

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Cetak

Hasil cetak berupa spesimen yang dihasilkan dari proses cetak menggunakan mesin 3D *Printer* FDM. Proses cetak dilakukan dengan mengikuti tabel DoE yang dihasilkan dari *software* Minitab yaitu 24 kali proses cetak.



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. Pengukuran *error* dimensi ini dilakukan berdasarkan metode *Design of Experiments* (DoE), dan hasil pengukuran mencakup *error* dimensi pada sumbu x, y, dan z untuk total 24 spesimen. Jumlah spesimen dihasilkan dari jumlah eksperimen dikali 3 kali replikasi, sebagaimana tercatat dalam Tabel 4.1. Data mengenai *error* dimensi ini diperoleh dengan menghitung selisih antara dimensi aktual dari benda cetakan dengan dimensi yang telah direncanakan dalam desain.

Hasil pengukuran *error* dimensi yang didapatkan kemudian dimasukkan ke *software* Minitab untuk diolah.

**Tabel 4.1 Hasil Pengukuran *Error* Dimensi**

<i>Run Time</i>	X	Y	Z
1.	0,0003	0,0058	0,0383
2.	0,0017	0,0038	0,0337
3.	0,0024	0,0074	0,0051
4.	0,0013	0,0038	0,0406
5.	0,0020	0,0045	0,0554
6.	0,0015	0,0008	0,0469
7.	0,0006	0,0037	0,0297
8.	0,0007	0,0020	0,0331
9.	0,0003	0,0029	0,0309
10.	0,0018	0,0074	0,0331
11.	0,0037	0,0099	0,0114
12.	0,0017	0,0032	0,0360
13.	0,0016	0,0034	0,0160
14.	0,0022	0,0022	0,0434
15.	0,0006	0,0002	0,0383
16.	0,0009	0,0002	0,0349
17.	0,0009	0,0015	0,0389
18.	0,0036	0,0082	0,0149
19.	0,0024	0,0072	0,0314
20.	0,0006	0,0011	0,0394
21.	0,0010	0,0075	0,0526
22.	0,0007	0,0029	0,0200
23.	0,0009	0,0006	0,0291
24.	0,0009	0,0035	0,0337
Rata-rata	0,0014	0,0039	0,0328

Hasil pengukuran *error* dimensi pada 24 spesimen hasil cetak, seperti yang tercantum dalam Tabel 4.1, menghasilkan rata-rata *error* dimensi x 0,0014, rata-rata *error* dimensi y 0,0039, dan rata-rata *error* dimensi z 0,0328. Rata-rata dari masing-masing *error* dimensi ini digunakan dalam analisis (DoE) untuk membandingkan dengan hasil optimasi.

Pengukuran kekerasan permukaan juga dilakukan pada spesimen hasil cetak menggunakan alat durometer. Hasil pengukuran digunakan untuk mencari nilai

rata-rata kekerasan permukaannya. Kemudian data hasil rata-rata dicari nilai tertinggi.

**Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Kekerasan Permukaan**

No	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Rata-rata
1	62	60	60	60	59	60,2
2	64	66	67	64	64	65
3	66	65	66	63	66	65,2
4	63	62	63	64	64	63,2
5	67	64	68	67	66	66,4
6	63	61	64	64	63	63
7	65	67	66	64	63	65
8	64	66	61	63	64	63,6
9	63	62	63	64	60	62,4
10	66	66	63	68	67	66
11	67	68	66	66	64	66,2
12	66	68	68	66	67	67
13	66	66	64	65	67	65,6
14	64	67	66	62	65	64,8
15	63	65	64	67	64	64,6
16	65	65	64	67	65	65,2
17	63	64	62	63	66	63,6
18	67	64	66	63	66	65,2
19	66	67	68	64	64	65,8
20	65	67	67	66	66	66,2
21	63	66	65	65	66	65
22	64	63	64	66	64	64,2
23	66	67	67	66	67	66,6
24	64	68	67	64	65	65,6
<b>Rata-rata</b>	64,67	65,16	64,95	64,62	64,67	

