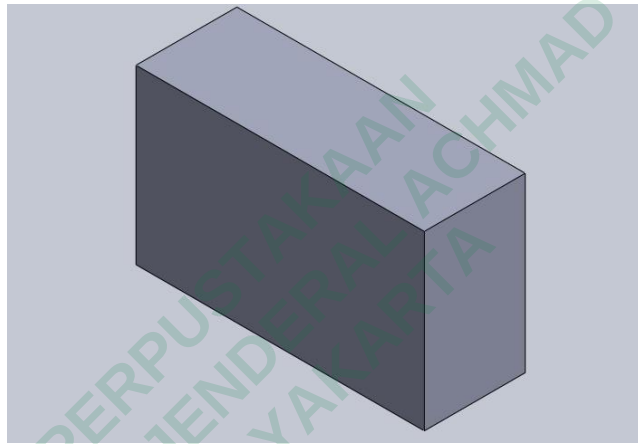


BAB 3

METODE PENELITIAN

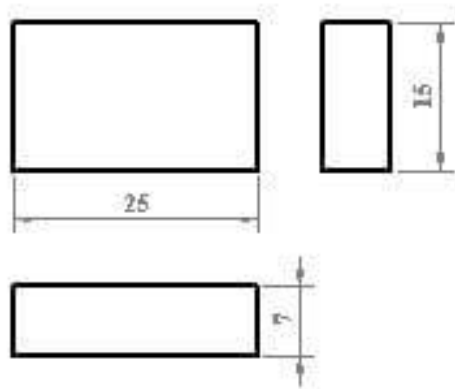
3.1. Objek Penelitian

Objek penelitian ini menggunakan material *Polymethyl Methacrylate* (PMMA-Like) dalam bentuk balok yang dicetak menggunakan mesin 3D *printer* yang mengadopsi teknologi *Digital Light Processing* (DLP). Desain spesimen pada penelitian ini dibuat dengan menggunakan *Software* Solidworks (gambar 3.1)



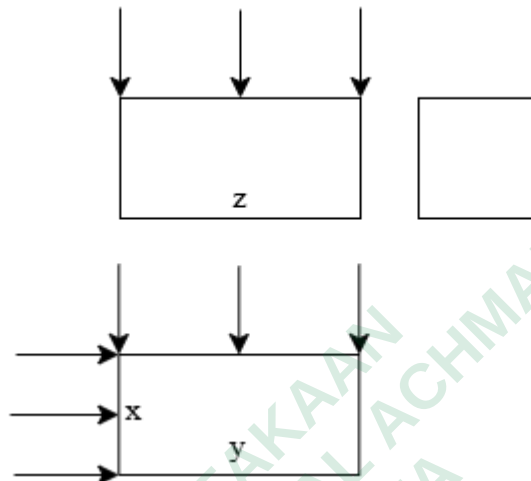
Gambar 3. 1 Desain Spesimen

Objek spesimen berbentuk balok dirancang agar memiliki perbedaan yang jelas setiap sisinya dan mempermudah proses pengukuran. Objek spesimen balok dengan ukuran panjang 25 mm, lebar 15 mm, dan tinggi 7 mm (gambar 3.2)



