

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Hasil Pengujian Material

Pengujian material bertujuan untuk mendapatkan material yang optimal dalam proses pencetakan 3D *printing* LDM. Tahap awal dalam penelitian ini adalah menentukan perbandingan antara tanah liat dengan aquades sehingga didapatkan kombinasi material yang tercampur secara merata (homogen) dan siap untuk dicetak. Tanah liat yang digunakan, telah melalui proses pengeringan terkontrol untuk menghilangkan kadar air awal. Setelah proses pengeringan, tahapan selanjutnya yaitu perhitungan kadar air residu guna memastikan bahwa tanah liat setelah proses pengeringan telah mencapai tingkat kekeringan yang diinginkan. Hasil perhitungan kadar air residu tanah liat setelah proses pengeringan adalah sebagai berikut.

$$\% \text{ Kadar Air} = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\% \text{ Kadar Air} = \frac{989 - 895}{989} \times 100\% \quad (4.2)$$

$$\text{Kadar Air} = 9,50\% \quad (4.3)$$

Berdasarkan hasil perhitungan, kadar air tanah liat setelah proses pengeringan adalah 9,50%. Merujuk pada klasifikasi kadar air pada Tabel 2.2, nilai tersebut termasuk dalam rentang 5 - 10%, yang dikategorikan sebagai kondisi kering. Dengan demikian, tanah liat tersebut memenuhi persyaratan kadar air yang dapat digunakan dalam proses pencetakan mesin 3D *printing* LDM. Tahapan selanjutnya adalah penentuan komposisi material cetak. Proses penentuan komposisi dilakukan secara bertahap untuk memperoleh formulasi material yang memenuhi kriteria *pumpability*, *buildability*, dan *extrudability* (Tabel 4.1).

Tabel 4. 1 Hasil Uji Komposisi Material

No.	Komposisi		Kondisi			Keterangan	Gambar
	Aquades (ml)	Tanah Liat (gram)	Pumpability	Extrudability	Buildability		
1	1	50	-	-	-	menghasilkan campuran yang tidak homogen	
2	25	100	-	-	-	menghasilkan campuran yang tidak homogen	
3	50	150	-	-	-	menghasilkan campuran yang tidak homogen	
4	75	200	-	-	-	menghasilkan campuran yang tidak homogen dan masih terdapat butiran-butiran tanah liat.	
5	100	250	✓	-	-	campuran dengan komposisi ini menunjukkan material yang homogen. material ini memiliki <i>pumpability</i> yang baik, tetapi tidak memenuhi <i>extrudability</i> , dan <i>buildability</i>	
6	125	300	✓	✓	✓	Memenuhi semua kriteria yaitu dapat didorong atau (<i>pumpability</i>), dapat diekstrusi (<i>extrudability</i>), dan dapat dibentuk (<i>buildability</i>).	
7	150	300	✓	✓	-	Campuran memiliki konsentrasi yang lebih cair dibandingkan dengan komposisi sebelumnya, sehingga pada saat di cetak terjadi perubahan bentuk atau deformasi dimensi	

Berdasarkan Tabel 4.1, pengujian berbagai rasio aquades terhadap tanah liat menunjukkan hasil sebagai berikut. Komposisi 1 ml aquades terhadap tanah liat 50 gram menghasilkan campuran yang tidak homogen. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah aquades sangat sedikit dibandingkan dengan tanah liat, sehingga pengujian *pumpability*, *extrudability*, dan *buildability* tidak dapat terpenuhi. Selanjutnya penambahan jumlah aquades menjadi 25 ml dengan 100 gram tanah liat juga menghasilkan campuran yang tidak homogen. Meskipun jumlah aquades meningkat, perbandingan tanah liat masih belum memenuhi untuk membentuk material yang stabil dan homogen. Campuran homogen baru tercapai pada komposisi 100 ml aquades dengan 250 gram tanah liat, yang menunjukkan kemampuan *pumpability*. Namun, material ini tidak memenuhi kriteria *extrudability* dan *buildability*. Komposisi tanah liat yang optimal terdapat pada 125 ml aquades dan 300 gram tanah liat. Komposisi tersebut menghasilkan material yang dapat di pompa (*pumpability*), dapat keluar melalui *nozzle* (*extrudability*) dan mampu mempertahankan bentuk lapisan yang ditumpuk tanpa mengalami deformasi berlebih (*buildability*). Komposisi material dengan 150 ml aquades dan 300 gram tanah liat menghasilkan kondisi yang terlalu cair, sehingga hanya memenuhi kriteria *pumpability* dan *extrudability*. Kriteria *buildability* tidak terpenuhi karena material tidak mampu mempertahankan bentuknya atau terjadi deformasi, deformasi pada tanah liat dapat berupa penyusutan dan pengembangan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa komposisi material yang optimal untuk penelitian ini adalah 125 ml aquades dan 300 gram tanah liat.

4.1.2 Analisis Geometri Model Eksperimen

Pengambilan data spesimen dilakukan setelah melakukan proses cetak berdasarkan data DoE menggunakan *Box Behnken* (Tabel 3.7). Berikut merupakan hasil cetak spesimen menggunakan 3D *printing* Tronxy Moore 1 dengan replikasi sebanyak 3 kali pada eksperimen (Gambar 4.1).



Gambar 4. 1 Hasil Cetak Spesimen

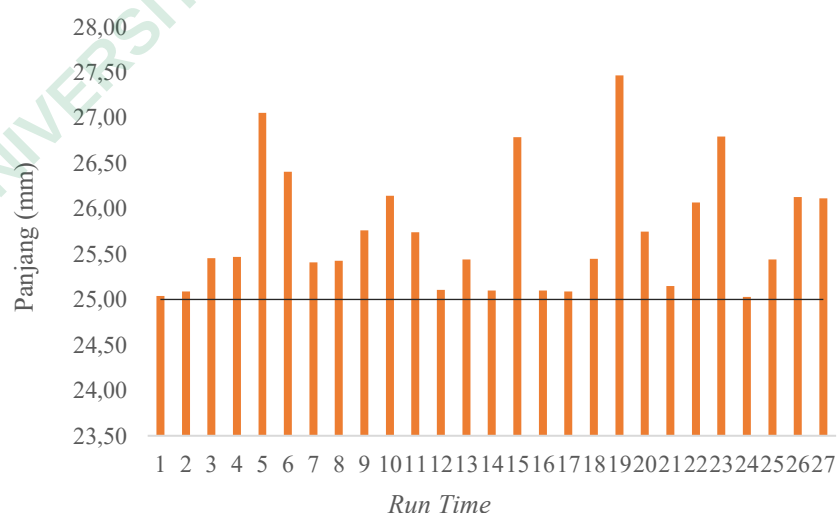
Spesimen yang telah dicetak kemudian diukur menggunakan jangka sorong. Hasil pengukuran ini digunakan untuk menghitung nilai rata-rata dari *error* dimensi. Berikut merupakan hasil rata-rata pengukuran dengan 3 titik pada x, 5 titik pada y dan 5 titik pada z (Tabel 4.2).

Tabel 4. 2 Hasil Uji Geometri Spesimen

Run Time	Rata-Rata		
	X	Y	Z
1	25,04	10,08	8,08
2	25,09	10,08	8,16
3	25,45	10,12	8,12
4	25,47	10,11	8,07
5	27,05	10,06	8,08
6	26,41	10,03	8,18
7	25,41	10,15	8,05
8	25,43	10,14	8,06
9	25,76	10,29	8,08
10	26,14	10,10	8,04
11	25,74	10,06	8,02
12	25,11	10,14	8,09
13	25,44	10,17	8,02
14	25,10	10,08	8,14

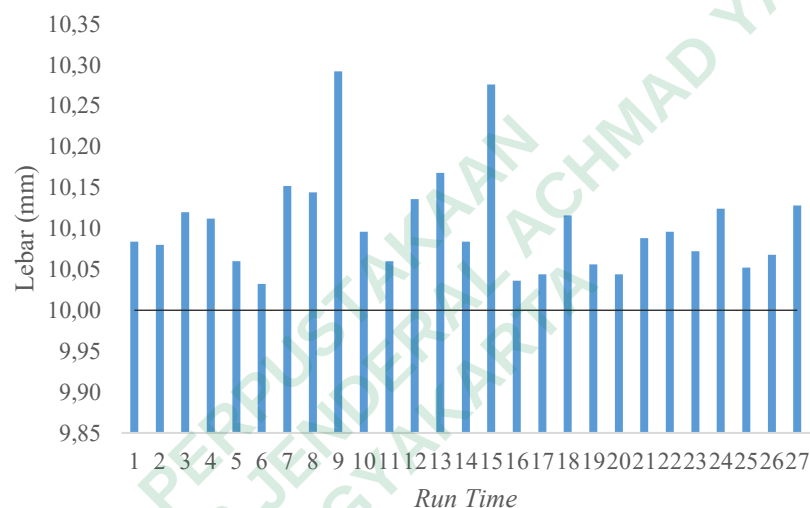
Run Time	Rata-Rata		
	X	Y	Z
15	26,79	10,28	8,04
16	25,10	10,04	8,05
17	25,09	10,04	8,10
18	25,45	10,12	8,10
19	27,47	10,06	8,13
20	25,75	10,04	8,12
21	25,15	10,09	8,04
22	26,07	10,10	8,12
23	26,79	10,07	8,10
24	25,03	10,12	8,06
25	25,44	10,05	8,12
26	26,13	10,07	8,10
27	26,11	10,13	8,03
Rata-Rata	25,74	10,10	8,09

Hasil pengukuran eksperimen secara keseluruhan memiliki rata-rata panjang 25,74 mm, lebar 10,10 mm, dan tinggi 8,09 mm. Rata-rata tersebut memiliki hasil yang melebihi dari nilai desain spesimen yang digunakan dengan ukuran panjang 25 mm, lebar 10 mm, dan tinggi 8 mm. Data di atas dapat disajikan dalam bentuk *bar chart* untuk melihat perbedaan dari hasil pengukuran masing-masing level parameter (Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4).



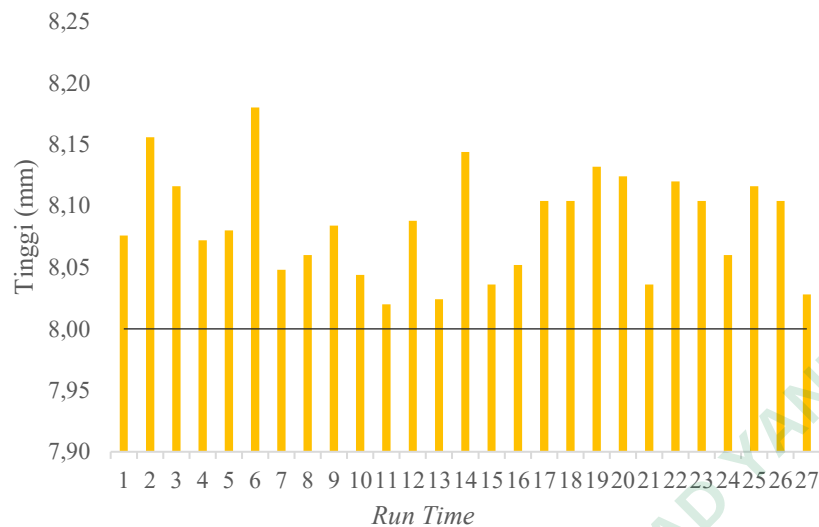
Gambar 4. 2 Bar Chart hasil pengukuran Panjang dari Setiap Run Time

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat disimpulkan bahwa terjadi perbedaan hasil pengukuran pada setiap spesimen. Perbedaan pengukuran dapat dilihat dari data pengukuran yang melebihi dimensi desain panjang yaitu 25 mm. Berdasarkan hasil pengukuran pada *run time* 4, 6, 14, 19, dan 23 menunjukkan panjang spesimen yang relatif tinggi melebihi ukuran desain, sementara pada *run time* 1, 2, 12, dan 16 menunjukkan panjang spesimen yang mendekati ukuran desain. Perbedaan pengukuran tersebut mengindikasikan adanya faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran, faktor tersebut bisa berupa faktor terkontrol dan faktor *noise*.



Gambar 4. 3 Bar Chart hasil pengukuran Lebar dari Setiap Run Time

Bar chart pada Gambar 4.3 menunjukkan hasil pengukuran lebar dari hasil spesimen hasil cetak pada masing-masing kombinasi parameter. Nilai lebar spesimen memiliki kisaran pengukuran antara 9,95 mm hingga 10,30 mm dengan rata-rata pengukuran yaitu 10,05 mm hingga 10,15 mm. Ukuran tersebut sudah mendekati ukuran dari desain spesimen yaitu 10 mm.



Gambar 4. 4 Bar Chart hasil pengukuran Tinggi dari Setiap Run Time

Berdasarkan Gambar 4.4 dapat disimpulkan adanya variabilitas hasil pengukuran dimensi tinggi dari spesimen hasil cetak. Beberapa nilai pengukuran yang relatif tinggi terdapat pada *run time* 3, 6, 14, dan 19. Pada *run time* 19 terjadi peningkatan dimensi tidak hanya pada tinggi spesimen, melainkan juga pada dimensi panjang, hal ini menunjukkan adanya pengaruh faktor independen yang dapat mempengaruhi akurasi dimensi secara keseluruhan.

