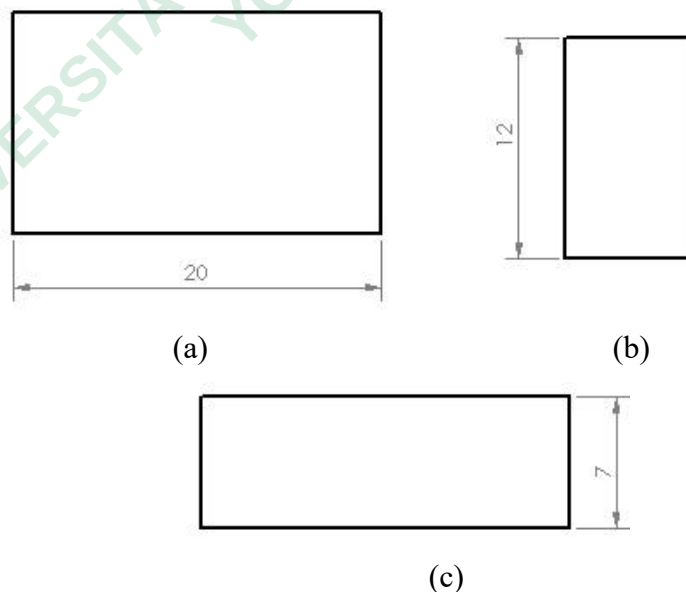


BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

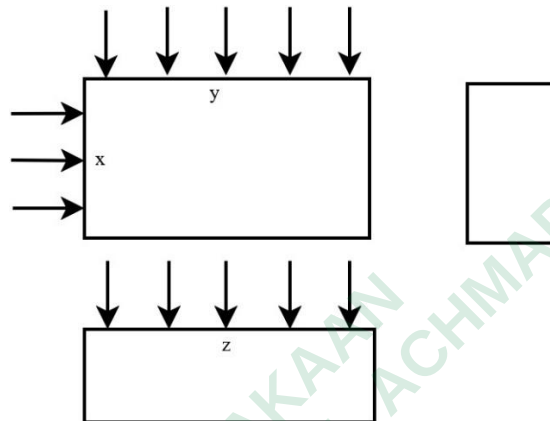
3.1 Objek Penelitian

Objek pada penelitian ini adalah spesimen 3D *printing* berbentuk balok dengan dimensi 20 mm x 12 mm x 7 mm menggunakan standar ASTM-D2240 yang ditunjukkan pada gambar 3.1 dan akan dicetak menggunakan mesin 3D *printing* FDM Ender-3 dengan spesifikasi ukuran cetak 220x220x250 mm. Material yang digunakan adalah *Polyvinyl Butyral* (PVB) berdiameter 1.75 mm. Material PVB dipilih karena memiliki sifat transparansi tinggi, fleksibilitas, dan kemampuan adhesi yang baik, sehingga potensial untuk aplikasi produk dengan kebutuhan estetika dan fungsional yang tinggi. Penelitian ini berfokus pada optimasi parameter proses cetak terhadap akurasi dimensi, seperti *nozzle temperature* (°C), *layer height* (mm), *infill density* (%), dan *print speed* (mm/s) untuk memaksimalkan kualitas hasil cetakan. Metode taguch merupakan metode yang digunakan untuk menentukan rancangan penelitian dan menganalisis pengaruh parameter proses terhadap respon.



Gambar 3.1 Bentuk spesimen 3D *printng* FDM (a) tampak depan, (b) tampak samping, dan (c) tampak atas

Pengukuran spesimen 3D *printing* dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dimensi spesimen hasil cetak. Pengukuran dimensi dilakukan menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,02 mm. Dimensi yang diukur adalah dimensi x dengan 5 titik pengukuran, dimensi y dengan 3 titik pengukuran, dan dimensi z dengan 5 titik pengukuran (gambar 3.2).