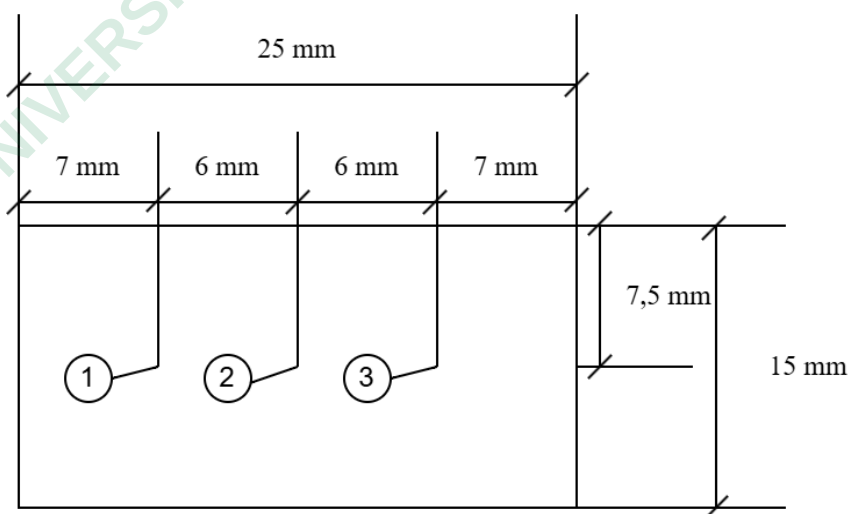
Gambar 3. 2 Dimensi Spesimen

Pengukuran untuk dimensi dilakukan menggunakan jangka sorong untuk mengukur dimensi x, y, dan z. Setiap dimensi diukur pada 3 titik berbeda, yaitu dimensi x dengan 3 titik, dimensi y dengan 3 titik, dan dimensi z dengan 3 titik pengukuran, untuk memastikan representasi yang akurat dari setiap sisi dimensi (gambar 3.3)



Gambar 3. 3 Titik Pengukuran Spesimen

Pengukuran kekerasan permukaan dilakukan menggunakan alat durometer tipe D standar ASTM D2240 dengan skala nilai dari 0 hingga 100. Setiap spesimen diukur pada tiga titik yang berbeda, pada dimensi x dengan jarak 7,7 mm, dan dimensi y, diukur pada titik 7 mm, 13 mm, dan 19 mm. Untuk memastikan akurasi nilai kekerasan permukaan (gambar 3.4)



Gambar 3. 4 Ilustrasi titik pengujian pada spesimen

Mesin yang digunakan adalah printer 3D *Digital Light Processing* (DLP) memiliki berat mesin 7,1 kg dengan ukuran 221x221x404 mm ukuran cetak mesin *Digital Ligh Processing* yaitu 12x80x160 mm. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Proses Manufaktur Aditif, Program Studi Teknik Industri Fakultas dan Teknologi Informasi Universitas Jendral Achmad Yani Yogyakarta. Berikut adalah gambar mesin 3D printer *Digital Light Processing* (gambar 3.5)



Gambar 3. 5 Mesin 3D Printer DLP

Berikut merupakan variabel tetap yang digunakan dalam proses percetakan 3D printer *Digital Light Processing* yang diperoleh dari pengaturan standar pabrikan (tabel 3.6)

Tabel 3. 5 variabel tetap

No	Parameter	value	Unit
1	<i>Initial Exposure Time</i>	60	s
2	<i>Motor Speed</i>	3	mm/s
3	<i>Turn Off Delay</i>	2	s
4	<i>Rising Height</i>	6	s

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan dalam penelitian ini adalah:

1. Laptop dengan spesifikasi prosessor AMD *Ryzen* 3, RAM 4 GB, SSD 256 GB, dan windows 10. Laptop digunakan untuk menjalankan *software* yang digunakan dan pembuatan laporan.
2. Solidworks merupakan *software* yang digunakan untuk membuat desain spesimen 3D sebagai inputan *software slicer*.
3. *Halot Box* merupakan *software slicer* yang digunakan untuk mengatur desain 3D yang sudah siap agar dapat di proses oleh mesin 3D *printer* dan untuk mengatur variasi nilai parameter proses cetak mesin 3D *printer*.
4. Minitab merupakan *software* analisis statistik yang digunakan untuk analisis data, pengolahan statistika, dan rancangan eksperimen.
5. Mesin 3D *printer Digital Light Processing (DLP)* yang digunakan adalah tipe *Halot-One* digunakan untuk mencetak spesimen.
6. Bahan dalam penelitian ini adalah material resin PMMA-*Like* dengan berat 1 kg.



Gambar 3. 6 Material PMMA-*Like*

7. *Isopropyl alcohol* yang digunakan pencucian spesimen setelah dicetak.



Gambar 3. 7 Alcohol

8. Mesin *Creality* UW-03 digunakan untuk mencuci hasil print dengan larutan alkohol dan untuk mengeringkan hasil print dengan pancaran sinar UV.



