukan hingga material mencapai kondisi yang memenuhi tiga kriteria yaitu *pumpability* (kemampuan dipompa melalui sistem penyaluran), *extrudability* (kemampuan diekstrusi melalui *nozzle* dengan kontrol bentuk dan ukuran), dan *buildability* (kemampuan mempertahankan bentuk selama proses pencetakan) (Tabel 3.3).

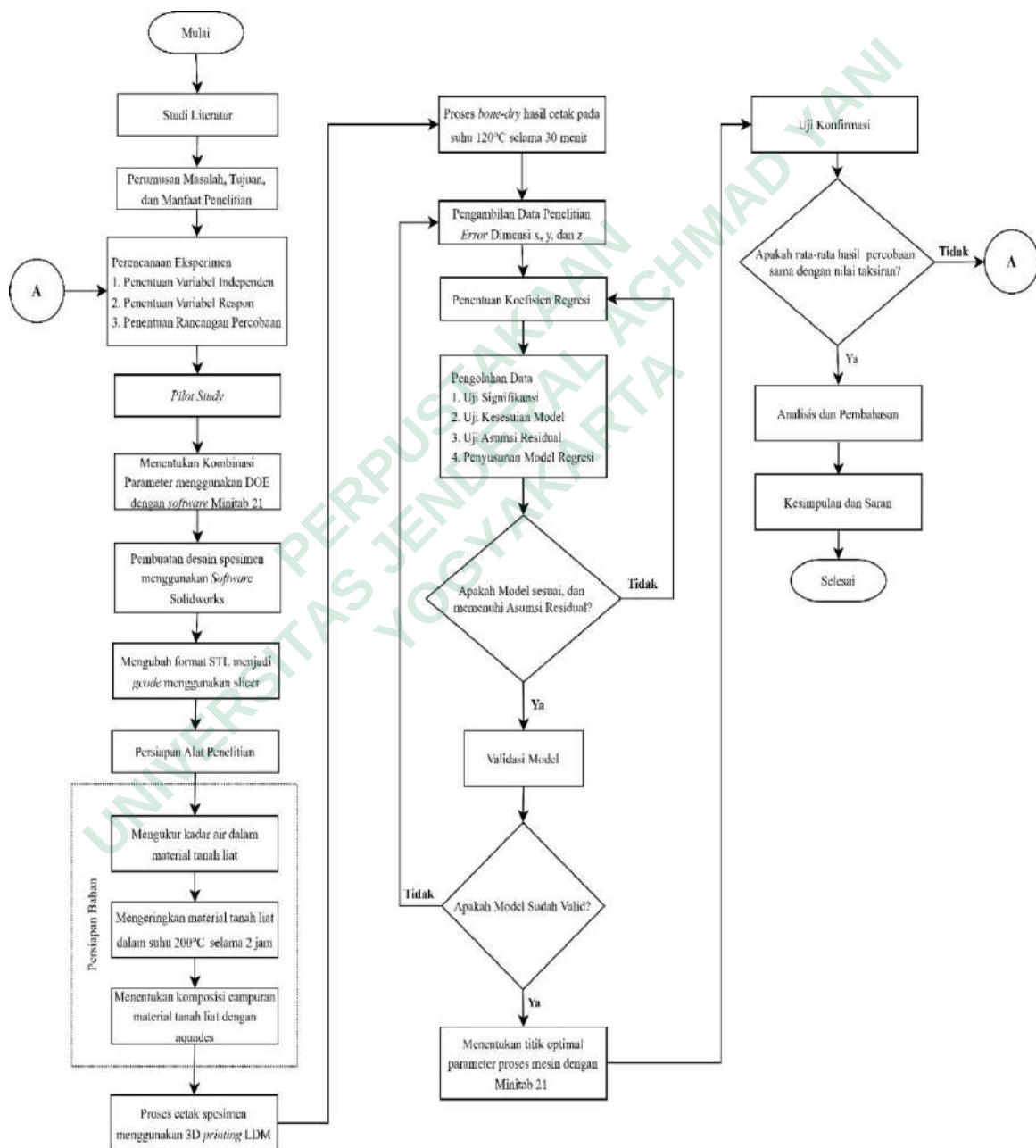
**Tabel 3. 3** Kriteria Material Cetak

| Kondisi              | Keterangan                                                                                                                                                                             | Gambar                                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Pumpability</i>   | Kemampuan material berbentuk pasta atau suspensi untuk dipompa oleh piston dan mengalir melalui selang penghubung                                                                      |   |
| <i>Extrudability</i> | Kemampuan suatu material berbentuk pasta untuk diekstrusi secara lancar, kontinu, sehingga mampu keluar melalui <i>nozzle</i> untuk membentuk lapisan objek 3D yang diinginkan         |  |
| <i>Buildability</i>  | Kemampuan suatu material untuk diekstrusi secara stabil, serta mempertahankan bentuknya lapis demi lapis selama proses pencetakan tanpa mengalami kegagalan struktural yang signifikan |  |



### 3.3 Tahapan Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa langkah yang mencakup identifikasi masalah terkait parameter proses mesin 3D *printing* LDM, perancangan desain eksperimen, pengumpulan data, pengolahan data, konfirmasi eksperimen, analisis, dan penarikan kesimpulan. Urutan langkah-langkah tersebut divisualisasikan dalam bentuk diagram alir (*flow chart*) (Gambar 3.10).



Gambar 3. 10 Tahapan Penelitian

Gambar 3.10 merupakan diagram alir penelitian yang menggambarkan tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini. Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.

### 3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur atau kajian pustaka dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisis teori dan informasi yang relevan dari berbagai publikasi seperti, jurnal ilmiah, laporan penelitian, buku teks, dan sumber akademik lainnya. Hasil analisis tersebut menjadi landasan teoritis untuk merumuskan hipotesis, menentukan metodologi, dan menginterpretasikan temuan. Selain itu, kajian pustaka juga berperan penting dalam mengidentifikasi celah penelitian, sehingga memastikan orisinalitas dan kebaruan kontribusi penelitian terhadap ilmu pengetahuan.