Data hasil pengukuran spesimen kemudian diolah untuk menghitung nilai *error* atau selisih antara dimensi aktual hasil cetak dengan dimensi desain yang telah direncanakan. Perhitungan *error* dimensi ini dilakukan dengan cara mengurangkan nilai dimensi desain dari nilai dimensi aktual spesimen. Berikut hasil perhitungan *error* dimensi x, y, dan z (Tabel 4.3)

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan *Error* Dimensi

Run Time	Rata-Rata		
	X (%)	Y (%)	Z (%)
1	0,160	0,840	0,950
2	0,347	0,800	1,950
3	1,813	1,200	1,450
4	1,867	1,120	0,900
5	8,213	0,600	1,000
6	5,627	0,320	2,250
7	1,627	1,520	0,600
8	1,707	1,440	0,750

Run Time	Rata-Rata		
	X (%)	Y (%)	Z (%)
9	3,040	2,920	1,050
10	4,560	0,960	0,550
11	2,960	0,600	0,250
12	0,427	1,360	1,100
13	1,760	1,680	0,300
14	0,400	0,840	1,800
15	7,147	2,760	0,450
16	0,400	0,360	0,650
17	0,347	0,440	1,300
18	1,787	1,160	1,300
19	9,867	0,560	1,650
20	2,987	0,440	1,550
21	0,587	0,880	0,450
22	4,267	0,960	1,500
23	7,173	0,720	1,300
24	0,107	1,240	0,750
25	1,760	0,520	1,450
26	4,507	0,680	1,300
27	4,453	1,280	0,350
Rata-Rata	2,959	1,044	1,070

Berdasarkan hasil perhitungan *error* dimensi didapatkan rata-rata *error* dimensi untuk x adalah 2,959%, y 1,044%, dan z 1,070%. Hasil pengukuran menunjukkan nilai *error* yang melebihi ukuran dimensi desain CAD. Hal ini menunjukkan adanya deformasi yang terjadi antara satu lapisan dan lapisan berikutnya dalam kondisi basah. Rata-rata dari masing-masing *error* dimensi ini digunakan dalam analisis untuk membandingkan dengan hasil optimasi. Selain hasil pengukuran dilakukan juga proses pengambilan data suhu dan kelembapan menggunakan *4 in 1 environmental meter*. Hasil yang didapat berupa rata-rata selama proses cetak berlangsung (Tabel 4.4).

Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Suhu dan Kelembapan

Run Time	Rata-Rata	
	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)
1	28,77	77,7
2	28,83	79,1

Run Time	Rata-Rata	
	Suhu (°C)	Kelembapan (%RH)
3	27,47	83,9
4	27,40	83,8
5	27,80	82,1
6	28,00	80,8
7	27,37	82,4
8	28,03	79,7
9	27,23	82,6
10	28,17	82,9
11	29,17	81,9
12	31,63	77,7
13	29,53	82,4
14	28,60	79,2
15	28,17	82,4
16	27,93	77,3
17	29,23	78,4
18	28,37	75,1
19	28,27	79,5
20	27,90	79,1
21	28,03	76,3
22	28,30	78,4
23	27,60	79,5
24	27,77	77,7
25	28,97	76,3
26	29,10	75,9
27	28,00	78,0
Rata-Rata	28,36	79,64

Hasil pengukuran suhu dan kelembapan menunjukkan rata-rata untuk suhu 28,36°C dan rata-rata kelembapan 79,64%RH. Pengambilan data suhu dan kelembapan dilakukan selama proses *printing* dengan tiga kali pengambilan data. Hasil pengukuran kemudian akan dianalisis untuk melihat pengaruh terhadap kualitas material hasil cetak.

Setelah dicetak, spesimen diistirahatkan (*resting*) selama 3-4 jam yang bertujuan untuk mengurangi kadar air dan meningkatkan viskositas material sebelum proses pengeringan menggunakan oven. Proses pengeringan dilakukan pada suhu 120°C dalam waktu 30 menit untuk menghasilkan material yang kuat

sebelum dilakukan proses pengukuran dimensi hasil cetak. Pengaturan suhu ini didasarkan pada hasil studi pendahuluan pengeringan spesimen, di mana suhu awal 100°C - 110°C digunakan untuk menguapkan air, kemudian dipanaskan kembali pada suhu 120°C untuk mendapatkan kondisi kering yang optimal atau dapat disebut dengan kondisi *bone dry*.

4.2 Analisis Statistik

4.2.1 Penentuan Model Regresi Variabel Respons

Koefisien regresi digunakan untuk menyesuaikan model matematika dengan data eksperimen yang diperoleh. Secara matematis, koefisien merupakan nilai numerik yang mengalikan variabel dalam suatu persamaan. Berikut merupakan hasil dari masing-masing koefisien dari variabel *respons* menggunakan *software* Minitab.

1. Koefisien Regresi *Error* Dimensi X

Koefisien regresi untuk *error* dimensi x mengindikasikan besarnya perubahan pada *error* dimensi x untuk setiap kenaikan satu satuan terhadap variabel independen. Berikut merupakan koefisien regresi respons *error* dimensi x berdasarkan hasil analisis regresi menggunakan *software* Minitab (Tabel 4.5).

Tabel 4. 5 Koefisien Regresi untuk Respons *Error* Dimensi x

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3,45	1,18	2,93	0,013	
LH	-0,940	0,588	-1,6	0,136	1,00
WT	0,196	0,588	0,33	0,745	1,00
PS	-0,327	0,588	-0,56	0,589	1,00
ND	-0,480	0,588	-0,82	0,430	1,00
LH*LH	0,481	0,882	0,55	0,596	1,25
WT*WT	1,352	0,882	1,53	0,152	1,25
PS*PS	0,121	0,882	0,14	0,893	1,25
ND*ND	-3,056	0,882	-3,46	0,005	1,25
LH*WT	0,37	1,02	0,37	0,720	1,00
LH*PS	-1,99	1,02	-0,20	0,074	1,00
LH*ND	0,11	1,02	0,10	0,918	1,00
WT*PS	-1,98	1,02	-1,94	0,076	1,00
WT*ND	-1,01	1,02	-0,99	0,343	1,00
PS*ND	-0,42	1,02	-0,41	0,687	1,00

Nilai konstanta sebesar 3,45 dengan tanda positif dalam model regresi ini mengindikasikan bahwa ketika semua variabel independen bernilai nol, nilai variabel respons (*error* dimensi x) berada pada angka 3,45.

2. Koefisien Regresi *Error* Dimensi y

Koefisien regresi *error* dimensi y merepresentasikan besaran dan arah pengaruh setiap variabel independen yaitu *layer height*, *wall thickness*, *print speed*, dan *nozzle diameter* terhadap variabel respons yaitu *error* dimensi y (Tabel 4.6).

Tabel 4. 6 Koefisien Regresi untuk Respons *Error* Dimensi y

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1,253	0,397	3,16	0,008	
LH	-0,020	0,198	-0,10	0,921	1,00
WT	0,270	0,198	1,36	0,199	1,00
PS	0,117	0,198	0,59	0,567	1,00
ND	0,140	0,198	0,71	0,494	1,00
LH*LH	-0,195	0,298	-0,66	0,525	1,25
WT*WT	0,200	0,298	0,67	0,514	1,25
PS*PS	-0,150	0,298	-0,50	0,623	1,25
ND*ND	-0,325	0,298	-1,09	0,296	1,25
LH*WT	-0,240	0,344	-0,70	0,498	1,00
LH*PS	0,170	0,344	0,49	0,630	1,00
LH*ND	-0,190	0,344	-0,55	0,591	1,00
WT*PS	0,640	0,344	1,86	0,087	1,00
WT*ND	-0,150	0,344	-0,44	0,670	1,00
PS*ND	-0,060	0,344	-0,17	0,864	1,00

Secara keseluruhan, model yang terbentuk menunjukkan bahwa variabel-variabel linear dan interaksi kuadratik yang diuji tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap variasi respons dengan nilai $p > 0,05$.

3. Koefisien Regresi *Error* Dimensi z

Koefisien regresi *error* dimensi z merepresentasikan besaran dan arah pengaruh setiap variabel independen yaitu *layer height*, *wall thickness*, *print speed*, dan *nozzle diameter* terhadap variabel respons yaitu *error* dimensi z (Tabel 4.7).

Tabel 4. 7 Koefisien Regresi untuk Respons *Error* Dimensi z

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,817	0,280	2,92	0,013	
LH	-0,029	0,140	0,21	0,838	1,00

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
WT	-0,208	0,140	-1,49	0,162	1,00
PS	0,008	0,140	0,06	0,953	1,00
ND	0,371	0,140	-2,65	0,021	1,00
LH*LH	0,108	0,210	0,52	0,615	1,25
WT*WT	-0,010	0,210	-0,05	0,961	1,25
PS*PS	0,265	0,210	1,26	0,231	1,25
ND*ND	0,208	0,210	0,99	0,340	1,25
LH*WT	-0,013	0,242	-0,05	0,960	1,00
LH*PS	-0,600	0,242	-2,48	0,029	1,00
LH*ND	-0,200	0,242	-0,83	0,425	1,00
WT*PS	0,238	0,242	0,98	0,346	1,00
WT*ND	-0,025	0,242	-0,10	0,920	1,00
PS*ND	0,088	0,242	-0,36	0,724	1,00

Berdasarkan hasil koefisien regresi ini, pada tingkat signifikansi 0,05, hanya *nozzle diameter* (ND) secara linear dan interaksi antara *layer height* (LH) dan *print speed* (PS) yang memiliki pengaruh signifikan secara statistik terhadap variabel *respons error* dimensi z.

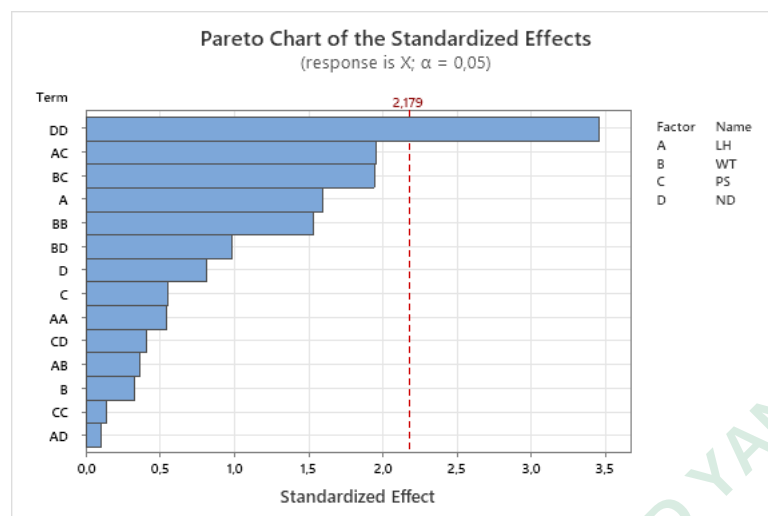
4.2.2 Analisis Variabel Independen Terhadap Variabel Respons

Hasil analisis menggunakan *software Minitab* didapatkan grafik pareto untuk setiap *error* dimensi. Grafik pareto digunakan untuk merepresentasikan pengaruh variabel independen terhadap respons. Grafik pareto menampilkan grafik batang dengan urutan berdasarkan besarnya pengaruh variabel independen terhadap respons dan menunjukkan nilai *absolut* efek standar dari efek tersebar hingga terkecil. Grafik batang yang melewati garis referensi secara statistik dinyatakan berpengaruh terhadap respons. Tingkat signifikansi yang digunakan yaitu 0,05 pada untuk menggambar garis referensi sehingga didapatkan nilai z tabel 2,179. Variabel independen yang digunakan terdiri dari 4 faktor dan 3 respons (Tabel 4.8).

Tabel 4. 8 Keterangan nama Faktor

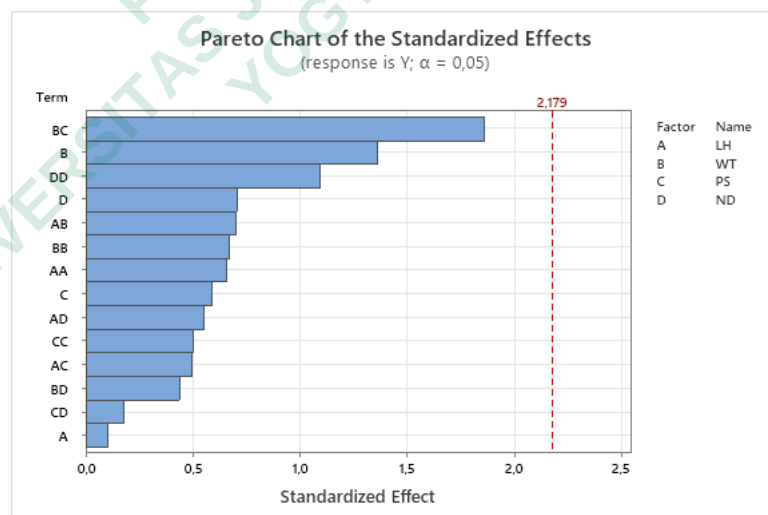
Faktor	Nama	Keterangan
A	LH	<i>Layer Height</i>
B	WT	<i>Wall Thickness</i>
C	PS	<i>Print Speed</i>
D	ND	<i>Nozzle Diameter</i>

Berikut merupakan grafik pareto pengaruh dari variabel independen terhadap variabel respons *error* dimensi x (Gambar 4.5).