Gambar 3. 8 Curing

9. Jangka sorong yang digunakan untuk pengukuran dimensi yang memiliki spesifikasi ketelitian 0,02 mm.



Gambar 3. 9 Jangka Sorong

10. Durometer digital D alat yang digunakan untuk mengukur kekerasan permukaan dari spesimen



Gambar 3. 10 Durometer

11. Kunci L digunakan untuk mengendorkan dan mengencangkan bagian dari mesin 3D *printer*.



Gambar 3. 11 Kunci L

12. Spatula atau *wall scraper* digunakan untuk melepaskan hasil spesimen dari mesin 3D printing.



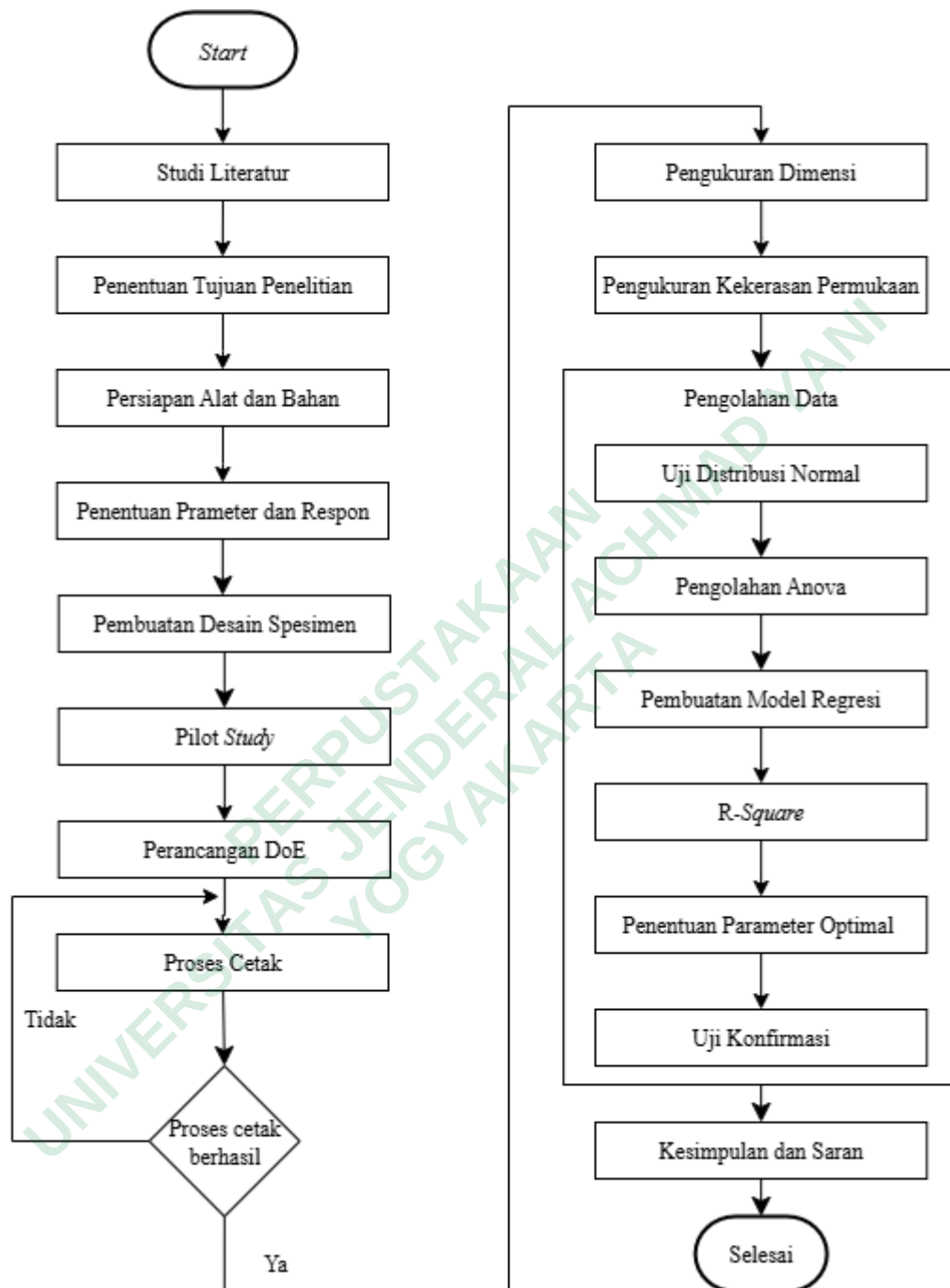
Gambar 3. 12 *Wall Scraper*

13. Sarung tangan digunakan sebagai pelindung selama proses cetak.



Gambar 3. 13 Sarung Tangan

3.3. Tahapan Penelitian



Gambar 3. 14 Tahap Penelitian

Gambar 3.14 Merupakan proses atau tahapan penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti sebagai acuan dalam penelitian ini. Tahap – tahap tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Literature study ini digunakan untuk mencari dan meneliti teori informasi yang relevan dengan permasalahan yang dibahas untuk mendukung pelaksanaan penelitian. Sumber literatur yang digunakan antara lain jurnal penelitian, buku dan referensi lain dari internet. Pada tahap ini, peneliti mengkaji beberapa sumber untuk memperoleh informasi yang menjadi latar belakang dan landasan teori dari materi yang dibahas. Selain itu, studi literatur juga bertujuan untuk memastikan bahwa topik yang diteliti belum pernah dilakukan sebelumnya.