Gambar 3.2 Titik Pengukuran Dimensi Spesimen

3.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa variabel yaitu :

1. Variabel Respon

Variabel respon ialah variabel yang perubahannya dapat dipengaruhi oleh variabel-variabel lain. Variabel respon yang diteliti pada penelitian ini ialah akurasi dimensi.

2. Variabel bebas (faktor)

Variabel bebas atau faktor adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel-variabel lainnya. Pemilihan faktor penelitian dilakukan berdasarkan hasil studi literatur untuk faktor yang perubahan nilainya dapat mempengaruhi hasil akurasi dimensi dan memiliki karakteristik material yang hampir mirip dengan material PVB. Pada penelitian ini variabel bebas yang dipilih untuk eksperimen ialah *nozzle temperature* ($^{\circ}\text{C}$), *layer height* (mm), *infill density* (%), dan *print speed* (mm/s).

3. Variabel gangguan (*noise*)

Variabel gangguan (*noise*) merupakan variabel yang dapat menyebabkan terjadinya variabilitas pada produk. *Noise* yang bisa menyebabkan variabilitas pada produk saat proses 3D *printing* ialah suhu, kelembaban, dan karakteristik material seperti karakteristik memuai dan menyusut yang dapat mempengaruhi variabilitas pada keakuratan dimensi rancangan dengan dimensi hasil cetak.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

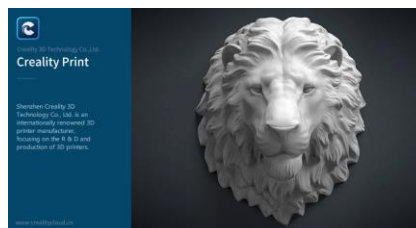
Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Laptop dengan spesifikasi prosesor Intel Core i3 merek Lenovo V14-IIL. Laptop digunakan untuk mendesain objek cetak 3D dan menjalankan *software* yang diperlukan dalam penelitian ini.



Gambar 3.3 Laptop

2. *Solidworks* merupakan *software* yang digunakan untuk mendesain objek 3D sebagai bahan input untuk di *software slicer*.
3. *Creality Slicer* adalah *software slicer* yang dirancang khusus untuk pengguna *printer* 3D *Creality* dan berfungsi mengubah model 3D menjadi instruksi yang dapat dibaca oleh *printer* 3D, seperti G-code.



Gambar 3.4 Creality Print

4. *Minitab 17 statistical software* merupakan *software* analisis statistik yang digunakan untuk analisis data dan mengelola data pada penelitian ini.
5. Mesin 3D Printer FDM yang digunakan merupakan Ender-3 dengan spesifikasi ukuran cetak 220x220x250 mm, suhu *bad* bisa mencapai 110°C dan suhu *nozzle temperature* bisa mencapai 255°C. Mesin 3D *Printer* FDM digunakan untuk mencetak objek penelitian.



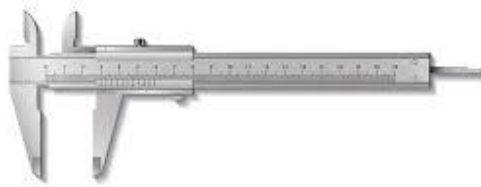
Gambar 3.5 Mesin 3D *Printer* Ender-3

6. Filamen PVB dengan diameter 1,75 mm merupakan bahan cetak 3D *Printer* FDM yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.6 Filamen PVB