### 3.3.2 Perumusan Masalah, Tujuan, dan Manfaat Penelitian

Masalah yang telah teridentifikasi selanjutnya dinyatakan dalam rumusan masalah. Hal ini dilakukan untuk mengarahkan penelitian pada penyelesaian masalah. Rumusan masalah berperan dalam mengidentifikasi masalah yang perlu diselesaikan yang kemudian diperlukan tujuan penelitian untuk menentukan bagaimana cara memecahkan masalah tersebut sehingga memberikan manfaat kepada berbagai pihak.

### 3.3.3 Penentuan Respons, Faktor, dan Level

Pada penelitian ini, terdapat dua variabel yang digunakan, yaitu variabel respons (variabel dependen) dan faktor (variabel independen).

#### 1. Variabel Dependen (Respons)

Respons utama yang diamati dalam penelitian ini adalah akurasi dimensi tertinggi pada hasil cetak mesin 3D *printing* LDM. Untuk mengevaluasi akurasi, diamati tiga indikator *error* dimensi, yaitu *error* dimensi pada sumbu x, *error* dimensi pada sumbu y, dan *error* dimensi pada sumbu z. Titik optimal akurasi dimensi dicapai ketika nilai dari ketiga *error* dimensi tersebut mendekati nilai minimum atau nol, yang mengindikasikan bahwa ukuran hasil cetak telah sesuai atau mendekati dengan ukuran desain yang diinginkan. Pemilihan ketiga variabel respons ini didasarkan pada temuan studi literatur yang relevan yang menyatakan

bahwa ketiga dimensi tersebut secara signifikan memengaruhi kualitas geometris dan keseluruhan akurasi hasil cetak dari mesin 3D *printing* LDM.

## 2. Variabel Independen (Faktor)

Variabel independen atau variabel proses utama yang diidentifikasi berpengaruh terhadap akurasi dimensi tertinggi meliputi *layer height* (LH), *wall thickness* (WT), *print speed* (PS), dan *nozzle diameter* (ND). Selama proses pencetakan, terdapat variabel-variabel yang sulit dikontrol secara langsung, seperti suhu dan kelembapan lingkungan, yang berpotensi menjadi faktor *noise* dalam penelitian. Variasi pada variabel-variabel *noise* ini dapat menyebabkan fluktuasi pada nilai variabel respons. Proses pencetakan dalam penelitian ini dilakukan pada kondisi suhu ruang yang berkisar antara 20,5 °C - 28,1 °C dan tingkat kelembapan relatif menurut yang direkomendasikan, yaitu antara 40%RH hingga 60%RH (Fachreza *et al.*, 2021).