2. Penentuan Tujuan Penelitian

Penentuan tujuan penelitian dilakukan agar penelitian dapat fokus pada masalah yang diteliti, sehingga penelitian dapat dilakukan secara sistematis dan tidak menyimpang dari masalah yang diteliti.

3. Persiapan Alat dan Bahan

Tahap ini peneliti mempersiapkan alat dan bahan yang digunakan pada penelitian agar proses penelitian sesuai rencana yang telah diterapkan.

4. Penentuan Parameter dan Respon

Determinasi parameter dan respon berdasarkan tinjauan pustaka, parameter-parameter yang digunakan adalah *exposure time*, *layer thickness*, dan *bottom exposure layer*. Parameter yang sesuai dengan mesin 3D printer *Digital Light Processing* (DLP) tipe *Halot-One* yaitu:

- a. *Exposure time* (waktu pemaparan tiap lapisan) pada tahap *pilot study* dengan 5 level yaitu 1s, 3s, 5s, 7s dan 9s untuk menghasilkan 2 level. Parameter *Exposure Time* diperoleh dari penelitian Prabhakaran *et al* (2024) yang menyatakan *exposure time* dengan nilai 1s berpengaruh pada respon kekerasan permukaan dan kekuatan *impact*, sedangkan penelitian Ibrahim *et al* (2017) menyatakan nilai parameter *exposure time* 9s berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi. Parameter *Exposure Time* akan disimbolkan dengan notasi LT.

- b. *Layer Thickness* (ketebalan lapisan yang dicetak) pada tahap pilot *study* dengan 5 level yaitu 0,025mm, 0,035mm, 0,055mm, 0,065mm, dan 0,075 mm untuk mendapatkan 2 level. Parameter *layer thickness* diperoleh dari penelitian Wajdi & Saad (2023) yang mendapatkan hasil parameter *layer thiknes* 0,075 mm dan penelitian Zoltan *et al* (2023) mendapatkan nilai parameter *layer thickness* 0,05mm. Parameter *layer thickness* akan disimbolkan dengan notasi ET.
- c. *Bottom Exposure Layer* (lapisan dasar) pada mesin 3D *printer* DLP setiap lapisan sebesar 0,035mm, pada tahap pilot *study* parameter ini menggunakan 5 level yaitu 1, 3, 5, 8, dan 10 untuk mendapatkan 2 level. Penelitian oleh Sandi *et al* (2022) menetapkan parameter *batton exposure layer* 1 sedangkan pada penelitian Seprianto *et al* (2021) menggunakan parameter dengan nilai 8 layer. Parameter *batton exposure layer* akan disimbolkan dengan notasi BEL.

Pemilihan variabel respons dalam penelitian ini yang digunakan adalah akurasi dimensi dan kekerasan permukaan. Desain objek yang dipilih dalam penelitian ini menggunakan standar ASTM-D2240. ASTM-D2240 merupakan standar internasional dalam pengujian kekerasan permukaan dengan material bahan dasar plastik akrilik. Respon yang telah ditentukan dalam akurasi dimensi adalah *error* dimensi hasil cetak yaitu selisih dimensi dengan dimensi hasil cetak.