7. Jangka sorong dengan spesifikasi ketelitian 0.02 mm yang digunakan untuk mengukur objek atau spesimen penelitian.



Gambar 3.7 Jangka Sorong

8. MicroSD digunakan untuk menyimpan file spesimen dalam format G.Code.



Gambar 3.8 MicroSD

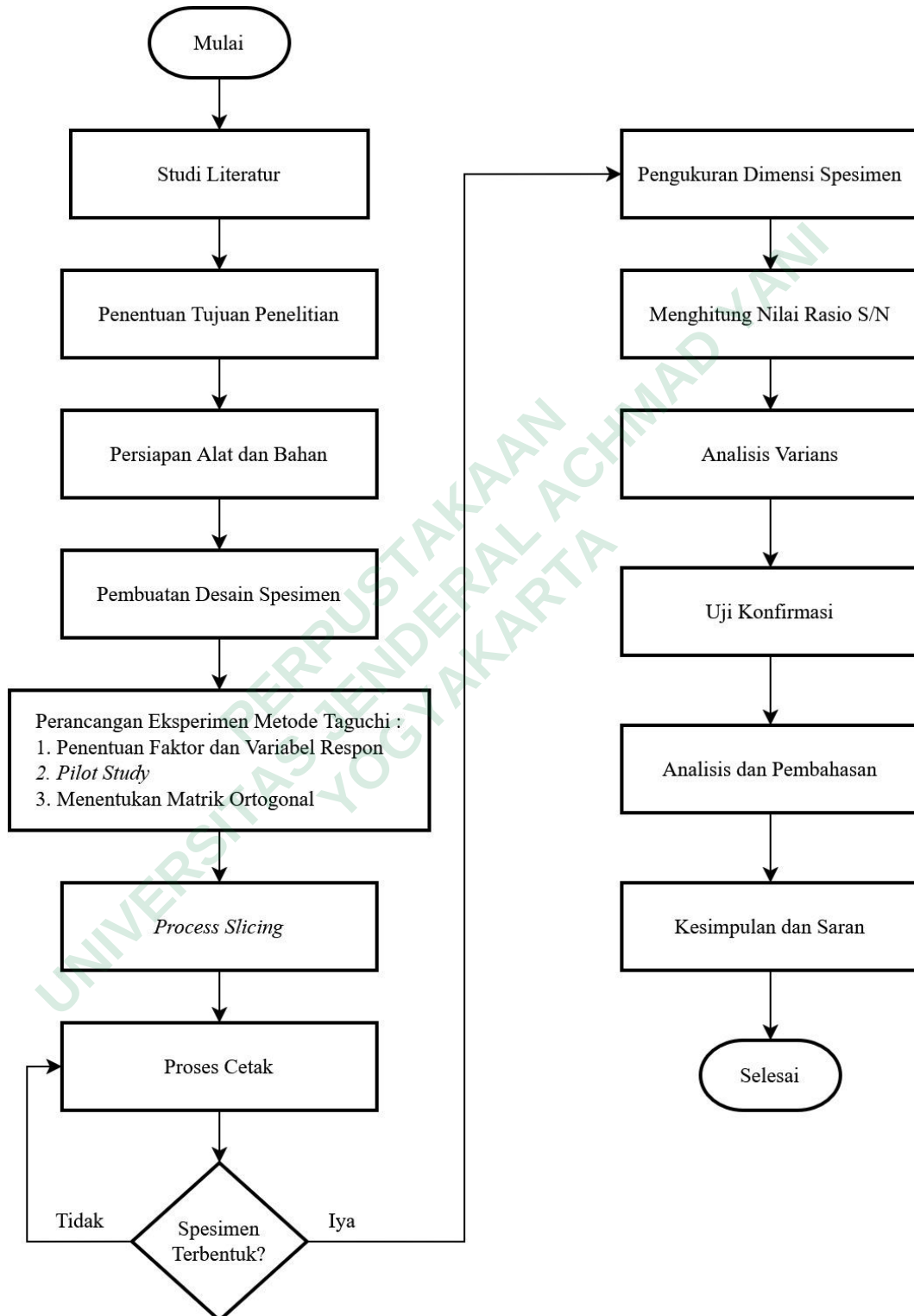
9. wall scraper digunakan untuk mengambil spesimen pada *bed printer*.