## 3. Level

Untuk menentukan tingkat faktor dalam penelitian ini, digunakan tiga tingkat, yaitu tingkat atas, tingkat tengah, dan tingkat bawah, yang diperkirakan dapat menghasilkan nilai respons yang optimal. Nilai-nilai spesifik untuk setiap level faktor ditentukan berdasarkan hasil studi pendahuluan (*pilot study*) dan disesuaikan dengan spesifikasi teknis mesin 3D printing LDM yang digunakan. Berikut adalah daftar faktor dan respons yang diukur dalam penelitian ini (Tabel 3.4).

**Tabel 3. 4** Level dan Faktor Penelitian

|         | Variabel       | Parameter               | Penentuan Nilai Level                |
|---------|----------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Faktor  | X <sub>1</sub> | <i>Print Speed</i>      | Spesifikasi Mesin 3D <i>printing</i> |
|         | X <sub>2</sub> | <i>Layer Height</i>     | Hasil <i>pilot study</i>             |
|         | X <sub>3</sub> | <i>Wall Thickness</i>   | Hasil <i>pilot study</i>             |
|         | X <sub>4</sub> | <i>Nozzle Diameter</i>  | Spesifikasi Mesin 3D <i>printing</i> |
| Respons | R <sub>1</sub> | Akurasi Dimensi Sumbu X | Akurasi Dimensi Pada Sumbu X         |
|         | R <sub>2</sub> | Akurasi Dimensi Sumbu Y | Akurasi Dimensi Pada Sumbu Y         |
|         | R <sub>3</sub> | Akurasi Dimensi Sumbu Z | Akurasi Dimensi Pada Sumbu Z         |

Berdasarkan spesifikasi mesin 3D printer Tronxy Moore 1, mesin ini memiliki nilai *layer height* antara 0,3 – 3 mm dan *print speed* sebesar 10 – 40 mm/s.

Mengacu pada penelitian Yousaf *et al.*, (2024) dan Donyadari *et al.*, (2024) yang menunjukkan hasil pencetakan reliabel pada *layer height* 1 mm dan 3 mm, sehingga penelitian ini menggunakan rentang nilai yang mencakup kedua nilai tersebut. Penentuan nilai *nozzle* diameter didasarkan pada nilai maksimum dan minimum ukuran diameter *nozzle* yang tersedia pada mesin 3D *printing* LDM Tronxy Moore 1. Selain itu, menurut Donyadari *et al.*, (2024), nilai *wall thickness* yang cocok digunakan pada suatu mesin 3D *printing* LDM adalah 0,8 – 1,2 mm. Sehingga didapatkan nilai level untuk masing-masing faktor sebagai berikut (Tabel 3.5).

**Tabel 3. 5** Nilai Level Faktor

| Faktor                      | Level |     |     |
|-----------------------------|-------|-----|-----|
|                             | 1     | 2   | 3   |
| <i>Print Speed</i> (mm/s)   | 10    | 25  | 40  |
| <i>Layer Height</i> (mm)    | 1     | 2   | 3   |
| <i>Wall Thickness</i> (mm)  | 0,8   | 1   | 1,2 |
| <i>Nozzle Diameter</i> (mm) | 1,4   | 2,1 | 2,8 |

*Range* dari setiap level didapatkan melalui *Coded Value Equation* (Montgomery, 2012). *Coded value* atau nilai terkode adalah representatif alternatif nilai aktual dari variabel faktor. Tujuannya untuk menyederhanakan perhitungan, interpretasi hasil dan mengurangi masalah skala serta multikolinearitas. Berikut merupakan nilai faktor dan level menggunakan *coded variabel*. Berikut merupakan level dan faktor dalam *coded value equation* (Tabel 3.6).