Tabel 3. 1. Faktor dan Respon

	Variabel	Keterangan	Penentuan nilai level
Faktor/ variabel bebas	LT	<i>Layer thickness</i>	Hasil pilot <i>study</i>
	ET	<i>Exposure Time</i>	Hasil pilot <i>study</i>
	BEL	<i>Botton Exposure Layer</i>	Hasil pilot <i>study</i>
Respon	X	<i>Error</i> dimensi panjang	<i>Error</i> dimensi pada sumbu panjang
	Y	<i>Error</i> dimensi lebar	<i>Error</i> dimensi pada sumbu lebar
	Z	<i>Error</i> dimensi tinggi	<i>Error</i> dimensi pada sumbu tinggi
	K	Kekerasan permukaan	Nilai kekerasan permukaan maksimum

5. Pembuatan Desain Spesimen

Desain spesimen dirancang menggunakan software *Solidworks*, dengan desain spesimen berbentuk balok. Standar dari ASTM-D2240 tidak memiliki spesifikasi bentuk tertentu tetapi untuk uji kekerasan permukaan memiliki standar tinggi ukuran minimal 6mm. *File* desain disimpan dalam format *stereo Lithography* (STL) agar dapat diproses di *Software Slicing Ultimake Cura*.

Panjang : 25 mm
Lebar : 15 mm
Tinggi : 7mm

6. Pilot Study

Pilot *study* dilakukan untuk mendapatkan dua nilai level dari masing-masing faktor yang akan digunakan dalam metode 2^K *factorial design*. Pilot *study* dilakukan dengan cara mengatur level faktor, sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.3. Kemudian dilakukan proses pencetakan spesimen, diikuti dengan pengukuran dimensi dan kekerasan permukaan

Penentuan level faktor *exposure time* diperoleh dengan eksperimen dengan mengatur nilai *exposure time* 1s, 3s, 5s, 7s, dan 9s. Penentuan level faktor *layer thicknes* diperoleh dengan eksperimen dengan mengatur nilai *layer thicknes* 0,025mm; 0,035mm; 0,055mm; 0,065mm; dan 0,075mm. Penentuan level faktor diperoleh dengan eksperimen dengan mengatur nilai parameter *bottom exposure layer* 1 layer, 3 layer, 5 layer, 8 layer, dan 10 layer.

Hasil cetak yang paling mendekati bentuk desain spesimen dengan ukuran yang telah ditentukan serta nilai kekerasan permukaan tertinggi dipilih sebagai parameter acuan. Dua level parameter tersebut diambil dari lima level yang diuji dalam eksperimen.

Tabel 3. 2 Pilot Study

Faktor	Level					Reference
	1	2	3	4	5	
<i>Exposure Time</i>	1	3	5	7	9	(Ibrahim <i>et al.</i> , 2017) dan (Prabhakaran <i>et al.</i> , 2024)
<i>Layer Thickness</i>	0,025	0,035	0,055	0,065	0,075	(Wajdi & Saad, 2023) dan (Zoltan <i>et al.</i> , 2023)
<i>Bottom Exposure Layer</i>	1	3	5	8	10	(Sandi <i>et al.</i> , 2022a) dan (Seprianto <i>et al.</i> , 2021)

Berikut merupakan hasil dari pilot *study* yang mendapatkan dua level dari masing-masing faktor (tabel 3.3)

Tabel 3. 3 Nilai Faktor dan Level 2^k Factorial Design

Faktor	Level		Satuan
	+	-	
<i>Layer Thickness</i>	0.055	0,025	(s)
<i>Exposure Time</i>	7	5	(mm)
<i>Bottom Exposure Layer</i>	5	1	(layer)

7. Perancangan *Design of Experiment* (DoE)

Tahap ini dilakukan penentuan nilai faktor dan level pencetakan berdasarkan hasil pilot *study*, yang kemudian digunakan untuk menyusun tabel desain *experiment* dengan metode 2^k *factorial design*. Pembuatan tabel desain *experiment* menggunakan software Minitab dengan 3 faktor dan 2 level. Setiap kombinasi dilakukan sebanyak 3 kali replikasi, pemilihan jumlah 3 replikasi merupakan standar umum yang direkomendasikan dalam desain eksperimen, selain itu penggunaan 3 kali replikasi dipilih untuk mempertimbangkan efisiensi dari segi waktu dan sumber dana. Sehingga total spesimen yang dicetak sebanyak 24 spesimen. Rancangan hasil eksperimen dalam bentuk *coded unit* dari hasil pilot *study* dengan 3 parameter dan 2 level (tabel 3.4):