Gambar 4. 5 Grafik Pareto *Error* Dimensi x

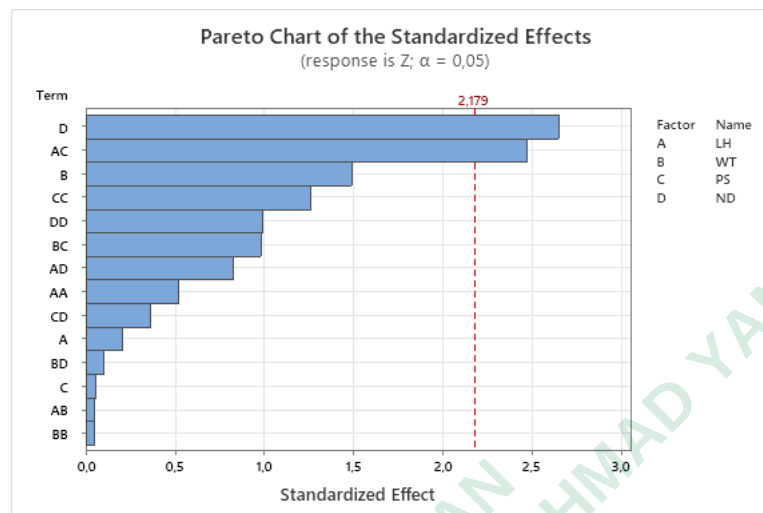
Berdasarkan Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa interaksi *squared term* atau interaksi dua buah faktor yang sama yaitu *nozzle* diameter merupakan variabel yang paling mempengaruhi *error* dimensi x. Interaksi tersebut digambarkan dengan nilai *p-value* lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Hal ini menandakan hubungan antara variabel independen dengan variabel respons *error* dimensi x mengikuti garis lengkung atau tidak linear. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hubungan antara variabel respons *error* dimensi x, akan selalu dipengaruhi oleh variabel independen *nozzle* diameter.



Gambar 4. 6 Grafik Pareto *Error* Dimensi y

Hasil grafik pareto untuk respons *error* dimensi y (Gambar 4.6) menunjukkan tidak ada hubungan antara semua faktor dengan variabel respons *error* dimensi y. Hal tersebut berarti semua faktor pada setiap level cenderung

memiliki *error* dimensi yang sama dan memiliki nilai *p-value* yang lebih besar dari $\alpha = 0,05$.



Gambar 4. 7 Grafik Pareto *Error* Dimensi z

Grafik pareto pengaruh variabel independen dengan hasil *error* dimensi z menunjukkan adanya pengaruh antara *layer height* dan *print speed* yang menunjukkan variabel yang paling mempengaruhi *error* dimensi z. Faktor *layer height* dan *print speed* memiliki *p-value* yang lebih kecil dari $\alpha = 0,05$ sehingga dapat disimpulkan bahwa level faktor *error* dimensi z cenderung tidak memiliki nilai yang sama. Selain itu, faktor *nozzle diameter* juga berpengaruh terhadap respons *error* dimensi z hal tersebut dapat disimpulkan perubahan pada faktor *nozzle diameter* akan mempengaruhi hasil dari *error* dimensi z.

4.2.3 Uji Signifikansi

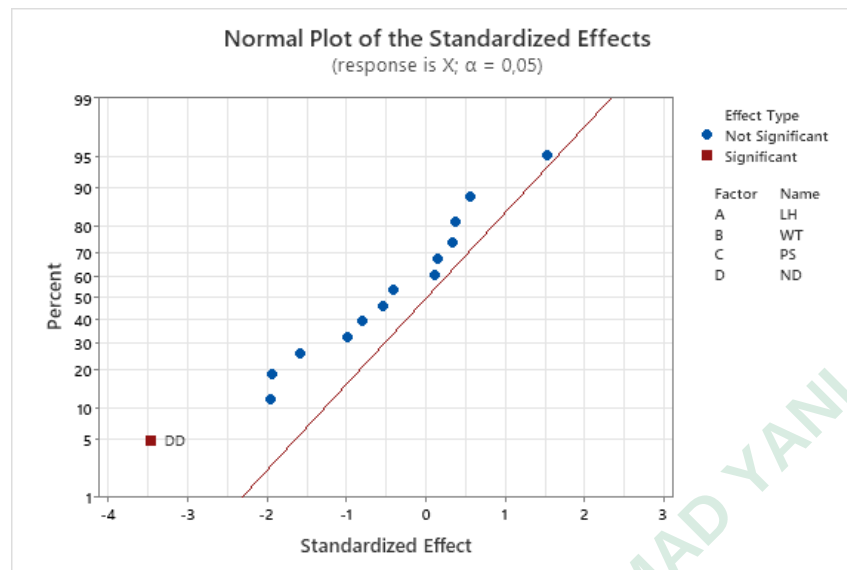
Setelah mengetahui faktor-faktor yang berpengaruh terhadap setiap respons *error* dimensi tahapan selanjutnya dilakukan uji signifikansi menggunakan ANOVA (*Analysis of Variance*). ANOVA digunakan untuk menguji signifikansi dari faktor dan interaksi faktor terhadap variabel respons. Signifikansi merupakan tingkat kepercayaan atau probabilitas terjadinya kesalahan pada pengambilan keputusan. Pada tabel ANOVA terdapat nilai *p-value* yang menjadi indikator dari uji signifikansi. Nilai *p-value* merupakan ukuran penting dalam menentukan apakah suatu faktor atau interaksi antar faktor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons. Tingkat signifikan yang digunakan adalah 0,05 yang memiliki arti bahwa hasil riset mempunyai peluang atau tingkat kepercayaan (*confidence interval*) untuk

benar 95% dan kemungkinan kesalahan maksimal sebesar 5% (tingkat ketelitian). Jika *p-value* kurang dari tingkat signifikansi yang telah ditetapkan $\alpha = 0,05$, maka faktor atau interaksi dianggap signifikan secara statistik.

Tabel 4. 9 Hasil Uji Signifikansi ANOVA *Error* Dimensi x

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	141,689	10,1027	2,44	0,065
Linear	4	15,107	3,7769	0,91	0,489
LH	1	10,603	10,60232	2,55	0,136
WT	1	0,459	0,46	0,11	0,745
PS	1	1,281	12,805	0,31	0,589
ND*ND	1	2,765	2,7648	0,67	0,430
Square	4	89,645	22,4111	5,40	0,010
LH*LH	1	1,234	1,2345	0,30	0,596
WT*	1	9,736	9,736	2,35	0,152
PS*PS	1	0,078	0,0782	0,02	0,893
ND*ND	1	49,794	49,79	12,00	0,005
2-Way Interaction	6	36,937	6,16	1,48	0,264
LH*WT	1	0,558	0,5575	0,13	0,720
LH*PS	1	15,894	16,8935	3,83	0,074
LH*ND	1	0,046	0,0455	0,01	0,918
WT*PS	1	15,682	15,6816	3,78	0,076
WT*ND	1	4,054	4,0535	0,98	0,343
PS*ND	1	0,706	0,7056	0,17	0,678
Error	12	49,812	4,151		
Lack-of-Fit	10	44,814	4,4814	1,79	0,411
Pure Error	2	4,998	2,4991		
Total	26	191,502			

Berdasarkan hasil analisis ANOVA untuk error dimensi x (Tabel 4.8), ditemukan nilai *p-value* yang lebih kecil dari α pada faktor interaksi kuadrat diameter *nozzle*. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik terdapat signifikansi terhadap respons *error* dimensi x. Selain itu, hasil uji signifikansi juga dapat dianalisis melalui grafik normal plot.



Gambar 4. 8 Normal Plot Signifikansi *Error* Dimensi x

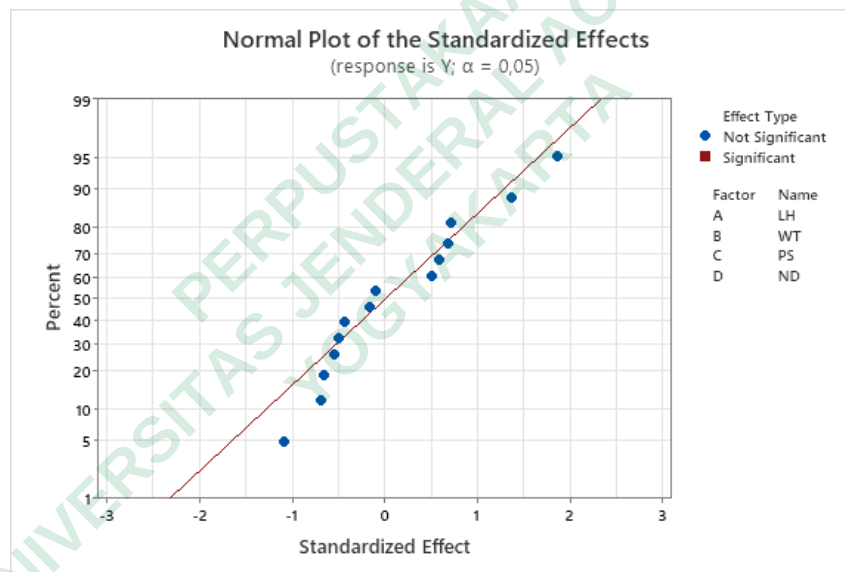
Gambar 4.8 merepresentasikan plot-plot atau efek-efek dalam garis distribusi normal. Hubungan antara variabel independen *nozzle* diameter dan *error* dimensi x bersifat non-linear dan memiliki komponen kuadratik yang signifikan. Sedangkan untuk faktor lainnya seperti *layer height*, *wall thickness*, dan *print speed* tidak memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap *error* dimensi x dalam rentang eksperimen yang diuji.

Tabel 4. 10 Hasil Uji Signifikansi ANOVA *Error* Dimensi y

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	4,8660	0,347570	0,74	0,711
Linear	4	1,2781	0,319530	0,68	0,621
LH	1	0,0048	0,004800	0,01	0,921
WT	1	0,8748	0,874800	1,85	0,199
PS	1	0,1633	0,163330	0,35	0,567
ND*ND	1	0,2352	0,235200	0,50	0,494
Square	4	1,3547	0,338670	0,72	0,596
LH*LH	1	0,2028	0,202800	0,43	0,525
WT*	1	0,2133	0,213330	0,45	0,514
PS*PS	1	0,1200	0,120000	0,25	0,623
ND*ND	1	0,5633	0,563330	1,19	0,296
2-Way Interaction	6	2,2332	0,372200	0,79	0,596
LH*WT	1	0,2304	0,230400	0,49	0,498
LH*PS	1	0,1156	0,115600	0,24	0,630
LH*ND	1	0,1444	0,144400	0,31	0,591
WT*PS	1	1,6384	1,638400	3,47	0,087

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
WT*ND	1	0,0900	0,090000	0,19	0,670
PS*ND	1	0,0144	0,014400	0,03	0,864
Error	12	5,6695	0,472460		
Lack-of-Fit	10	5,5116	0,551160	6,98	0,132
Pure Error	2	0,1579	0,078930		
Total	26	10,5355			

Berdasarkan hasil ANOVA dapat disimpulkan bahwa tidak ada variabel independen linear maupun kuadratik, serta interaksi dua faktor yang memiliki pengaruh signifikan secara statistik terhadap *error* dimensi y. Nilai *p-value* secara keseluruhan juga tidak signifikan dalam menjelaskan variasi *error* dimensi y karena nilai *p-value* lebih besar dari nilai α (0,05). Pengaruh variabel independen dengan variabel respons dapat digambarkan dari grafik normal plot (Gambar 4.9)



Gambar 4. 9 Normal Plot Signifikansi *Error* Dimensi y

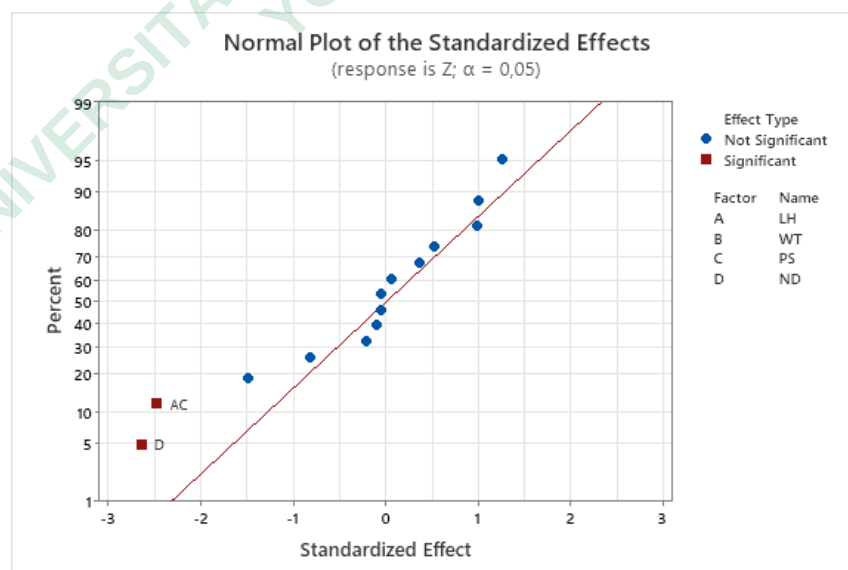
Berdasarkan perhitungan ANOVA pada *error* dimensi z didapatkan nilai *p-value* yang bernilai kurang dari 0,05 pada faktor *nozzle diameter* dan interaksi antara *layer height* dan *print speed*. Sehingga faktor-faktor tersebut dapat dikatakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *error* dimensi z (Tabel 4.11).