## 4.2 Analistik Statistik

### 4.2.1 Analisis Pengaruh Variabel Bebas Terhadap Variabel Respon

ANOVA untuk masing-masing *error* dimensi didapatkan dari analisis menggunakan *software* minitab. Pengujian signifikansi statistik dari variabel bebas terhadap variabel respon menggunakan ANOVA. Dalam penelitian ini, variabel bebas yang diuji meliputi *fill density*, *fill pattern* dan *temperature printing*. Sedangkan untuk variabel terikatnya adalah respon *error* dimensi x,y,z dan

kekerasan permukaan. Signifikansi merujuk pada sejauh mana probabilitas kesalahan dalam pengambilan keputusan. Hasil *output* dari tabel ANOVA yang dihasilkan melalui pengolahan data menggunakan *software* Minitab menghasilkan nilai *P-value*. *P-value* adalah ukuran yang digunakan untuk menilai signifikansi statistik apakah variabel bebas memiliki pengaruh yang signifikansi terhadap respon. Jika nilai *P-value* lebih kecil dari tingkat signifikansi yang telah ditetapkan ( $\alpha = 0,05$ ), maka variabel bebas dianggap memiliki signifikansi statistik. Tingkat signifikansi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0,05, yang berarti bahwa hasil riset memiliki tingkat peluang untuk benar sebesar 95% dan tingkat kesalahan maksimum sebesar 5% (toleransi kesalahan).

**Tabel 4.3 ANOVA Error Dimensi x**

<i>Source</i>	<i>DF</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F-Value</i>	<i>P-Value</i>
Model	7	0,000014	0,000002	5,54	0,002
Linear	3	0,000002	0,000001	2,1	0,14
TP	1	0	0	0,08	0,787
FP	1	0	0	0,12	0,736
FD	1	0,000002	0,000002	6,11	0,025
2-Way Interactions	3	0,000006	0,000002	6	0,006
TP*FP	1	0,000004	0,000004	11,1	0,004
TP*FD	1	0	0	0,01	0,908
FP*FD	1	0,000002	0,000002	6,88	0,018
3-Way Interactions	1	0,000005	0,000005	14,46	0,002
TP*FP*FD	1	0,000005	0,000005	14,46	0,002
Error	16	0,000006	0		
Total	23	0,00002			

Berdasarkan hasil ANOVA pada *error* dimensi x (Tabel 4.3), dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang memiliki *P-value* kurang dari  $\alpha$  (tingkat signifikansi) adalah *fill density*, interaksi antara *temperature printing* dan *fill pattern*, interaksi antara *temperature printing fill pattern* dan *fill density*. Oleh karena itu, secara statistik faktor-faktor ini dianggap signifikan terhadap respon

*error* dimensi x. Sementara itu, untuk variabel-variabel lainnya, *P-value* yang diperoleh lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ , yang mengindikasikan bahwa variabel-variabel tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon *error* dimensi x.

**Tabel 4.4 ANOVA *Error* Dimensi y**

<i>Source</i>	<b>DF</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Value</b>	<b>P-Value</b>
Model	7	0,000124	0,000018	5,3	0,003
Linear	3	0,000053	0,000018	5,24	0,01
TP	1	0,00001	0,00001	3,01	0,102
FP	1	0,000003	0,000003	0,82	0,378
FD	1	0,00004	0,00004	11,89	0,003
2-Way <i>Interactions</i>	3	0,000017	0,000006	1,7	0,206
TP*FP	1	0,000009	0,000009	2,66	0,123
TP*FD	1	0	0	0,01	0,906
FP*FD	1	0,000008	0,000008	2,44	0,138
3-Way <i>Interactions</i>	1	0,000054	0,000054	16,26	0,001
TP*FP*FD	1	0,000054	0,000054	16,26	0,001
<i>Error</i>	16	0,000054	0,000003		
Total	23	0,000178			

Berdasarkan hasil ANOVA pada *error* dimensi y (Tabel 4.4), dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang memiliki *P-value* kurang dari  $\alpha$  (tingkat signifikansi) adalah *fill density*, serta interaksi antara *temperature printing*, *fill pattern* dan *fill density*. Sementara itu, untuk variabel-variabel lainnya, *P-value* yang diperoleh lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ , yang mengindikasikan bahwa variabel-variabel tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon *error* dimensi y.

**Tabel 4.5 ANOVA Error Dimensi z**

<i>Source</i>	<b>DF</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Value</b>	<b>P-Value</b>
Model	7	0,001343	0,000192	1,46	0,251
Linear	3	0,000463	0,000154	1,17	0,351
TP	1	0,000044	0,000044	0,34	0,57
FP	1	0,000156	0,000156	1,18	0,292
FD	1	0,000263	0,000263	1,99	0,177
<i>2-Way Interactions</i>	3	0,00064	0,000213	1,62	0,224
TP*FP	1	0,000528	0,000528	4,01	0,062
TP*FD	1	0,000108	0,000108	0,82	0,379
FP*FD	1	0,000004	0,000004	0,03	0,864
<i>3-Way Interactions</i>	1	0,00024	0,00024	1,83	0,195
TP*FP*FD	1	0,00024	0,00024	1,83	0,195
Error	16	0,002106	0,000132		
Total	23	0,00345			

Berdasarkan hasil ANOVA pada *error* dimensi z (Tabel 4.5), dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang memiliki *P-value* yang diperoleh lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ , yang mengindikasikan bahwa variabel-variabel tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon *error* dimensi z.