Tabel 3. 4 Rancangan Desain Eksperimen

Run Time	LT	ET	BEL	Layer Thickness (mm)	Exposure Time (s)	Bottom Exposure Layer (mm)
1	-	-	-	0,025	5	1
2	+	-	-	0,055	5	1
3	-	+	-	0.025	7	1
4	+	+	-	0.055	7	1
5	-	-	+	0,025	5	5
6	+	-	+	0,055	5	5
7	-	+	+	0.025	7	5
8	+	+	+	0.055	7	5
9	-	-	-	0,025	5	1
10	+	-	-	0,055	5	1
11	-	+	-	0.025	7	1
12	+	+	-	0.055	7	1
13	-	-	+	0,025	5	5
14	+	-	+	0,055	5	5
15	-	+	+	0.025	7	5
16	+	+	+	0.055	7	5
17	-	-	-	0,025	5	1

Run Time	LT	ET	BEL	Layer Thickness (mm)	Exposure Time (s)	Bottom Exposure Layer (mm)
18	+	-	-	0,055	5	1
19	-	+	-	0.025	7	1
20	+	+	-	0.055	7	1
21	-	-	+	0,025	5	5
22	+	-	+	0,055	5	5
23	-	+	+	0.025	7	5
24	+	+	+	0.055	7	5

8. Proses Cetak

a. Proses slicing

Pada tahap proses slicing menggunakan *software halot-box*. Tahap-tahap slicing spesimen yaitu:

- Memasukkan *file* desain spesimen dengan format (STL) format into *sowftware slicing ultimake* Cure untuk mengatur faktor-faktor dan level proses cetak mesin 3D *printer* berdasarkan pembuatan DoE.
- Hasil file dari proses *slicing* disimpan dalam G-code (.gcode) untuk diproses mesin 3D *printer*.
- Menyalin file hasil dari proses slicing berbentuk G-code ke *flash drives*.

b. Persiapan Mesin

- Melepaskan wadah resin pada mesin 3D *printer* dengan melepaskan pengait masing-masing sisinya.
- Mengendurkan *platform bulid* dengan kunci L sehingga dapat disesuaikan.

c. Pengaturan Awal Mesin

- Menghubungkan kabel daya ke stopkontak listrik, kemudian menghidupkan mesin 3D *printer* dengan menekan tombol power, hingga mesin sudah siap.
- Membuka menu *axis move* kemudian memilih *leveling* untuk menurunkan *platform bulid* hingga dasar, guna mensejajarkan sisi-sisi setiap *platform bulid*.
- Setelah *platform bulid* telah berada di posisi dasar, mengencangkan kembali *plafrom bulid* dengan menggunakan kunci L.

d. Persiapan Wadah Resin

- Mengatur menu *leveling* kembali untuk mengangkat *platform bulid* ke posisi awal atau atas.
- Memasang wadah resin kembali ke mesin 3D *printer* dengan posisi yang tepat.

e. *Claning* Mesin

Melakukan proses *claning* melalui menu pengaturan pada mesin, kemudian menunggu sampai lampu sinar UV pada mesin padam sebagai pertanda proses pembersihan telah selesai.

f. Pengisian Resin

Menuangkan resin ke dalam wadah resin pada mesin 3D *printer*.

g. Memuat Berkas Spesimen

- Memasukkan *flash drives* yang terdapat berkas spesimen ke port tersedia pada mesin.
- Membuka berkas 3D *printer* yang akan dicetak melalui layar sentuh mesin pada menu *setting*, kemudian *print setting*.

h. Proses Pencetakan

- Membuka proses pencetakan dengan menjalankan berkas desain yang telah dipilih. *Platform build* akan turun ke dalam wadah resin dan mencetak lapisan per lapisan.
- Menunggu hingga proses pencetakan selesai, yang dapat dilihat dengan naiknya *build platform* dari dalam wadah resin.

i. Pelepasan Spesimen

- Melepaskan *platform bulid* mesin dengan kunci L.
- Mengangkat spesimen dari *build platform* dengan *wall scaper* atau spatula secara hati-hati untuk mencegah kerusakan spesimen.

j. Pembersihan Spesimen

- Spesimen dibersihkan dengan mesin *Cureality UW-03* untuk menghilangkan sisa resin yang tidak mengeras.
- Memberikan wadah berisi *isopropyl alcohol* sebagai bahan pembersih.

k. Curing pesimen

- Memperkuat dan menyempurnakan spesimen dengan mesin *Cureality* UW-03 dengan waktu yang sudah ditentukan.

1. Identitas Spesimen

- Memberi tanda setiap spesimen yang telah dicetak sesuai nilai parameter yang dicetak.
- Melakukan proses tersebut hingga spesimen uji dicetak semua.