Tabel 4. 11 Hasil Uji Signifikansi ANOVA *Error* Dimensi z

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	4,6090	0,329210	1,40	0,282
Linear	4	2,1821	0,545520	2,32	0,116
LH	1	0,0102	0,010210	0,04	0,838

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
WT	1	0,5208	0,520830	2,22	0,162
PS	1	0,0008	0,000830	0,00	0,953
ND*ND	1	1,6502	1,650210	7,03	0,021
Square	4	0,5676	0,141890	0,60	0,667
LH*LH	1	0,0626	0,062590	0,27	0,615
WT*	1	0,0006	0,000580	0,00	0,961
PS*PS	1	0,3734	0,373360	1,59	0,231
ND*ND	1	0,2315	0,231480	0,99	0,340
2-Way Interaction	6	1,8594	0,309900	1,32	0,320
LH*WT	1	0,0006	0,000630	0,00	0,960
LH*PS	1	1,4400	1,440000	6,13	0,029
LH*ND	1	0,1600	0,160000	0,68	0,425
WT*PS	1	0,2256	0,225630	0,96	0,346
WT*ND	1	0,0025	0,002500	0,01	0,920
PS*ND	1	0,0306	0,030630	0,13	0,724
Error	12	2,8173	0,234770		
Lack-of-Fit	10	2,0856	0,208560	0,57	0,778
Pure Error	2	0,7317	0,365830		
Total	26	7,4263			

Dari hasil ANOVA tersebut selanjutnya di visualisasikan dalam grafik normal plot untuk melihat plot-plot atau titik-titik yang berpengaruh terhadap *error* dimensi z (Gambar 4.10).



Gambar 4. 10 Normal Plot Signifikansi *Error* Dimensi z

Interaksi antara faktor A dan C yaitu variabel independen *layer height* (LH) dan *print speed* (PS) memiliki pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap *error* dimensi z. Selain interaksi faktor A dan C faktor D juga memiliki pengaruh yang signifikan karena terletak jauh di luar garis. Hal ini mengindikasikan bahwa faktor D atau variabel *nozzle diameter* (ND) secara linear memiliki pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap *error* dimensi z.

4.2.4 Uji Kesesuaian Model

Pengujian kesesuaian model dilakukan untuk memastikan bahwa model regresi dapat menggambarkan data secara keseluruhan. Pengujian kesesuaian model meliputi pengujian *lack of fit* dan pengujian koefisien determinasi (R^2).

1. Uji *Lack of Fit*

Uji *lack of fit* bertujuan untuk menentukan apakah model yang digunakan dapat mewakili hubungan antara variabel independen dengan variabel respons dengan membandingkan kesalahan residual dengan kesalahan murni (*pure error*). Hipotesis dari pengujian *lack of fit error* dimensi adalah sebagai berikut:

H_0 : tidak ada *lack of fit* pada model

H_1 : terdapat *lack of fit* pada model

Pengambilan keputusan didasarkan pada nilai *p-value* pada nilai α 0,05

Jika nilai *p-value* > 0,05, maka H_0 diterima

Jika nilai *p-value* > 0,05, maka H_0 ditolak

Dari hasil analisis ANOVA (Tabel 4.9) diperoleh nilai *lack of fit* pada error dimensi x memiliki nilai signifikan (*p-value* > α) = 0,411 > 0,05. Sehingga H_0 diterima, artinya model regresi yang digunakan memiliki kesesuaian dengan model yang diduga dan model regresi diterima. Hasil pengujian *lack of fit* untuk *error* dimensi y (Tabel 4.10) menunjukkan nilai yang signifikan dengan *p-value* = 0,132, lebih besar dari α = 0,05 sehingga H_0 diterima. Dengan kata lain, tidak ada *lack of fit* pada pendugaan model yang artinya model yang dibuat telah sesuai dengan data.

Tabel 4.10 nilai *lack of fit* pada *error* dimensi z menunjukkan nilai yang signifikan dari α = 0,05, karena *p-value* dari *lack of fit* mempunyai nilai 0,778 (*p-value* > α). Sehingga menerima H_0 atau tidak terdapat penyimpangan atau *lack of fit* pada model. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa model

regresi masing-masing *error* dimensi sudah fit dengan data dan tidak perlu dilakukan penentuan model regresi orde lanjutan.

2. Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Berdasarkan hasil analisis koefisien determinasi menggunakan *software* Minitab didapatkan R^2 untuk model regresi dari *error* dimensi x adalah 73,99%. Nilai tersebut menunjukkan total variasi *error* dimensi x yang dapat dijelaskan oleh model regresi sebesar 73,99% dan sisanya 26,01% merupakan variasi *error* dimensi yang dipengaruhi oleh variabel lain yang berada di luar model. Berdasarkan Tabel 2.5 nilai koefisien determinasi pada *error* dimensi x berada pada interval 0,6 – 0,799 sehingga memiliki tingkat hubungan yang kuat antar variabel.

Koefisien determinasi untuk *error* dimensi y menunjukkan pengaruh yang cukup kuat berdasarkan tabel tingkat hubungan variabel (Tabel 2.3). Hasil Minitab *R-squared error* dimensi y memiliki nilai sebesar 46,19%, yang artinya 46,19% dari variasi dalam variabel respons dapat dijelaskan oleh model regresi dan sisanya 53,81% variasi dalam respons tidak dapat dijelaskan oleh model atau model dipengaruhi faktor lain. Sedangkan hasil *R-squared error* dimensi z menunjukkan nilai sebesar 62,06% dan memiliki hubungan yang kuat antara variabel independen dan variabel respons. Nilai 62,06% adalah variasi yang dapat dijelaskan oleh model dan untuk 37,94% lainnya merupakan variasi yang tidak dapat dijelaskan oleh model dan dianggap sebagai variasi acak.

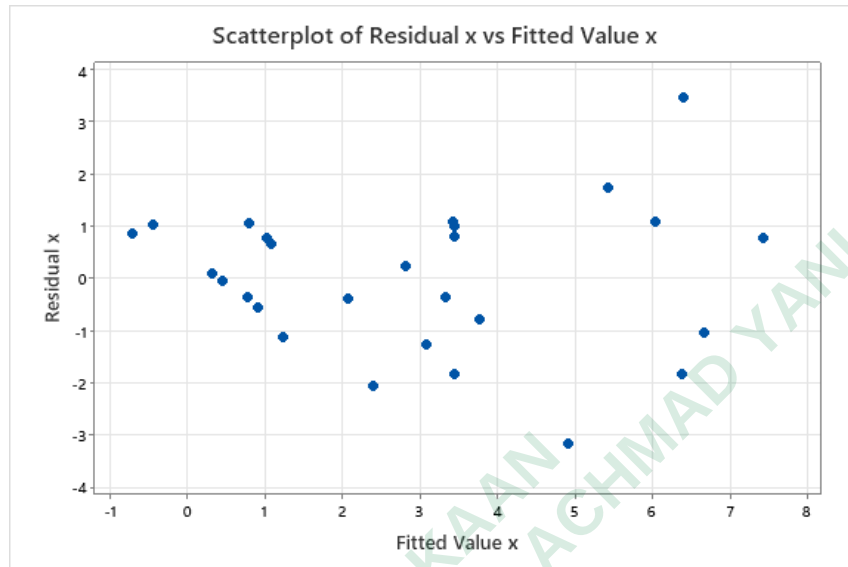
4.2.5 Uji Asumsi Residual

Data residual dalam penelitian ini harus memenuhi beberapa asumsi, yaitu bersifat independen, memiliki rata-rata nol dan variansi yang konstan σ^2 (identik), serta terdistribusi normal atau $\varepsilon \sim \text{IIDN}(0, \sigma^2)$. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap data residual.

1. Uji Identik

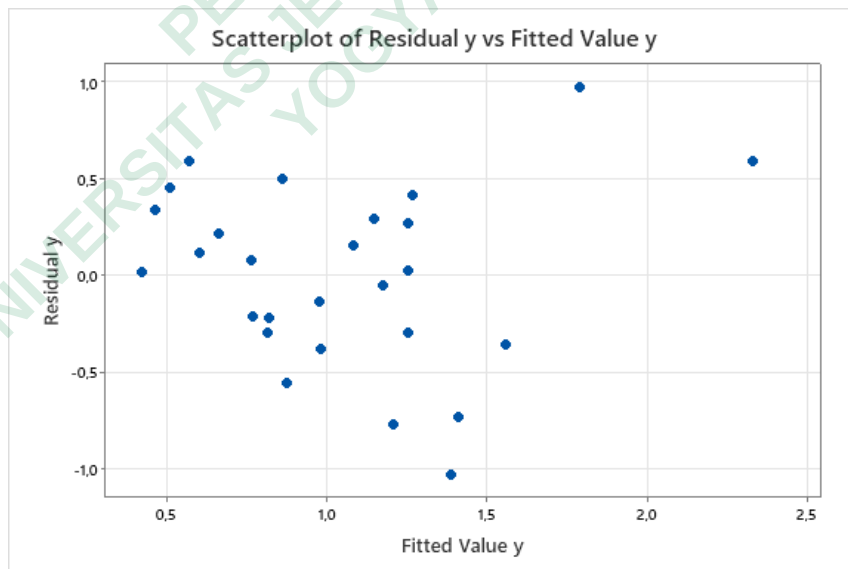
Berdasarkan hasil pengujian identik apabila pola yang digambarkan menyebar dan tidak membentuk pola tertentu, maka dapat dikatakan bahwa residual bersifat identik. Hasil uji identik residual untuk masing-masing respons divisualisasikan menggunakan grafik plot residual. Berikut merupakan hasil

pengujian identik dari *error* dimensi x (Gambar 4.11), *error* dimensi y (Gambar 4.12), dan *error* dimensi z (Gambar 4.13).



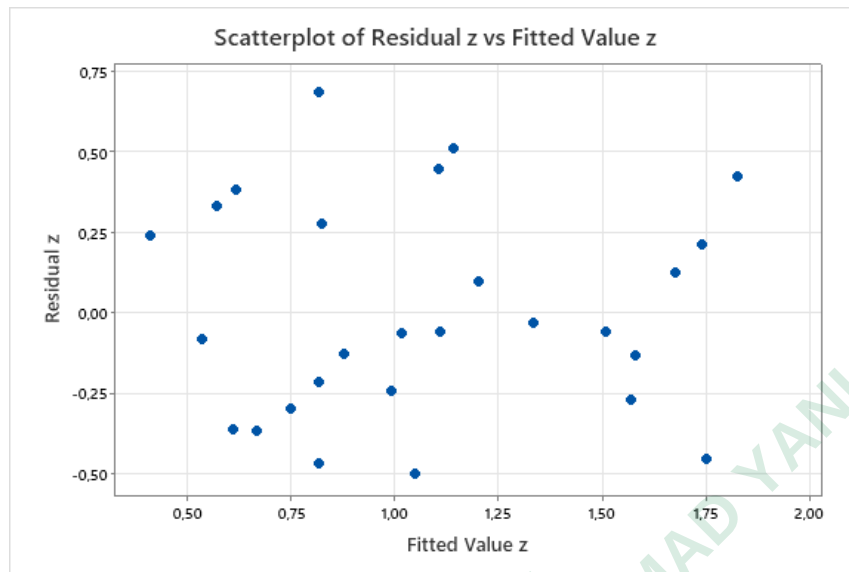
Gambar 4. 11 Plot Residual untuk *Error* Dimensi x

Pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa plot residual untuk *error* dimensi x terdistribusi secara acak dan tidak menunjukkan pola tertentu. Dengan demikian, residual untuk kesalahan pada dimensi x telah memenuhi asumsi identik.



Gambar 4. 12 Plot Residual untuk *Error* Dimensi y

Berdasarkan hasil uji identik *error* dimensi y (Gambar 4.12) diketahui bahwa grafik plot residual tidak menunjukkan adanya pola tertentu, dengan demikian asumsi identik terpenuhi.