Gambar 3.9 wall scraper

3.4 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian ini, ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut :



Gambar 3.8 Tahapan Penelitian

Adapun uraian langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan informasi dan referensi dari berbagai sumber seperti buku, jurnal dan artikel yang digunakan untuk menunjang penelitian. Tujuannya adalah untuk menambah pemahaman terkait konteks penelitian, menemukan teori yang relevan dan mengidentifikasi *gap* dari penelitian sebelumnya yang dapat menjadi acuan.

2. Penentuan Tujuan Penelitian

Penentuan tujuan penelitian dilakukan untuk menetapkan fokus penelitian yang ingin dicapai berdasarkan rumusan masalah, sehingga penelitian dapat dilakukan secara terstruktur dan tidak menyimpang dari topik yang telah ditentukan.

3. Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum melakukan ekeperimen semua alat dan bahan yang diperlukan harus disiapkan terlebih dahulu untuk memastikan kelancaran penelitian. Hal ini termasuk memastikan bahwa semua peralatan berfungsi dengan baik dan bahan yang digunakan memenuhi spesifikasi yang diperlukan, sehingga penelitian dapat berjalan sesuai rencana.

4. Pembuatan Desain Objek Penelitian

Pembuatan desain objek penelitian dibuat menggunakan *software Solidworks*. Berbentuk balok dengan dimensi 20 mm x 12 mm x 7 mm dan file desain disimpan dalam format *StereoLithography* (STL) agar dapat diproses pada *software Creality Slicer*.

5. Perancangan Eksperimen dengan Metode Taguchi

a. Penentuan Faktor dan Variabel Respon

Pada penelitian ini penentuan faktor dan variabel respon merupakan hal yang penting dilakukan pada metode taguchi. Variabel respon yang diteliti pada penelitian ini adalah akurasi dimensi. Penentuan jumlah faktor (parameter proses) dipilih berdasarkan hasil studi literatur. Faktor yang digunakan seperti *nozzle temperature* (°C) didapatkan dari penelitian (Martiček et al., 2024) dengan menggunakan material yang sama yaitu material PVB, faktor *layer*

height (mm) didapatkan pada penelitian yang dilakukan oleh (Arifin et al., 2021) menggunakan material PLA+ untuk optimasi proses 3d *printing* dengan respon efek penyusutan, faktor *infill density* (%) diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh (Latif et al., 2024) menggunakan material TPU yang memiliki sifat fleksibilitas, dan *print speed* (mm/s) didapatkan pada penelitian (Pamasaria et al., 2019) menggunakan material PLA yang memiliki kemiripan dengan material PVB. Sedangkan, nilai level pada setiap faktor didapatkan berdasarkan hasil *pilot study* pada parameter proses *nozzle temperature* (°C), *layer height* (mm), *infill density* (%), dan *print speed* (mm/s).

Tabel 3.1 Faktor dan Respon

Faktor	Keterangan	Penentuan Nilai Level	Respon
NT	<i>Nozzle Temperature</i>	<i>Pilot Study</i>	Akurasi Dimensi
LH	<i>Layer Height</i>	<i>Pilot Study</i>	Akurasi Dimensi
ID	<i>Infill Density</i>	<i>Pilot Study</i>	Akurasi Dimensi
PS	<i>Print Speed</i>	<i>Pilot Study</i>	Akurasi Dimensi

b. Pilot Study

Pilot study dilakukan untuk mendapatkan 3 nilai level pada setiap faktor (parameter) yang akan digunakan untuk menyusun DOE metode taguchi. Pemilihan nilai level berdasarkan hasil studi literatur pada jurnal penelitian yang relevan. Penentuan nilai level untuk *pilot study* dilakukan dengan cara eksperimen terhadap beberapa nilai level (Tabel 3.2). Nilai tersebut diperoleh dari hasil studi literatur pada jurnal penelitian yang menggunakan material dengan karakteristik hampir sama dengan material PVB. Pada parameter atau faktor *nozzle temperature* dilakukan eksperimen dengan mengatur nilai level 185°C, 190°C, 195°C, 200°C, dan 205°C. Faktor *layer height* dilakukan eksperimen dengan mengatur nilai level 0.10 mm, 0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm, dan 0.30 mm. *Infill density* dilakukan eksperimen dengan mengatur nilai level 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%. Sedangkan pada faktor *print speed* dilakukan eksperimen dengan nilai level 30 mm/s, 35 mm/s, 40 mm/s, 45 mm/s, dan 50 mm/s. *Pilot study* pada penelitian ini dilakukan dengan mengubah nilai salah satu parameter proses sesuai dengan Tabel 3.2 dan parameter lainnya adalah parameter konstan.