**Tabel 3. 6** Parameter Penelitian

| Faktor                      | <i>Coded Variabel</i> | <i>Actual Variabel</i> |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| <i>Print Speed</i> (mm/s)   | -1                    | 10                     |
|                             | 0                     | 25                     |
|                             | 1                     | 40                     |
| <i>Layer Height</i> (mm)    | -1                    | 1                      |
|                             | 0                     | 2                      |
|                             | 1                     | 3                      |
| <i>Wall Thickness</i> (mm)  | -1                    | 0,8                    |
|                             | 0                     | 1                      |
|                             | 1                     | 1,2                    |
| <i>Nozzle Diameter</i> (mm) | -1                    | 1,4                    |
|                             | 0                     | 2,1                    |
|                             | 1                     | 2,8                    |

### 3.3.4 Rancangan Percobaan

Pada penelitian ini, rancangan percobaan yang diterapkan adalah *Box-Behnken Design* (BBD). Pemilihan BBD didasarkan pada jumlah percobaan yang lebih sedikit dibandingkan *Central Composite Design* (CCD), terutama ketika melibatkan banyak faktor. Dengan empat faktor dan tiga level yang diteliti, BBD menghasilkan total 27 kombinasi percobaan. Terdiri dari 24 percobaan dilakukan pada kombinasi level atas, level tengah, dan level bawah dari faktor-faktor tersebut, sementara 3 percobaan sisanya dilakukan pada titik pusat (semua faktor pada level tengah). Jumlah percobaan ini dianggap memadai untuk memodelkan dan menganalisis respons yang diinginkan secara komprehensif.

### 3.3.5 Pembuatan Kombinasi Menggunakan DOE

Setelah menentukan *range* dari setiap level, maka dilakukan pembuatan desain eksperimen menggunakan DOE berdasarkan data pada Tabel 3.4. Pada dasarnya *box behnken* dibentuk melalui kombinasi rancangan  $2^k$  *incomplete block design* dengan penambahan *center run* dalam strukturnya. Rancangan Box-Behnken hanya dapat diterapkan pada percobaan yang melibatkan minimal tiga faktor. Berikut merupakan kombinasi dari rancangan *box behnken* pada penelitian ini (Tabel 3.7).

**Tabel 3. 7** *Design of Experiment Box Behnken*

| StdOrder | RunOrder | Pengkodean     |                |                |                | Tanpa Pengkodean |                |                |                |
|----------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
|          |          | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>1</sub>   | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> |
| 8        | 1        | 0              | 0              | 1              | 1              | 2                | 1              | 40             | 2,8            |
| 5        | 2        | 0              | 0              | -1             | -1             | 2                | 1              | 10             | 1,4            |
| 13       | 3        | 0              | -1             | -1             | 0              | 2                | 0,8            | 10             | 2,1            |
| 20       | 4        | 1              | 0              | 1              | 0              | 3                | 1              | 40             | 2,1            |
| 14       | 5        | 0              | 1              | -1             | 0              | 2                | 1,2            | 10             | 2,1            |
| 19       | 6        | -1             | 0              | 1              | 0              | 1                | 1              | 40             | 2,1            |
| 27       | 7        | 0              | 0              | 0              | 0              | 2                | 1              | 25             | 2,1            |
| 23       | 8        | 0              | -1             | 0              | 1              | 2                | 0,8            | 25             | 2,8            |
| 16       | 9        | 0              | 1              | 1              | 0              | 2                | 1,2            | 40             | 2,1            |
| 15       | 10       | 0              | -1             | 1              | 0              | 2                | 0,8            | 40             | 2,1            |
| 17       | 11       | -1             | 0              | -1             | 0              | 1                | 1              | 10             | 2,1            |
| 7        | 12       | 0              | 0              | -1             | 1              | 2                | 1              | 10             | 2,8            |
| 4        | 13       | 1              | 1              | 0              | 0              | 3                | 1,2            | 25             | 2,1            |
| 10       | 14       | 1              | 0              | 0              | -1             | 3                | 1              | 25             | 1,4            |
| 3        | 15       | -1             | 1              | 0              | 0              | 1                | 1,2            | 25             | 2,1            |
| 24       | 16       | 0              | 1              | 0              | 1              | 2                | 1,2            | 25             | 2,8            |
| 9        | 17       | -1             | 0              | 0              | -1             | 1                | 1              | 25             | 1,4            |