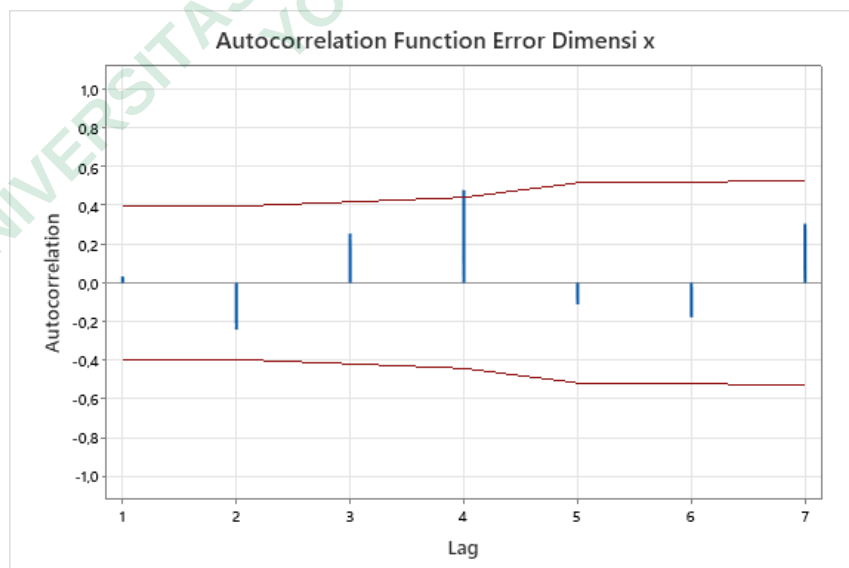


Gambar 4. 13 Plot Residual untuk *Error Dimensi z*

Dari Gambar 4.13 dapat disimpulkan bahwa plot residual *error* dimensi *z* tidak membentuk pola tertentu yang mengindikasikan penyebaran yang merata. Dengan demikian, asumsi identik dari residual *error* dimensi *z* terpenuhi

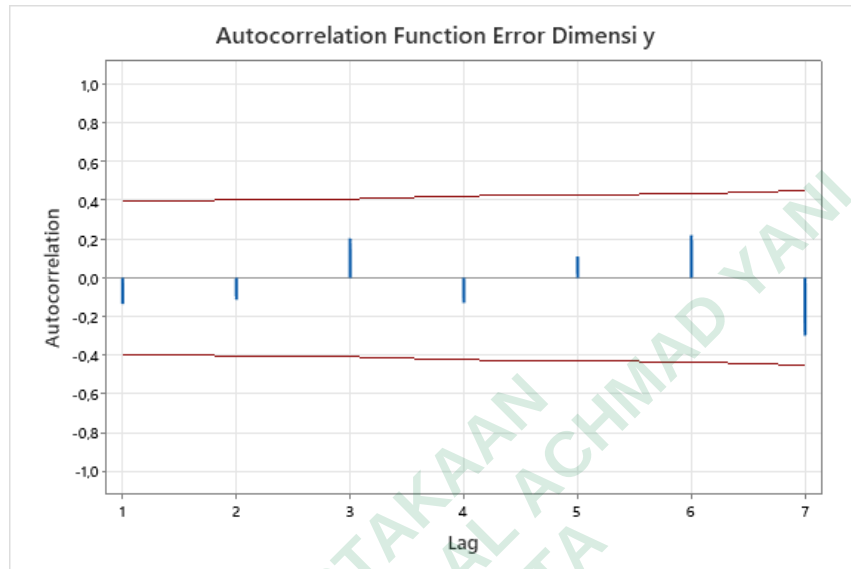
2. Uji Independen

Berikut merupakan hasil uji independen menggunakan plot AFC untuk masing-masing error dimensi dapat dilihat pada (Gambar 4.14, Gambar 4.15 dan Gambar 4.16).



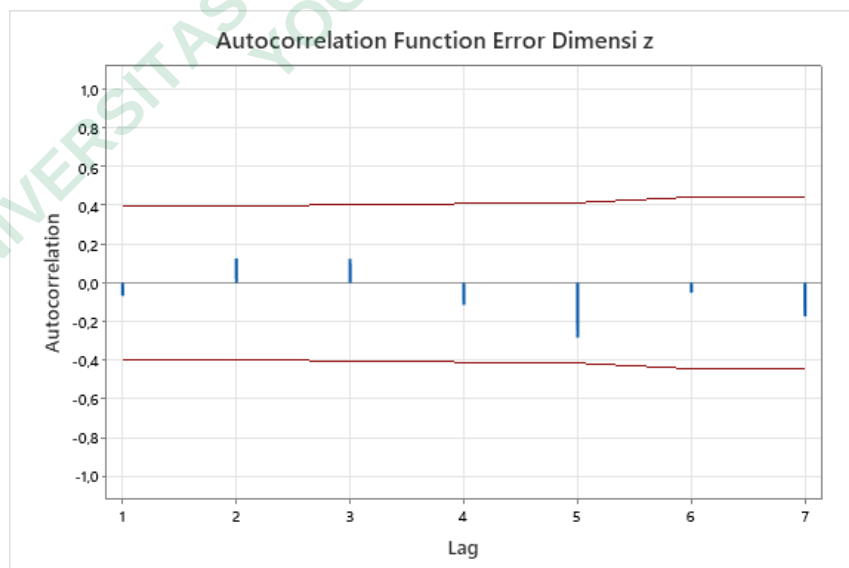
Gambar 4. 14 Plot *Autocorrelation Function Error Dimensi x*

Gambar 4.14 menunjukkan bahwa data *error* dimensi x masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$ atau $\pm 0,385$. Dengan demikian eksperimen dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antara pengamatan.



Gambar 4. 15 Plot *Autocorrelation Function Error Dimensi y*

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa semua nilai ACF untuk respons *error* dimensi y berada dalam batas dan bawah pada interval $\pm 0,385$. Dengan kata lain, residual untuk *error* dimensi y sudah memenuhi asumsi independen.



Gambar 4. 16 Plot *Autocorrelation Function Error Dimensi z*

Grafik AFC pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa korelasi masih berada pada jarak interval $\pm 0,385$ yang berarti residual *error* dimensi z memenuhi asumsi residual independen.

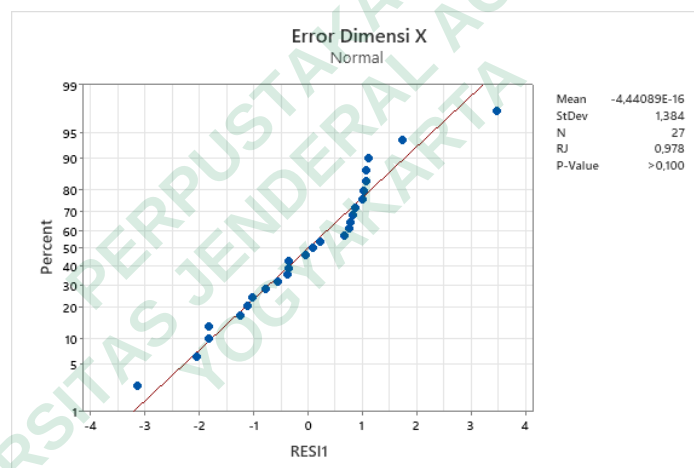
3. Uji Distribusi Normal

Uji distribusi normal dilakukan untuk mengamati penyimpangan dari model residual. Pengujian dilakukan menggunakan uji *Shapiro-Wilk* dengan level signifikansi yang digunakan adalah $\alpha = 0,05$. Hipotesis untuk uji distribusi normal dari residual adalah sebagai berikut:

H_0 : residual terdistribusi normal

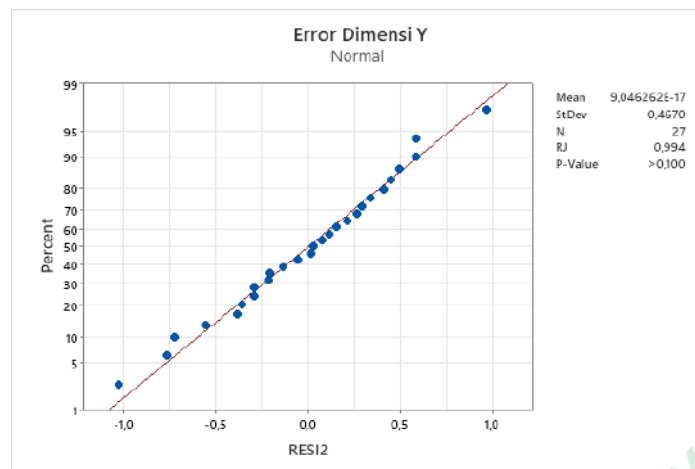
H_1 : residual tidak terdistribusi normal

Berikut merupakan hasil pengujian normalitas untuk *error* dimensi x (Gambar 4.17), *error* dimensi y (Gambar 4.18), dan *error* dimensi z (Gambar 4.19).



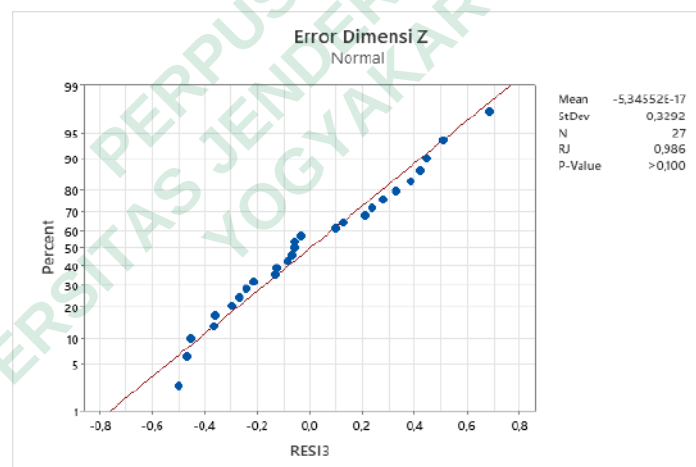
Gambar 4. 17 Grafik Normal Probability Plot Error Dimensi x

Berdasarkan Gambar 4.17, terlihat bahwa pada level pengujian dengan $\alpha = 0,05$ nilai p-value yang diperoleh adalah lebih besar dari 0,100 ($p\text{-value} > \alpha$), sehingga hipotesis nol (H_0) diterima. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa residual error untuk dimensi x mengikuti distribusi normal dan asumsi normalitas telah terpenuhi.



Gambar 4. 18 Grafik Normal Probability Plot Error Dimensi y

Gambar 4.18 memperlihatkan grafik normalitas dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, di mana nilai p-value dan nilai Shapiro-Wilk (RJ) sebesar 0,994 lebih besar daripada α . Oleh karena itu, hipotesis nol (H_0) diterima. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa residual memiliki distribusi normal dan asumsi normalitas terpenuhi.



Gambar 4. 19 Grafik Normal Probability Plot Error Dimensi z

Berdasarkan hasil uji normalitas *error* dimensi z menunjukkan nilai statistik *Shapiro-Wilk* (RJ) adalah 0,965 dengan *p-value* $> 0,100$ nilai tersebut lebih besar dari $\alpha = 0,05$, maka residual terdistribusi normal dan H_0 diterima.

Setelah melakukan uji asumsi residual, didapat kesimpulan bahwa residual-residual untuk respons *error* dimensi x, *error* dimensi y, dan *error* dimensi z memiliki residual yang independen, identik, dan terdistribusi normal. Dengan demikian semua variabel respons memenuhi semua uji asumsi residual.

4.2.6 Penyusunan Model Matematis

Setelah melakukan beberapa pengujian, maka ditentukan model matematis yang menunjukkan pengaruh faktor *layer height* (LH), *wall thickness* (WT), *print speed* (PS), dan *nozzle diameter* (ND) terhadap respons *error* dimensi x, *error* dimensi y, dan *error* dimensi z. Model matematis tersebut ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \text{Error Dimensi } x = & -21,1 - 1,73 LH - 38,7 WT + 0,961 PS + 33,4 ND \\ & + 0,481 LH * LH + 33,8 WT * WT + 0,00054 PS * PS - 6,24 ND * ND \\ & + 1,87 LH * WT - 0,1329 LH * PS + 0,15 LH * ND - 0,660 WT * PS \\ & - 7,19 WT * ND \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Error Dimensi } y = & 0,0 + 2,25 LH - 9,3 WT - 0,183 PS + 4,74 ND \\ & - 0,195 LH * LH + 5,00 WT * WT - 0,00067 PS * PS - 0,663 ND * ND \\ & - 1,20 LH * WT + 0,0113 LH * PS - 0,271 LH * ND + 0,213 WT * PS \\ & - 1,07 WT * ND - 0,0057 PS * ND \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Error Dimensi } z = & 4,51 + 1,20 LH - 2,0 WT - 0,075 PS - 1,77 ND \\ & + 0,108 LH * LH - 0,26 WT * WT + 0,001176 PS * PS + 0,425 ND * ND \\ & - 0,06 LH * WT - 0,0400 LH * PS - 0,286 LH * ND + 0,0792 WT * PS \\ & - 0,18 WT * ND + 0,0083 PS * ND \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.2.7 Validasi Model

Model matematis yang terdapat dalam persamaan 4.4, 4.5, dan 4.6 divalidasi melalui perhitungan dan percobaan yang dilakukan dengan menggunakan level tengah (0) untuk setiap variabel independen. Hasil perhitungan dengan menerapkan level tengah pada setiap faktor dalam persamaan tersebut menghasilkan nilai prediksi untuk respons *error* dimensi x, *error* dimensi y dan *error* dimensi z (Tabel

Tabel 4. 12 Hasil Perhitungan Nilai Prediksi Respons

Level dari Faktor				Nilai Prediksi		
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Error Dimensi x	Error Dimensi y	Error Dimensi z
0	0	0	0	0,345	1,253	0,88

Hasil percobaan validasi model dibandingkan dengan nilai prediksi melalui uji *one sample t test*. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut: persamaan ini menghasilkan nilai prediksi untuk respons:

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

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

Pengambilan keputusan:

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

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

Dengan $\mu_0 = 0,345$ untuk respons *error* dimensi x, $\mu_0 = 1,253$ untuk *error* dimensi y, dan $\mu_0 = 0,88$ *error* dimensi z. Berikut merupakan hasil percobaan validasi untuk masing-masing *error* dimensi (Tabel 4.13).