Tabel 3.2 Faktor dan Nilai Level *Pilot Study*

Faktor	Level				
	1	2	3	4	5
<i>Nozzle Temperature</i> (°C)	185	190	195	200	205
<i>Layer Height</i> (mm)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
<i>Infill Density</i> (%)	60	70	80	90	100
<i>Print Speed</i> (mm/s)	30	35	40	45	50

Parameter konstan yang digunakan didapatkan dari penelitian (Jackson et al., 2022) yang memiliki fokus penelitian untuk menemukan kondisi pencetakan yang optimal pada 3D *printing* FDM menggunakan material PLA. Adapun parameter konstan yang digunakan adalah sebagai berikut :

Tabel 3.3 Parameter Konstan

<i>Print Setting</i>	<i>Constant Print Setting</i>
<i>Bed Temperature</i>	60°C
<i>layer height</i>	0.10 mm
<i>Nozzle Temperature</i>	215°C
<i>Infill Density</i>	100%
<i>Print Speed</i>	70 mm/s

Sumber : Jackson et al. (2022)

Berdasarkan hasil *pilot study* pada *nozzle temperature* hasil cetak *pilot study* yang mendekati bentuk spesimen atau tidak mengalami cacat yaitu pada nilai *nozzle temperature* 195°C, 200°C, dan 205°C. Hasil cetak *pilot study* pada *layer height* yang mendekati bentuk spesimen yaitu pada nilai *layer height* 0.10 mm, 0.15 mm dan 0.20 mm. Pada *infill density* hasil *pilot study* yang mendekati bentuk desain spesimen yaitu pada nilai *infill density* 60%, 80%, dan 100%. Sedangkan hasil cetak *pilot study* dengan mengatur ulang nilai parameter proses *print speed* mendapatkan nilai *print speed* 30 mm/s, 35 mm/s dan 50 mm/s. Berikut adalah tabel faktor dan level.

Tabel 3.4 Faktor dan Level Eksperimen

Faktor	Level		
	1	2	3
<i>Nozzle Temperature</i> (°C)	195°C	200°C	205°C
<i>Layer Height</i> (mm)	0.10 mm	0.15 mm	0.20 mm
<i>Infill Density</i> (%)	60%	80%	100%
<i>Print Speed</i> (mm/s)	30 mm/s	35 mm/s	50 mm/s

c. Menentukan Matriks Orthogonal

Setelah faktor dan nilai level sudah ditentukan berdasarkan hasil *pilot study*, langkah selanjutnya ialah menentukan atau memilih matriks orthogonal. Pemilihan matriks orthogonal ditentukan berdasarkan total derajat kebebasan dalam eksperimen untuk menetapkan jumlah minimum eksperimen yang harus dilakukan. Adapun total derajat kebebasan pada penelitian ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Total Derajat Kebebasan

No	Faktor	Jumlah Level	Derajat kebebasan
1.	<i>Nozzle Temperature</i>	3	2
2.	<i>Layer Height</i>	3	2
3.	<i>Infill Density</i>	3	2
4.	<i>Print Speed</i>	3	2
Total			8

Berdasarkan total derajat kebebasan minimum jumlah eksperimen pada penelitian ini ialah 8, oleh karena itu penelitian ini memilih matriks $L_9(3^4)$ yang memiliki 9 baris eksperimen, 4 faktor dengan 3 level pada setiap faktor dan dilakukan 3 kali replikasi. Tiga kali replikasi dipilih dengan pertimbangan tenaga, biaya, waktu dan jumlah replikasi sudah cukup berdasarkan syarat uji statistik (*degrees of freedom*) pada masing-masing faktor. Tabel 3.5 menunjukkan DOE $L_9(3^4)$ yang dibuat menggunakan *software* minitab 17.