| StdOrder | RunOrder | Pengkodean     |                |                |                | Tanpa Pengkodean |                |                |                |
|----------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
|          |          | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>1</sub>   | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> |
| 21       | 18       | 0              | -1             | 0              | -1             | 2                | 0,8            | 25             | 1,4            |
| 1        | 19       | -1             | -1             | 0              | 0              | 1                | 0,8            | 25             | 2,1            |
| 2        | 20       | 1              | -1             | 0              | 0              | 3                | 0,8            | 25             | 2,1            |
| 12       | 21       | 1              | 0              | 0              | 1              | 3                | 1              | 25             | 2,8            |
| 26       | 22       | 0              | 0              | 0              | 0              | 2                | 1              | 25             | 2,1            |
| 18       | 23       | 1              | 0              | -1             | 0              | 3                | 1              | 10             | 2,1            |
| 11       | 24       | -1             | 0              | 0              | 1              | 1                | 1              | 25             | 2,8            |
| 6        | 25       | 0              | 0              | 1              | -1             | 2                | 1              | 40             | 1,4            |
| 22       | 26       | 0              | 1              | 0              | -1             | 2                | 1,2            | 25             | 1,4            |
| 25       | 27       | 0              | 0              | 0              | 0              | 2                | 1              | 25             | 2,1            |

### 3.3.6 Pembuatan Desain Spesimen

Desain spesimen dibuat dengan menggunakan *Software* Solid Works. Bentuk desain spesimen adalah balok dengan dimensi spesimen 25 mm x 10 mm x 8 mm. *File* desain disimpan dalam bentuk format *StereoLithography* (.STL) agar dapat diproses di *software slicing* Ultimaker Cura. Proses *slicer* berfungsi untuk mengubah data 2D pada format STL menjadi gambar geometri yang dapat dibaca oleh sistem yang ada pada mesin 3D *printing*. Pada proses *slicer*, parameter proses dapat diatur berdasarkan hasil studi pendahuluan (*pilot study*) dan desain eksperimen (*Design of Experiment*). Pengaturan ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter pencetakan berdasarkan temuan empiris sebelumnya.

### 3.3.7 Proses Slicing

Pada tahap ini dilakukan proses *slicing* menggunakan *software* Ultimaker Cura. Langkah-langkah proses *slicing* spesimen yaitu:

1. Memasukkan *file* desain spesimen dengan format (.STL) ke *software slicing* Ultimaker Cura untuk mengatur faktor dan level proses cetak mesin 3D printer berdasarkan pembuatan DOE.
2. *File* hasil dari proses *slicing* disimpan dalam bentuk *G-code* (.gcode) agar dapat diproses mesin 3D printer.
3. Memindahkan *file* hasil dari proses *slicing* berbentuk *g-code* ke *MicroSD*.

### 3.3.8 Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan bahan dalam penelitian ini meliputi beberapa tahapan, yaitu:

1. Mengukur kadar air dalam tanah liat sebelum proses cetak.

2. Menghilangkan kadar air dalam material tanah liat melalui pemanasan bertahap hingga mencapai suhu maksimum 200°C selama 2 jam. Proses pemanasan terkontrol ini bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terdapat dalam tanah liat, sehingga jumlah penambahan aquades pada tahap selanjutnya dapat dilakukan secara lebih akurat dan terukur.
3. Menghaluskan tanah liat sehingga berbentuk serbuk atau *powder* Proses ini bertujuan untuk memperkecil ukuran partikel tanah liat, sehingga memudahkan proses pencampuran dan meningkatkan homogenitas campuran.
4. Tanah liat yang telah dihaluskan dicampurkan dengan aquades secara bertahap hingga membentuk pasta dengan perbandingan komposisi 50 gram tanah liat untuk setiap 1 ml aquades (50:1, w/v).
5. Material yang sudah berbentuk pasta kemudian di cetak untuk mengetahui kemampuan material tersebut yang terdiri dari beberapa kondisi yang terukur terdiri dari:
  - a. *Pumpability* (Kemampuan alir), *pumpability* digunakan untuk menilai sejauh mana material dapat didorong atau dipompa melalui suatu sistem.
  - b. *Extrudability* (Kemampuan ekstrusi), kondisi suatu material yang dapat dibentuk melalui proses ekstrusi.
  - c. *Buildability* (Kemampuan cetak), kemampuan material untuk membentuk struktur yang diinginkan melalui proses cetak.

### 3.3.9 Proses Cetak

Tahapan selanjutnya yaitu melakukan proses cetak sesuai dengan parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Berikut merupakan tahapan pada proses cetak menggunakan teknologi 3D *printing* LDM yaitu:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan dalam proses cetak.
2. Membersihkan mesin 3D *printing* LDM sebelum digunakan.
3. Memasukkan material pasta pada *container* mesin.
4. Memasang ekstruder pada mesin.
5. Melakukan *setting* parameter pada mesin 3D *printing* LDM.
6. Melakukan proses cetak spesimen.