Tabel 4. 13 Hasil Uji Validasi

	<i>Error Dimensi x</i>	<i>Error Dimensi y</i>	<i>Error Dimensi z</i>
Nilai Prediksi	0,345	1,253	0,88
P-Value	0,356	0,101	0,076

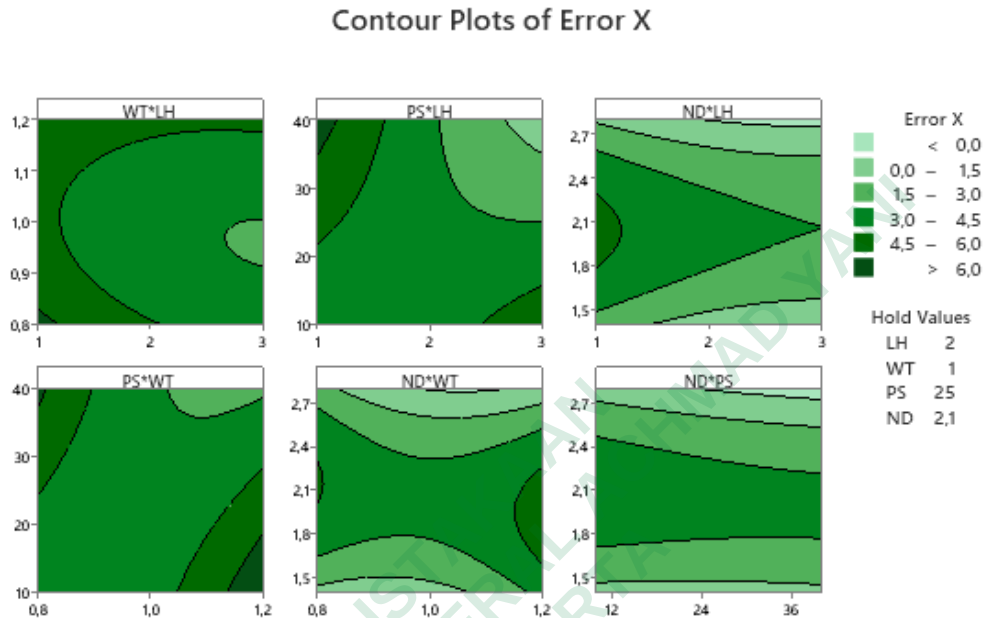
Berdasarkan nilai *p-value* dari uji *one-sample t* untuk respons *error* dimensi x, *error* dimensi y, dan *error* dimensi z menunjukkan nilai *p-value* lebih besar daripada α 0,05, sehingga H_0 diterima. Dengan demikian, model regresi dapat dikatakan valid karena tidak ada perbedaan yang signifikan secara statistik antara nilai hasil eksperimen validasi dan nilai prediksi model.

4.2.8 Analisis Response Surface

Analisis optimasi dengan metode RSM dijelaskan dengan menggunakan grafik *response optimizer* pada *software* Minitab 21. Titik optimal respons dapat digambarkan secara visual dengan menggunakan *countour plot* atau plot permukaan dan *surface plot* dari model yang telah dibuat Untuk menggambarkan kontur plot, respons dapat digambarkan dalam tiga dimensi sehingga hanya dapat dipakai untuk melihat 2 faktor yang memiliki pengaruh terhadap respons.

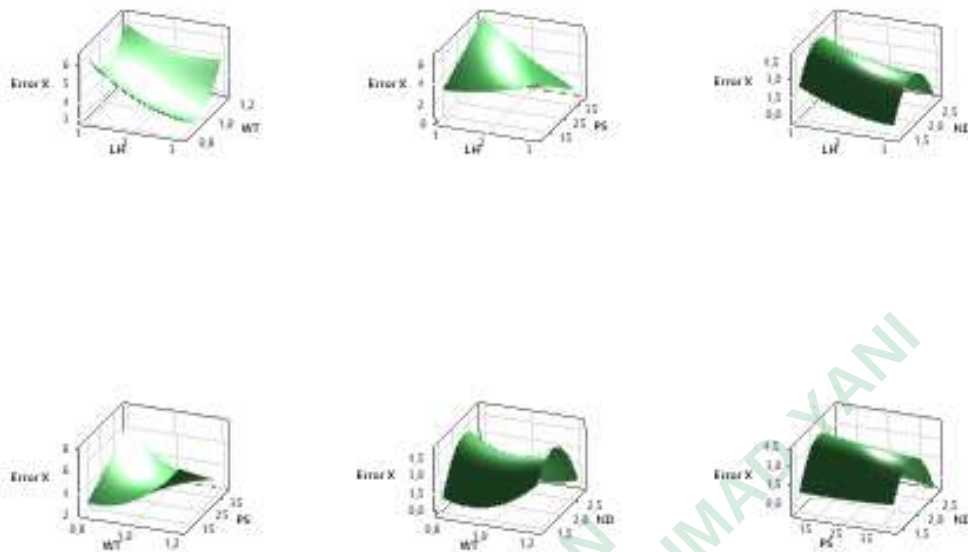
1. *Contour Plot* dan *Surface Plots Error Dimensi x*

Pada grafik *contour plot* menunjukkan bahwa semakin pekat warna pada *contour* maka mempengaruhi tinggi rendahnya suatu nilai.



Gambar 4. 20 *Contour Plot Error Dimensi x*

Gambar 4.20 menggambarkan kombinasi parameter yang saling berinteraksi terhadap nilai respons *error* dimensi x, yang ditunjukkan melalui variasi warna. Garis-garis yang terbentuk dari titik-titik pada grafik contour plot mencerminkan kombinasi dari empat faktor, yaitu tinggi lapisan (*layer height*), ketebalan dinding (*wall thickness*), kecepatan cetak (*print speed*), dan diameter nozzle (*nozzle diameter*).



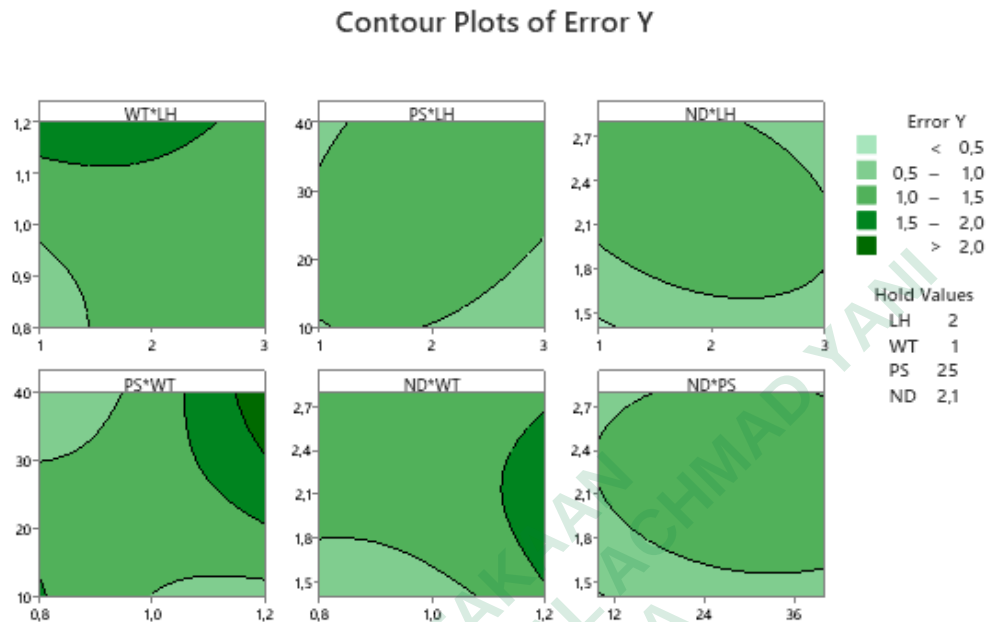
Gambar 4. 21 *Surface Plot Error Dimensi x*

Gambar 4.21 merupakan *surface plot* yang menggambarkan pengaruh variabel independen terhadap *error* dimensi x. Dari *surface plot* tersebut dapat disimpulkan bahwa adanya hubungan antara *wall thickness* (WT) dan *layer height* (LH) yang ditunjukkan oleh bentuk permukaan yang melengkung. Semakin rendah nilai *wall thickness* (WT) dan semakin tinggi nilai *layer height* (LH) dapat menurunkan *error* dimensi x. Selain itu, kenaikan faktor *print speed* (PS) dan *layer height* (LH) dapat menurunkan respons *error* dimensi x dan sebaliknya. Sedangkan pada interaksi *layer height* (LH) dan *nozzle diameter* (ND) dapat disimpulkan bahwa untuk meminimalkan *error* dimensi x kondisi optimal terjadi ketika nilai *layer height* (LH) berada pada titik yang rendah dan nilai *nozzle diameter* (ND) berada pada titik yang tinggi.

2. *Contour Plot dan Surface Plots Error Dimensi y*

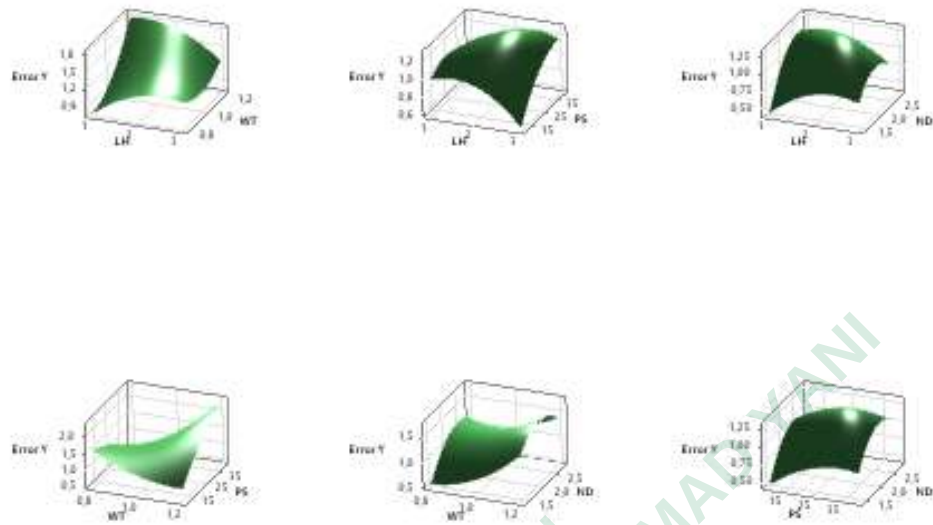
Contour plot pada *error* dimensi y menggambarkan pengaruh interaksi antara variabel independen dengan variabel respons. Pada setiap sub plot terdapat dua parameter yang divariasikan, sementara dua parameter lainnya ditahan pada nilai tertentu yang ditunjukkan pada *hold value*. Setiap plot memberikan visualisasi

bagaimana dua parameter berinteraksi dalam mempengaruhi *error* dimensi y (Gambar 4.22).



Gambar 4. 22 *Contour Plots Error Dimensi y*

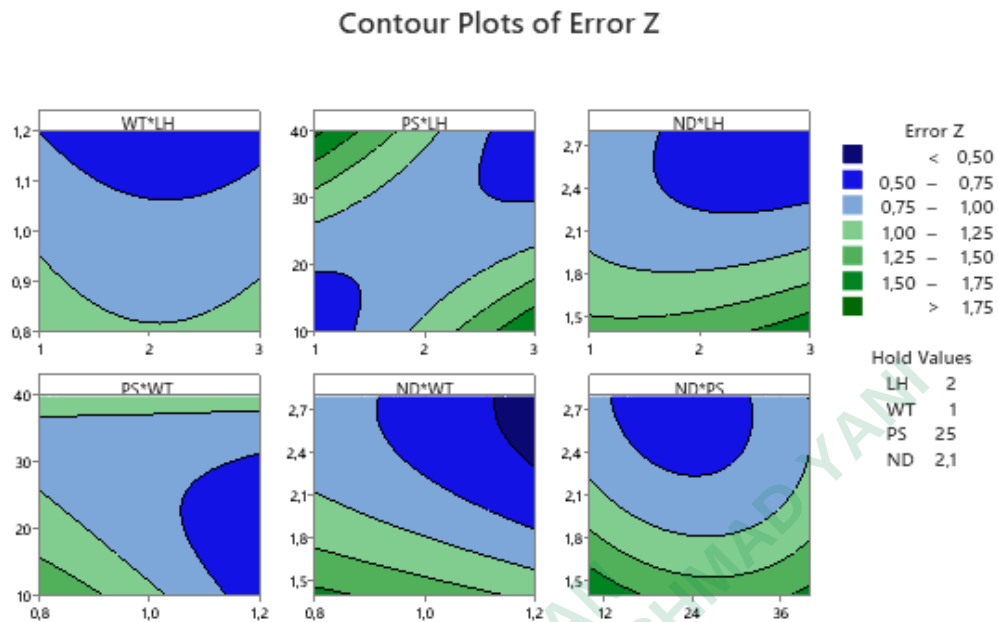
Berdasarkan Gambar 4.33 *surface plot* untuk *error* dimensi y, menggambarkan interaksi antara dua parameter cetak terhadap *error* dimensi y. Meskipun pada hasil uji signifikansi variabel independen menunjukkan bahwa tidak ada variabel tunggal yang signifikan secara statistik dalam mempengaruhi *error* dimensi y, grafik *surface plot* memperlihatkan variabilitas data pengukuran (Gambar 4.23).