Tabel 3.5 Desain of Eksperimen $L_9(3^4)$

Eks.	NT	LH	ID	PS	NT	LH	ID	PS
1	1	1	1	1	195°C	0.10 mm	60%	30 mm/s
2	1	2	3	2	195°C	0.15 mm	80%	35 mm/s
3	1	3	3	3	195°C	0.20 mm	100%	50 mm/s
4	2	1	2	3	200°C	0.10 mm	80%	50 mm/s
5	2	2	3	1	200°C	0.15 mm	100%	30 mm/s
6	2	3	1	2	200°C	0.20 mm	60%	35 mm/s
7	3	1	3	2	205°C	0.10 mm	100%	35 mm/s
8	3	2	1	3	205°C	0.15 mm	60%	50 mm/s
9	3	3	2	1	205°C	0.20 mm	80%	30 mm/s

6. Proses *Slicing*

Proses *slicing* dilakukan untuk mengubah model 3D menjadi lapisan-lapisan yang dapat dipahami oleh mesin 3D printer. Adapun langkah-langkah proses *slicing* menggunakan *Creality Slicer* adalah sebagai berikut:

- a. Memasukan file desain objek penelitian dalam format STL ke software *Creality Slice*
- b. Memilih jenis material dan mengatur faktor (parameter proses) serta nilai level berdasarkan hasil DOE.
- c. Menyimpan file hasil proses *slicing* dalam bentuk G-code (.gcode) agar dapat dibaca mesin 3D printer.
- d. Memindahkan file hasil proses *slicing* dalam bentuk G-code (.gcode) ke MicroSD.

7. Proses Cetak

Setelah proses *slicing* desain model 3D tahap selanjutnya adalah proses cetak desain 3D menggunakan mesin 3D *Printing* FDM. Adapun langkah-langkahnya ialah sebagai berikut :

- a. Pemasangan filamen PVB pada mesin dan di dorong kedalam *extruder*.
- b. Masukan MicroSD yang terdapat file desain 3D hasil proses *slicing*.
- c. Nyalakan mesin 3D *printer* kemudian melakukan kalibrasi mesin untuk kelancaran proses cetak.
- d. Memilih file yang akan di *print* melalui LCD *Controller* pada mesin 3D *Printer*, kemudian klik '*Print*'.
- e. Proses cetak desain 3D oleh mesin yang dimulai dengan *nozzle* dan *bed* berada pada posisi awal, dan kemudian akan otomatis menyesuaikan dengan settingan parameter sesuai dengan nilai hasil proses *slicing*.
- f. Setelah proses cetak selesai, lepaskan objek atau spesimen dari *bed* menggunakan alat bantu kemudian bersihkan spesimen dari sisa filamen.
- g. Memberikan tanda atau label penomoran pada setiap filamen sesuai dengan urutan proses berdasarkan DoE.
- h. Melakukan proses cetak sampai semua spesimen uji yang ditentukan sudah tercetak.

8. Pengukuran Dimensi Spesimen

Spesimen yang telah dicetak, kemudian dilakukan pengukuran dimensi dengan cara mengukur menggunakan jangka sorong dan mencatat nilai akurasi dimensi x, dimensi y, dan dimensi z pada setiap spesimen berdasarkan tabel DOE (tabel 3.5) dan diukur sesuai dengan titik pengukuran dimensi yang telah ditentukan (gambar 3.2). Hasil pengukuran dari 3 replikasi kemudian di rata-rata.