7. Setelah spesimen dicetak, dilakukan proses *bone dry*, yaitu suatu kondisi ketika kadar air dalam spesimen telah berkurang secara signifikan hingga mencapai titik di mana tidak ada lagi kelembaban yang terasa atau terlihat. Proses *bone dry* pada penelitian ini dilakukan dengan memanaskan spesimen menggunakan oven.

### 3.3.10 Pengambilan Data

Tahapan pengambilan data dalam penelitian ini meliputi pengumpulan data dimensi spesimen cetak dan data perubahan suhu dan kelembapan. Data dimensi spesimen digunakan untuk menghitung *error* dimensi pada sumbu x, y, dan z. Sedangkan data suhu dan kelembapan digunakan untuk mengetahui pengaruh terhadap akurasi dimensi cetak.

### 3.3.11 Pengolahan Data

#### 1. Uji Signifikansi

Uji signifikansi digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh variabel independen terhadap variabel respons, baik secara individual maupun secara simultan melalui interaksi antar variabel. Hasil uji signifikansi ini divisualisasikan melalui grafik Pareto untuk setiap variabel respons.

#### 2. Uji Kesesuaian Model

Uji kesesuaian model dilakukan untuk menentukan apakah model yang diestimasi sesuai dengan model yang sebenarnya. Proses ini dilakukan melalui pengujian *lack of fit* yang bertujuan untuk mengidentifikasi apakah kesalahan yang terjadi merupakan kesalahan alami (*pure error*) atau kesalahan yang bersifat sistematis, dengan menggunakan analisis varians (ANOVA). Tingkat signifikansi yang digunakan pada pengujian ini yaitu 95% sehingga nilai  $\alpha$  pada pengujian ini yaitu 0,05. Jika *p-value* lebih dari  $\alpha$  maka dapat dikatakan model yang ditaksir sudah valid dan tidak terdapat *lack of fit* pada model. Sebaliknya, jika *p-value* kurang dari  $\alpha$  maka model dikatakan mengandung *lack of fit* sehingga model yang ditaksir tidak valid dan terdapat *lack of fit*. Berikut merupakan hipotesis yang digunakan pada uji kesesuaian model:

$H_0$  : tidak ada *lack of fit* dalam model

$H_1$  : terdapat *lack of fit* dalam model



Pengambilan keputusan:

Jika nilai  $p\text{-value} > \alpha$ , maka  $H_0$  diterima

Jika nilai  $p\text{-value} < \alpha$ , maka  $H_0$  diolak

### 3. Uji Asumsi Residual

Pada tahapan ini terdapat beberapa pengujian data yang dilakukan untuk memastikan model regresi yang didapatkan pada model orde satu dan orde dua sudah sesuai dan valid. Terdapat beberapa tahapan pada pengujian asumsi residual yaitu:

- a. Uji Normalitas, setelah model orde satu atau orde dua didapatkan kemudian dilakukan uji normalitas untuk mengetahui distribusi data. Data dapat dikatakan normal jika hasil pengujian didapatkan nilai *asympt. Sig (2-tailed)*  $> 0,05$  atau nilai  $p\text{-value}$  lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  untuk *confidence interval* 95%. Sehingga dapat dirumuskan hipotesis dari uji normalitas adalah sebagai berikut:

$H_0$  : Data terdistribusi normal.

$H_1$  : Data tidak terdistribusi normal

Pengambilan keputusan:

Jika nilai *asympt. Sig (2-tailed)*  $> 0,05$  atau  $p\text{-value} > \alpha$ , maka  $H_0$  diterima

Jika nilai *asympt. Sig (2-tailed)*  $< 0,05$   $p\text{-value} < \alpha$ , maka  $H_0$  diolak

- b. Uji independen, Uji ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap pengamatan dalam data bersifat acak dan tidak saling berkorelasi (independen). Pemeriksaan independen dilakukan dengan memanfaatkan plot *Autocorrelation Function* (ACF). Residual dianggap independen jika nilai korelasinya berada dalam rentang  $\pm 2/\sqrt{n}$ , dengan 'n' adalah jumlah total pengamatan.
- c. Uji Identik, Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi apakah residual memiliki varians yang homogen (sama) di seluruh nilai prediksi. Asumsi *homogenitas* terpenuhi apabila plot residual terhadap nilai prediksi menunjukkan penyebaran data yang acak di sekitar garis nol dan tidak membentuk pola sistematis tertentu.