Gambar 4. 23 *Surface Plot Error Dimensi y*

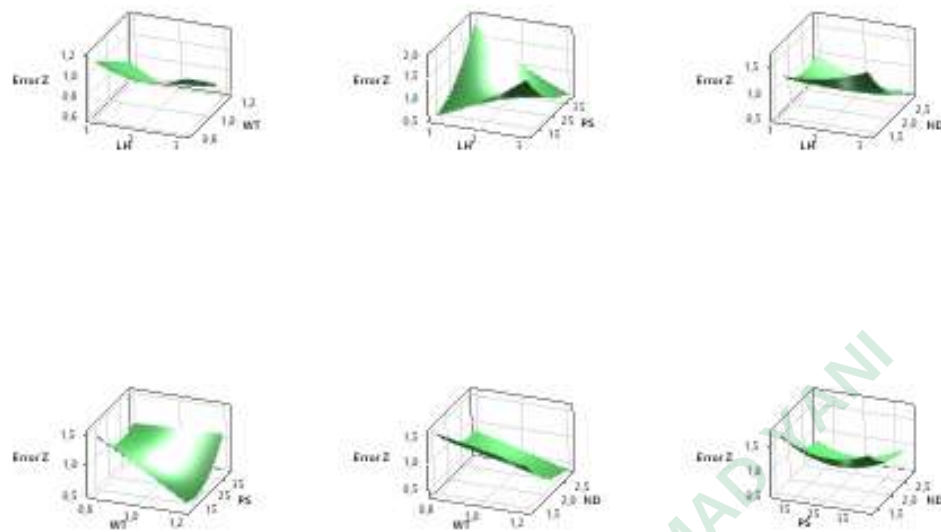
3. *Contour Plot dan Surface Plots Error Dimensi z*

Berdasarkan uji signifikansi *error* dimensi z didapatkan pengaruh yang signifikansi dari interaksi *layer height* dan *print speed*. Hasil uji signifikansi tersebut kemudian divisualisasikan menggunakan *contour plot* untuk mengetahui bagaimana perubahan dua faktor secara simultan dapat mempengaruhi hasil. Analisis *contour plot* (Gambar 4.24) menunjukkan pengaruh dari *layer height* dan *print speed* dengan nilai *hold values* pada *wall thickness* dan *nozzle diameter* dan *error* dimensi digambarkan oleh gradasi warna yang semakin terang.



Gambar 4. 24 *Contour Plot Error Dimensi z*

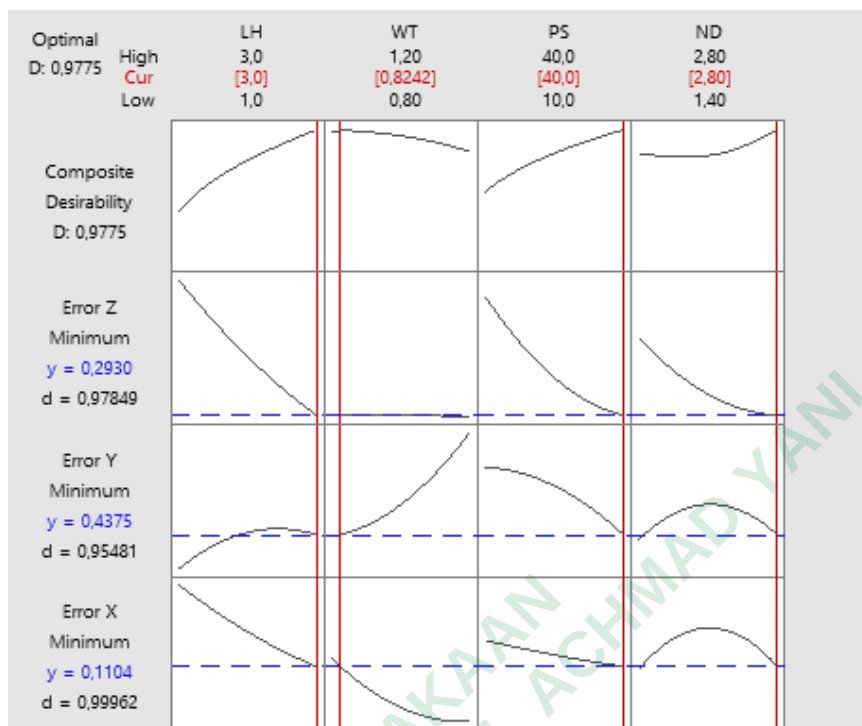
Perbedaan warna pada *contour plot* menunjukkan rentang nilai *error z* yang berbeda. Warna biru tua menunjukkan *error* dimensi *z* yang sangat rendah ($<0,6$), sedangkan warna hijau tua menunjukkan *error* dimensi *z* yang sangat tinggi ($>1,8$). Ketika nilai *layer height* meningkat maka *error* dimensi juga meningkat begitu pun dengan *print speed* semakin tinggi kecepatan *print* semakin besar *error* dimensi *z* yang dihasilkan (Gambar 4.25).



Gambar 4. 25 *Surface Plot Error* dimensi z

4.2.9 Optimasi Respons *Error* Dimensi Terkecil

Optimasi kombinasi faktor untuk mencapai respons akurasi dimensi tertinggi dapat diukur melalui nilai kesalahan dimensi terkecil. Hasil optimasi yang diperoleh menggunakan perangkat lunak Minitab (Gambar 4.26) menunjukkan kombinasi level parameter proses pencetakan, yaitu tinggi lapisan 3 mm, ketebalan dinding 0,82 mm, kecepatan cetak 40 mm/s, dan diameter *nozzle* 2,80 mm. Pada grafik desirability, terdapat kurva berwarna hitam yang menggambarkan nilai d untuk masing-masing respons, sementara garis putus-putus berwarna biru menunjukkan nilai respons optimal pada nilai d tertentu.



Gambar 4. 26 Hasil Optimasi Kombinasi Parameter Mesin 3D *printing* LDM

Proses cetak spesimen optimasi dilakukan 3 kali replikasi untuk mendapatkan nilai rata-rata setiap *error* dimensi.

Tabel 4. 14 Hasil Pengukuran Spesimen Optimasi

Respons	Replikasi			Rata-rata
	1	2	3	
Error dimensi x	0,347	0,347	0,453	0,382
Error dimensi y	1,360	1,240	1,060	0,313
Error dimensi z	1,650	0,650	1,350	0,117

Hasil pengukuran spesimen optimal (Tabel 4.14) didapatkan rata-rata dari 3 kali replikasi proses cetak yaitu *error* dimensi x sebesar 0,382, *error* dimensi y sebesar 0,313, dan *error* dimensi z sebesar 0,117. Hasil pengukuran suhu dan kelembapan untuk kombinasi parameter memiliki rata-rata suhu sebesar 27,8°C dan rata-rata kelembapan 81,7%RH.

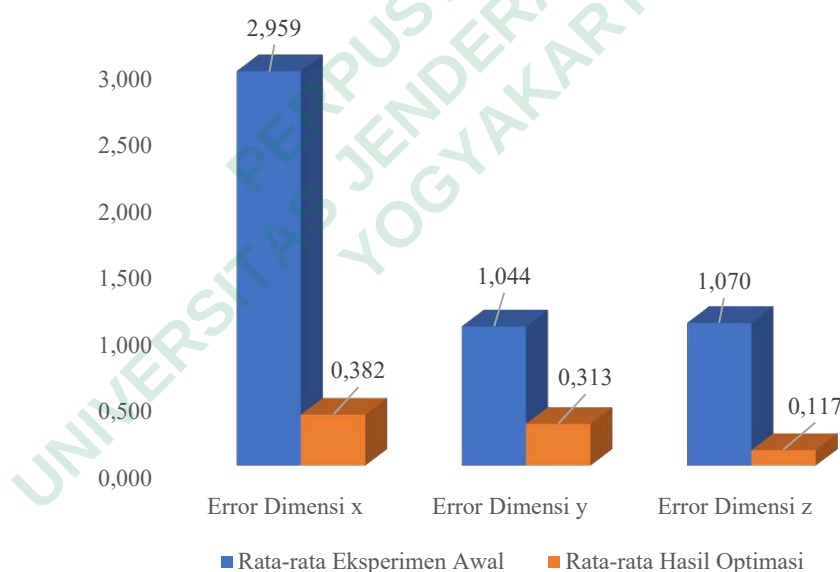
4.2.10 Uji Konfirmasi

Uji konfirmasi dilakukan untuk validasi hasil optimasi yang sudah didapat. Hasil cetak spesimen optimasi yang sudah didapat berupa rata-rata setiap *error* dimensi kemudian dilakukan perbandingan dengan rata-rata eksperimen awal setiap *error* dimensi (Tabel 4.15).

Tabel 4. 15 Selisih Hasil Eksperimen dan Hasil Optimasi

Respond	Rata-rata Eksperimen Awal	Rata-rata Hasil Optimasi	Selisih
Error Dimensi x	2,959	0,382	2,577
Error Dimensi y	1,044	0,313	0,731
Error Dimensi z	1,070	0,117	0,954

Berdasarkan tabel 4.15 menunjukkan bahwa hasil optimasi menghasilkan error dimensi yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hal ini dapat disimpulkan bahwa kombinasi parameter berdasarkan hasil optimasi dengan menggunakan metode RSM menunjukkan minimalisasi *error* dimensi pada x sebesar 2,577%, dimensi y 0,731% dan dimensi z 0,954%. Sehingga kombinasi parameter optimasi berpengaruh terhadap respons akurasi dimensi dengan ukuran dimensi yang didapatkan untuk x 25,096 mm, dimensi y 9,626 mm dan dimensi z 8,009 mm. Berikut merupakan visualisasi perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil optimasi (Gambar 4.27).

**Gambar 4. 27** Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Hasil Optimasi

Selain itu, dilakukan uji *one-sample t test* terhadap hasil optimasi untuk mengevaluasi kesesuaian antara nilai prediksi model dengan nilai hasil optimasi yang diperoleh. Uji ini bertujuan untuk memverifikasi apakah model regresi yang dikembangkan mampu memprediksi hasil optimasi secara akurat.

Hasil percobaan validasi model dibandingkan dengan nilai prediksi dengan menggunakan uji *one-sample t test*. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

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

H_0 diterima jika nilai *p-value* pada *one sample t* lebih besar dari $\alpha = 0,05$.

Dengan $\mu_0 = 0,345$ untuk respons *error* dimensi x, $\mu_0 = 1,253$ untuk *error* dimensi y, dan $\mu_0 = 0,88$ *error* dimensi z.

Tabel 4. 16 Hasil *one-sample t* Uji Konfirmasi

	Error Dimensi x	Error Dimensi y	Error Dimensi z
Nilai Prediksi	0,345	1,253	0,88
P-Value	0,405	0,741	0,374

Berdasarkan tabel 4.16 dapat disimpulkan bahwa nilai *p-value* dari hasil optimasi lebih besar dibandingkan dengan nilai level signifikansi $\alpha = 0,05$, sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil percobaan taksiran sesuai dengan hasil optimasi.

4.3 Pembahasan

4.3.1 Analisis Hasil Optimasi Material

Optimasi material dalam penelitian ini bertujuan untuk menentukan komposisi material yang optimal guna membentuk objek 3D yang diinginkan. Material yang di optimasi adalah campuran tanah liat dan aquades. Hasil optimasi menunjukkan bahwa komposisi optimal terdiri dari 300 gram tanah liat dan 125 ml aquades. Proses optimasi dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu *pumpability*, *extrudability*, dan *buildability*, ketiga pengujian tersebut berkaitan erat dengan mekanisme kerja mesin 3D LDM. Mekanisme kerja pada 3D *printing* LDM melibatkan ekstrusi material melalui *nozzle* untuk membentuk objek, yang juga dikenal sebagai mekanisme *Direct Ink Writing* (DIW). Menurut Wang *et al.*, (2024), mesin dengan mekanisme DIW memerlukan pengujian lebih lanjut untuk menghindari kegagalan cetak. Hal ini disebabkan oleh karakteristik reologi material yang diekstrusi, yang dapat mempengaruhi kualitas hasil cetak. Oleh karena itu, *pumpability*, *extrudability*, dan *buildability* dapat digunakan untuk mencegah kegagalan dalam proses pencetakan pada mesin 3D *printing* LDM.