9. Menghitung Nilai Rasio S/N

Setelah mendapatkan data hasil pengukuran pada masing-masing dimensi x, y, dan z, hal selanjutnya ialah melakukan pengolahan data dengan metode taguchi menggunakan *software* minitab 17. Analisis data dengan metode taguchi pada minitab 17 dilakukan menggunakan nilai rasio S/N dengan karakteristik rasio S/N *nominal the best*, karena tujuan penelitian ini ialah untuk menghasilkan nilai parameter proses optimal yang mampu mendekati nilai akurasi dimensi yang telah ditentukan.

10. Analisis Varians

Hasil dari analisis rasio S/N pada tahap sebelumnya didapatkan nilai level optimal dari empat faktor yang digunakan pada eksperimen. Tujuan lain dari penelitian adalah mengetahui secara statistik besar kontribusi parameter proses (faktor) yang paling berpengaruh secara signifikan terhadap respon. Oleh karena itu, dilakukan analisis varians atau ANOVA untuk mengetahui besar kontribusi masing-masing parameter proses. Analisis varians pada penelitian ini dilakukan menggunakan *software* minitab 17. Untuk membuktikan bahwa ada pengaruh faktor dalam eksperimen yang dibuktikan dengan uji hipotesis F. Tingkat signifikansi α yang digunakan pada penelitian ini adalah 5% atau 0,05 dengan tingkat kepercayaan 95% dan tingkat kesalahan 5%. Adapun hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut :

Tabel 3.6 Tabel Uji Hipotesis F

No.	Kriteria Uji	Hipotesis
1.	$F_{Hitung} < F_{Tabel}$ atau jika nilai $P-value > \alpha$.	H_0 diterima dan H_1 ditolak
2.	$F_{Hitung} > F_{Tabel}$ atau jika nilai $P-value < \alpha$.	H_0 ditolak dan H_1 diterima

Adapun kriteria uji F yang digunakan yaitu:

- Jika nilai F_{Hitung} lebih kecil dari nilai F_{Tabel} ($F_{\text{Hitung}} < F_{\text{Tabel}}$) atau jika nilai $P\text{-value} > \alpha$, maka hipotesis H_0 diterima dan H_1 ditolak yang berarti tidak ada pengaruh dari faktor.
- jika nilai F_{Hitung} lebih besar dari nilai F_{Tabel} ($F_{\text{Hitung}} > F_{\text{Tabel}}$) atau jika nilai $P\text{-value} < \alpha$, maka hipotesis H_0 ditolak dan H_1 diterima yang berarti ada pengaruh dari faktor.

11. Uji Konfirmasi

Uji konfirmasi dilakukan setelah mendapatkan hasil nilai prediksi parameter optimal. Uji konfirmasi dilakukan dengan cara mencetak spesimen sesuai dengan hasil penelitian yang direplikasi sebanyak tiga kali. Setelah spesimen untuk uji konfirmasi dicetak kemudian dilakukan pengukuran pada dimensi x, y, dan z. Hasil pengukuran dimensi spesimen uji konfirmasi dihitung *mean* dan nilai rasio S/N, kemudian dilakukan perbandingan dengan nilai prediksi *means* dan nilai prediksi rasio S/N untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil penelitian. Nilai prediksi *means* dan nilai prediksi rasio S/N akan dihitung dengan *software* minitab 17 menggunakan fitur *predict taguchi result* dengan mengatur parameter optimal pada dimensi x, y, dan z. Selain dibandingkan dengan nilai prediksi taguchi, uji konfirmasi pada penelitian ini juga melakukan perbandingan nilai hasil konfirmasi dengan dimensi *design* penelitian untuk mengetahui seberapa akurat optimasi hasil penelitian.

12. Analisis dan Pembahasan

Melakukan analisis dan pembahasan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan.

13. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini, peneliti menarik kesimpulan untuk menjawab tujuan penelitian yang telah ditentukan, serta memberikan saran yang dapat menjadi masukan bagi peneliti berikutnya.