### 3.3.12 Validasi Model

Validasi digunakan untuk memastikan model matematis yang telah dibuat sudah sesuai dengan nilai prediksi. Pengujian validasi dilakukan dengan

menggunakan uji *one-sample t test* dengan signifikansi  $\alpha = 0,05$ . Uji *one-sample t test* digunakan untuk membandingkan rata-rata sampel dengan nilai tertentu atau nilai hipotesis yang sudah diketahui, untuk melihat apakah sampel tersebut berasal dari populasi dengan rata-rata yang sama dengan nilai tersebut. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut:

$H_0 : \mu = \mu_0$  (rata-rata hasil validasi sama dengan nilai prediksi)

$H_1 : \mu \neq \mu_0$  (rata-rata hasil validasi sama dengan nilai prediksi)

Pengambilan keputusan:

Jika nilai *asympt. Sig (2-tailed)* atau *p-value*  $> \alpha$ , maka  $H_0$  diterima

Jika nilai *asympt. Sig (2-tailed)* atau *p-value*  $< \alpha$ , maka  $H_0$  diolak

### 3.3.13 Penentuan Parameter Optimal

Optimasi parameter proses dilakukan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) melalui *response optimizer* pada perangkat lunak Minitab 21 untuk menentukan kombinasi level variabel yang menghasilkan respons optimal. Setelah didapatkan nilai optimal maka dilakukan proses cetak berdasarkan hasil optimasi metode RSM. Hasil cetak kemudian dipanaskan (*bone dry*) dan diukur menggunakan jangka sorong untuk mengetahui ukuran dimensi dari spesimen hasil cetak.

### 3.3.14 Uji Konfirmasi

Setelah nilai respons optimal diperoleh, percobaan konfirmasi akan dilakukan untuk mengevaluasi ketepatan hasil analisis. Percobaan ini dilakukan dengan menerapkan level faktor yang menghasilkan nilai respons yang optimal. Selanjutnya, nilai rata-rata dari hasil eksperimen konfirmasi akan dibandingkan dengan nilai respons yang diprediksi oleh model. Perbandingan statistik dilakukan melalui uji *one-sample t* dengan hipotesis sebagai berikut:

$H_0 : \mu = \mu_0$  (rata-rata hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai respons taksiran)

$H_1 : \mu \neq \mu_0$  (rata-rata hasil eksperimen konfirmasi tidak sama dengan nilai respons taksiran)

Pengambilan keputusan:

Jika nilai *asympt. Sig (2-tailed)* atau *p-value*  $> \alpha$ , maka  $H_0$  diterima

Jika nilai *asympt. Sig (2-tailed)* atau *p-value*  $< \alpha$ , maka  $H_0$  diolak

Hipotesis nol ( $H_0$ ) akan diterima jika nilai *p-value* yang diperoleh dari uji *one-sample t* lebih besar dari tingkat signifikansi yang ditetapkan, yaitu  $\alpha = 0,05$ , yang mengindikasikan tidak terdapat perbedaan signifikan antara hasil eksperimen konfirmasi dan nilai taksiran model.

### **3.3.15 Analisis Hasil dan Pembahasan**

Pada tahap ini, dilakukan analisis terhadap data dan hasil yang diperoleh dari seluruh fase penelitian. Analisis ini dilakukan dari berbagai sudut pandang untuk mengidentifikasi kendala yang mungkin muncul atau pengaruh signifikan terhadap proses. Berdasarkan hasil analisis tersebut, akan dibahas relevansi hasil penelitian dengan kondisi nyata yang merujuk pada penelitian sebelumnya.

### **3.3.16 Kesimpulan dan Saran**

Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah menarik kesimpulan yang didasarkan pada hasil pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan. Kesimpulan disusun berdasarkan temuan dan analisis yang diperoleh selama proses penelitian, sementara saran diberikan untuk perbaikan dan pengembangan pada penelitian yang akan datang. Dengan demikian, diharapkan penelitian selanjutnya dapat mengatasi keterbatasan yang ada dalam penelitian ini serta memberikan kontribusi yang lebih luas dan mendalam, baik dari segi teoritis maupun praktis.