Pumpability menggambarkan kemampuan material untuk dipompa melalui sistem mesin 3D *printing*. *Pumpability* merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kemampuan cetak suatu material, karena berkaitan dengan viskositas, konsistensi, dan ukuran partikel dari material yang digunakan (Lyu *et al.*, 2021). Jika *pumpability* tidak terpenuhi, hal ini dapat menyebabkan tingkat keausan mekanisme yang tinggi dan penyumbatan pada sistem mesin. Sebaliknya, jika *pumpability* terlalu besar, komponen yang dicetak akan rentan terhadap keruntuhan atau deformasi. Faktor terpenting yang mempengaruhi *pumpability* adalah kandungan air (Ravoor *et al.*, 2023). Material dengan kandungan air terlalu sedikit, akan menjadi kering dan keras, sehingga tidak dapat mengalir dengan lancar melalui saluran pipa. Di sisi lain, material dengan kandungan air terlalu banyak, akan menyebabkan terbentuknya pori pada hasil cetak, yang dapat mempengaruhi kekuatan material tersebut. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan pengeringan sebelum proses *printing* untuk menghilangkan kandungan air dalam tanah liat, sehingga saat penambahan aquades, kandungan air dapat dikontrol secara efektif.

Mekanisme utama pada mesin pencetak 3D dengan teknologi LDM adalah proses ekstrusi material, yang juga dikenal sebagai *extrudability*. *Extrudability* merupakan kemampuan material untuk diekstrusi melalui *nozzle* selama proses pencetakan. Parameter ini sangat penting karena menentukan seberapa baik material dapat dikeluarkan dari mesin dan membentuk lapisan-lapisan objek 3D. Jika material memiliki tingkat *extrudability* yang tinggi, maka proses pencetakan akan berjalan lancar, dan objek yang dihasilkan akan memiliki kualitas yang baik. Sebaliknya, jika *extrudability* rendah, material mungkin tidak dapat diekstrusi dengan baik, yang dapat menyebabkan penyumbatan pada *nozzle* atau ketidakakuratan dalam bentuk objek yang dicetak. Faktor-faktor penting yang dapat digunakan untuk menilai tingkat *extrudability*, yaitu rasio ukuran partikel terhadap diameter *nozzle* dan konsistensi campuran (Lyu *et al.*, 2021). Selama proses ekstrusi, laju ekstrusi material (*flow rate*) perlu diperhatikan, karena kecepatan ekstrusi yang diatur pada mesin juga mempengaruhi *extrudability*. Kecepatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan material tidak terdistribusi dengan baik,

sedangkan kecepatan yang terlalu rendah dapat menyebabkan material mengendap (Nurbaiti *et al.*, 2023).

Dalam proses pencetakan, hasil akhir ditentukan oleh kemampuan objek cetak untuk mempertahankan bentuknya, yang dikenal sebagai *buildability*. Kemampuan *buildability* dapat dicapai jika material memenuhi syarat *pumpability* dan *extrudability*. *Buildability* merujuk pada derajat deformasi dan stabilitas keseluruhan material selama proses pencetakan 3D setelah ekstrusi. Material yang digunakan dalam bentuk pasta berpotensi mengalami cacat antar lapisan atau penurunan pada lapisan cetak. Setiap lapisan cetak harus mampu mempertahankan bentuknya untuk mendukung lapisan cetak berikutnya. *Buildability* sangat penting karena berhubungan langsung dengan kualitas dan keberhasilan objek yang dicetak. Objek yang dicetak dengan material yang memiliki *buildability* baik akan memiliki struktur yang lebih kuat dan stabil, serta lebih sedikit cacat.

Dalam penelitian ini, material yang menunjukkan kemampuan *buildability* yang baik dihasilkan dari campuran 300 gram tanah liat dan 125 ml aquades. Campuran ini dianggap optimal untuk proses pencetakan karena dapat mempertahankan bentuk dan stabilitas selama proses pencetakan 3D. Kondisi optimal ini diperoleh melalui serangkaian percobaan yang menunjukkan bahwa penambahan aquades melebihi 125 ml, khususnya mencapai 300 ml, mengakibatkan penurunan kemampuan *buildability*. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kadar air dalam campuran, yang dapat menyebabkan material menjadi terlalu cair dan kehilangan kemampuan untuk mempertahankan bentuknya setelah ekstrusi. Akibatnya, material tersebut tidak dapat memenuhi syarat stabilitas dan deformasi yang diperlukan untuk mendukung lapisan cetak berikutnya.

4.3.2 Analisis Hasil Optimasi Parameter

Berdasarkan hasil analisis data optimasi, dapat disimpulkan terdapat pengaruh signifikan dari parameter proses terhadap *error* dimensi hasil cetak. Analisis statistik menunjukkan bahwa *nozzle* diameter (ND) dan interaksi antara *layer height* (LH) dengan *print speed* (PS) merupakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap *error* dimensi pada sumbu x dan sumbu z. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Perttalolo *et al.*, (2022), yang menunjukkan

bahwa nilai *layer height* memiliki pengaruh signifikan terhadap *error* dimensi tinggi, yang dalam penelitian ini merujuk pada dimensi sumbu z. Sedangkan, kecepatan cetak terbukti berpengaruh signifikan terhadap *error* dimensi panjang atau sumbu x. Sementara itu, diameter *nozzle* secara langsung memengaruhi lebar garis cetakan (*line width*) dan volume material yang diekstrusi.

Hasil pengukuran pada sumbu x dan z menunjukkan adanya kondisi *over extrusion*, yang menyebabkan *error* dimensi positif, yaitu dimensi yang lebih besar dari dimensi desain. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengukuran yang tertera pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.4 dimana terdapat hasil pengukuran yang melebihi garis horizontal. *Over extrusion* dapat mengakibatkan penurunan kualitas hasil cetak, karena material yang berlebih dapat menyebabkan deformasi dan ketidakakuratan dalam bentuk akhir produk.

Selain pengaruh dari parameter proses cetak, akurasi dimensi juga dipengaruhi oleh laju ekstrusi material (*flow rate*), yang memiliki hubungan erat dengan viskositas material. Material dengan viskositas tinggi, seperti tanah liat dengan kadar air rendah, memerlukan tekanan ekstrusi yang lebih besar untuk mencapai *flow rate* optimal. Hal ini sering kali mengakibatkan laju ekstrusi yang lebih rendah, yang dapat berkontribusi pada kondisi *under extrusion*. Sebaliknya, material dengan viskositas rendah, seperti tanah liat yang lebih cair, dapat diekstrusi dengan lebih cepat, dan berpotensi menyebabkan *over extrusion*.

Ketidaksesuaian hasil pengukuran secara signifikan terlihat pada dimensi y, di mana hasil optimasi menunjukkan rata-rata kesalahan (*error*) pada dimensi y lebih besar dibandingkan dengan dimensi desain yang diharapkan. Pada dimensi y, hasil pengukuran menunjukkan nilai lebih kecil, yaitu sebesar 9,626 mm, dibandingkan dengan nilai desain yang seharusnya adalah 10,00 mm. Hal tersebut berkaitan dengan sifat reologi material tanah liat, khususnya *yield strength* dan viskositas, yang memengaruhi kemampuan aliran dan deformasi material selama proses pencetakan. Sehingga, material cenderung mengalami penyusutan yang lebih besar pada arah dimensi y dibandingkan dengan dimensi x dan z kondisi ini disebut dengan *under extrusion*. *Under extrusion* adalah kondisi di mana jumlah material yang diekstrusi dari *nozzle* tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan

volume material, sehingga menghasilkan dimensi yang lebih pendek dari desain. Meskipun tidak terdapat parameter proses yang berpengaruh terhadap akurasi hasil cetak pada dimensi y, kondisi *under extrusion* ini dapat disebabkan oleh tingkat viskositas dan laju ekstrusi material (*flow rate*).

Berdasarkan hasil analisis koefisien determinasi, diperoleh nilai *R-squared* untuk model regresi yang menjelaskan *error* dimensi pada sumbu x sebesar 73,99%. Nilai ini menunjukkan bahwa 73,99% dari total variasi *error* dimensi pada sumbu x dapat dijelaskan oleh model regresi yang melibatkan interaksi antara diameter *nozzle*. Sementara itu, 26,01% dari variasi *error* dimensi tersebut dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak termasuk dalam model. Koefisien determinasi untuk *error* dimensi x menunjukkan pengaruh yang cukup kuat berdasarkan tabel tingkat hubungan variabel (Tabel 2.3). Hasil analisis menggunakan perangkat lunak Minitab menunjukkan bahwa nilai *R-squared* untuk *error* dimensi y adalah 46,19%. Hal ini berarti 46,19% dari variasi dalam variabel respons dapat dijelaskan oleh model regresi, sedangkan sisa 53,81% dari variasi dalam respons tidak dapat dijelaskan oleh model, yang menunjukkan bahwa parameter yang digunakan tidak cukup berpengaruh terhadap hasil *error* cetak pada sumbu y. Sedangkan hasil *R-squared error* dimensi z menunjukkan nilai sebesar 62,06% yang menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara variabel independen dan variabel respons. Nilai 62,06% ini mencerminkan variasi yang dapat dijelaskan oleh model dari interaksi antara tinggi lapisan (*layer height*) dan kecepatan cetak (*print speed*). Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa interaksi antara parameter proses dapat memengaruhi akurasi dimensi hasil cetak (Christiliana *et al.*, 2021).

Berdasarkan optimasi yang dilakukan menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM), diperoleh pengaturan parameter optimum yang terdiri dari *layer height* sebesar 3 mm, *wall thickness* sebesar 0,82 mm, *print speed* sebesar 40 mm/s, dan *nozzle* diameter sebesar 2,8 mm. Pada hasil optimasi (Gambar 4.26), terdapat nilai *composite desirability*, yaitu nilai yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik kombinasi parameter yang dioptimalkan. Nilai *composite desirability* ini berkisar antara 0 hingga 1, semakin mendekati angka 1,

maka semakin ideal kombinasi parameter yang dihasilkan. Berdasarkan hasil optimasi, nilai *desirability* yang diperoleh adalah 0,9775, yang menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang dihasilkan sudah dianggap ideal.

Variabel respons dari hasil optimasi (Tabel 4.15) menunjukkan nilai *error* dimensi pada sumbu x (panjang) sebesar 0,382%, *error* dimensi y (lebar) sebesar 0,313%, dan *error* dimensi z (tinggi) sebesar 0,117%. Selisih *error* yang terukur terhadap dimensi desain (x: 25 mm, y: 10 mm, z: 8 mm) adalah 2,577% untuk dimensi x, 0,731% untuk dimensi y, dan 0,954% untuk dimensi z. Dari hasil optimasi, diperoleh dimensi aktual rata-rata masing-masing sebesar 25,096 mm untuk dimensi x, 9,626 mm untuk dimensi y, dan 8,009 mm untuk dimensi z. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan parameter yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan akurasi dimensi hasil cetak, sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa optimasi parameter proses sangat penting dalam mencapai hasil cetak yang presisi (Setiawan *et al.*, 2018).

4.3.3 Analisis Faktor *Noise* Terhadap Respons

Selain dipengaruhi oleh parameter proses cetak, hasil cetak juga dapat dipengaruhi oleh faktor *noise*, yang dalam penelitian ini diidentifikasi sebagai suhu dan kelembapan lingkungan. Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata suhu ruang selama proses pencetakan adalah 28,36°C dan rata-rata kelembapan relatif (RH) sebesar 79,64%. Faktor-faktor lingkungan ini dapat memengaruhi sifat fisik dan reologi material, yang berdampak pada kualitas hasil cetak. Penelitian sebelumnya oleh Hasdiansah *et al.*, (2020) menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dan kelembapan dapat memengaruhi viskositas dan aliran material, yang berpotensi menyebabkan variasi dalam akurasi dimensi dan konsistensi hasil cetak.

Pada penelitian ini, suhu selama proses pencetakan tidak memberikan pengaruh langsung yang signifikan terhadap hasil cetak. Hal ini disebabkan oleh durasi setiap proses pencetakan yang relatif singkat, sehingga perubahan suhu ekstrem tidak terjadi. Selain itu, rentang suhu yang diamati dalam penelitian ini masih berada dalam kisaran suhu ruang normal, yang umumnya berkisar antara 20°C hingga 30°C. Penelitian sebelumnya oleh Rudi *et al.*, (2020) menunjukkan

bahwa suhu dalam kisaran normal tidak berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan dimensi hasil cetak.

Berbeda dengan suhu, kelembapan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap proses cetak, khususnya pada tahap *resting* spesimen setelah pencetakan. Proses *resting* bertujuan untuk menghilangkan sebagian kadar air dari spesimen sebelum tahap pengeringan lebih lanjut. Tingkat kelembapan lingkungan selama fase *resting* memiliki dampak yang signifikan terhadap waktu dan kondisi spesimen cetak. Peningkatan kelembapan dapat memperpanjang waktu *resting* yang diperlukan, sehingga idealnya proses ini dilakukan di dalam ruangan dengan kondisi lingkungan yang terkontrol untuk mencapai efisiensi optimal. Berdasarkan penelitian Fachreza *et al.*, (2021), kelembapan ideal untuk ruangan pencetakan adalah antara 40-60% RH. Namun, selama proses pencetakan, kelembapan rata-rata tercatat sebesar 79% RH, yang berpotensi memperlambat proses *resting*. Kelembapan yang tinggi ini juga dapat menyebabkan spesimen menjadi lebih rapuh dan rentan patah saat dilakukan pengukuran, akibat kandungan air yang masih tinggi di dalam material. Oleh karena itu, pengendalian kelembapan lingkungan sangat penting untuk memastikan kualitas dan ketahanan spesimen cetak, serta untuk meminimalkan risiko kerusakan selama proses pengukuran dan penanganan.