9. Pengukuran Dimensi

Spesimen yang telah dicetak akan dilakukan dua perlakuan, yaitu pengukuran error dimensi dan uji kekerasan permukaan. Pengukuran error dimensi dilakukan menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,02mm. Dimensi yang diukur pada spesimen meliputi panjang x_1 , lebar x_2 , dan tinggi x_3 .

10. Pengujian Kekerasan Permukaan

Uji kekerasan permukaan dilakukan menggunakan alat durometer tipe D sesuai dengan standar ASTM D2240. Pengukuran kekerasan permukaan dilakukan tiga titik spesimen, dimana untuk memperoleh spesimen yang memiliki nilai kekerasan permukaan yang tinggi. Tahap ini, dilakukan terlebih dahulu pengukuran dimensi kemudian dilanjutkan dengan pengujian kekerasan permukaan, agar spesimen yang diukur dimensinya tidak mengalami kerusakan.

11. Pengolahan Data

Penggunaan metode 2^k *Factorial Design* bertujuan untuk mengetahui faktor mana yang memberikan pengaruh yang paling signifikan terhadap respon.

a. Uji Distribusi Normal

Uji distribusi normal dilakukan dengan melihat grafik *normal probability plot* hasil dari *software* Minitab. Grafik *normal probability* digunakan untuk memverifikasi asumsi bahwa residual terdistribusi secara normal.

b. Pengolahan Anova

Dilakukan uji hipotesisi terhadap kedua jenis efek tersebut untuk menentukan signifikansi statistik dari efek-efek tersebut. Statistik yang digunakan untuk melakukan uji hipotesis adalah *Analysis of variance* (ANOVA).

ANOVA dilakukan untuk setiap efek utama dan efek interaksi antar faktor. Hipotesis H_0 menunjukkan bahwa tidak adanya pengaruh efek utama x_1, x_2, x_3 terhadap model dan juga tidak ada pengaruh efek interaksi antar faktor x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 dan $x_1x_2x_3$ terhadap model. Hipotesis H_0 akan ditolak apabila nilai $P\text{-value} < \alpha=0,05$. Respon *error* dimensi dan respon kekerasan permukaan untuk mengetahui variabel yang paling berpengaruh terhadap respon tersebut.

c. Pembangunan Model Regresi

Model regresi yang dibangun hanya mempertimbangkan efek faktor yang berpengaruh apabila signifikan terhadap respon. Analisis regresi dibantu dengan Minitab 16.

Nilai koefisien variabel bebas yang bernilai positif jika satu satuan, maka variabel respon akan naik sebesar nilai koefisien variabel bebas. Untuk nilai koefisien variabel bebas yang bernilai negatif jika naik satu satuan, maka variabel respon akan turun sebesar nilai koefisien variabel bebas.

Setelah diketahui hubungan antar faktor dan variabel bebas dengan respon, langkah selanjutnya adalah mencari nilai koefisien determinasi atau R^2 (*R-square*) untuk setiap variabel respon. Nilai *R-square* digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variabel bebas atau faktor terhadap variabel respon. Semakin rendah *R-square*, semakin sedikit variabel yang dijelaskan oleh model terhadap respon. Semakin tinggi nilai *R-square* menunjukkan bahwa model relatif baik dalam menjelaskan variasi terhadap respon berdasarkan faktor atau interaksi yang digunakan

d. Penentuan Parameter Respon Optimal

Optimasi parameter dilakukan bertujuan untuk memperoleh setting parameter optimal pada mesin *Digital Light Processing* (DLP) sehingga dapat menghasilkan nilai respon yang optimal. Optimasi dilakukan terhadap dua respon, yaitu error dimensi, kekerasan permukaan, dan kombinasi kedua respon. Penentuan titik optimasi dilakukan dengan menggunakan *response optimizer* pada *software* minitab yang kemudian memberikan nilai parameter optimal beserta nilai prediksi responnya.

e. Uji Konfirmasi

Uji konfirmasi parameter optimasi melakukan percetakan ulang dengan spesimen parameter yang optimal, setelah itu dilakukan pengukuran dan pengujian kekerasan permukaan. Kemudian dibandingkan dengan rata-rata hasil DoE.

12. Kesimpulan dan Saran

Tahapan ini membuat kesimpulan yang menjawab tujuan dan memberikan saran.