**Tabel 4.6 ANOVA Kekerasan Permukaan**

<b>Source</b>	<b>DF</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Value</b>	<b>P-Value</b>
Model	7	32,6867	4,6695	3,37	0,021
Linear	3	7,6067	2,5356	1,83	0,183
TP	1	0,24	0,24	0,17	0,683
FP	1	6,8267	6,8267	4,92	0,041
FD	1	0,54	0,54	0,39	0,541
<i>2-Way Interactions</i>	3	16,9133	5,6378	4,07	0,025
TP*FP	1	2,4067	2,4067	1,74	0,206
TP*FD	1	10,6667	10,6667	7,69	0,014
FP*FD	1	3,84	3,84	2,77	0,116
<i>3-Way Interactions</i>	1	8,1667	8,1667	5,89	0,027
TP*FP*FD	1	8,1667	8,1667	5,89	0,027
Error	16	22,1867	1,3867		
Total	23	54,8733			

Berdasarkan hasil ANOVA pada kekerasan permukaan (Tabel 4.6), dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang memiliki *P-value* kurang dari  $\alpha$  (tingkat signifikansi) adalah *fill pattern*, interaksi antara *temperature printing* dan *fill density*, serta interaksi antara *temperature printing*, *fill pattern* dan *fill density*. Sementara itu, untuk variabel-variabel lainnya, *P-value* yang diperoleh lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ , yang mengindikasikan bahwa variabel-variabel tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon kekerasan permukaan.

#### 4.2.2 Penentuan Model Regresi

Model regresi digunakan untuk memahami kaitan antara faktor atau variabel bebas dan respons. Dalam analisis yang dilakukan dengan *software* Minitab, maka diperoleh model regresi untuk setiap *error* dimensi.

- a. Model regresi *error* dimensi x

$$\begin{aligned} \text{Error dimensi x} = & 0,001431 + 0,000034 \text{ TP} - 0,000042 \text{ FP} - 0,000302 \text{ FD} \\ & - 0,000407 \text{ TP*FP} \quad - 0,000014 \text{ TP*FD} \quad - 0,000321 \text{ FP*FD} \\ & + 0,000465 \text{ TP*FP*FD} \end{aligned}$$

- b. Model regresi *error* dimensi y

$$\begin{aligned} \text{Error dimensi y} = & 0,003904 - 0,000648 \text{ TP} - 0,000339 \text{ FP} - 0,001288 \text{ FD} \\ & - 0,000609 \text{ TP*FP} \quad - 0,000045 \text{ TP*FD} \quad - 0,000584 \text{ FP*FD} \\ & + 0,001507 \text{ TP*FP*FD} \end{aligned}$$

- c. Model regresi *error* dimensi z

$$\begin{aligned} \text{Error dimensi z} = & 0,03278 + 0,00136 \text{ TP} - 0,00255 \text{ FP} + 0,00331 \text{ FD} \\ & + 0,00469 \text{ TP*FP} - 0,00212 \text{ TP*FD} - 0,00041 \text{ FP*FD} - 0,00316 \text{ TP*FP*FD} \end{aligned}$$

- d. Model regresi kekerasan permukaan

$$\begin{aligned} \text{Kekerasan permukaan} = & 64,817 + 0,100 \text{ TP} + 0,533 \text{ FP} + 0,150 \text{ FD} \\ & - 0,317 \text{ TP*FP} - 0,667 \text{ TP*FD} - 0,400 \text{ FP*FD} + 0,583 \text{ TP*FP*FD} \end{aligned}$$

Nilai koefisien positif pada variabel bebas menunjukkan bahwa jika nilai variabel tersebut meningkat satu satuan, maka nilai variabel respon juga akan meningkat sebesar nilai koefisien variabel independen tersebut. Sebaliknya, jika koefisien variabel bebas negatif, peningkatan satu satuan pada variabel tersebut akan mengakibatkan penurunan sebesar nilai koefisien variabel independen.

Langkah selanjutnya setelah mengetahui hubungan antara faktor atau variabel bebas dengan respon adalah menghitung nilai koefisien determinasi atau  $R^2$  (*R-square*) untuk setiap variabel respon.  $R^2$  digunakan untuk menilai seberapa besar pengaruh faktor atau variabel bebas terhadap variabel respon. Semakin kecil nilai  $R^2$ , maka semakin sedikit variasi yang dapat dijelaskan oleh model terhadap respons. Di sisi lain, jika semakin tinggi nilai  $R^2$  menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan variasi respon dengan baik, berdasarkan faktor atau interaksi yang digunakan.

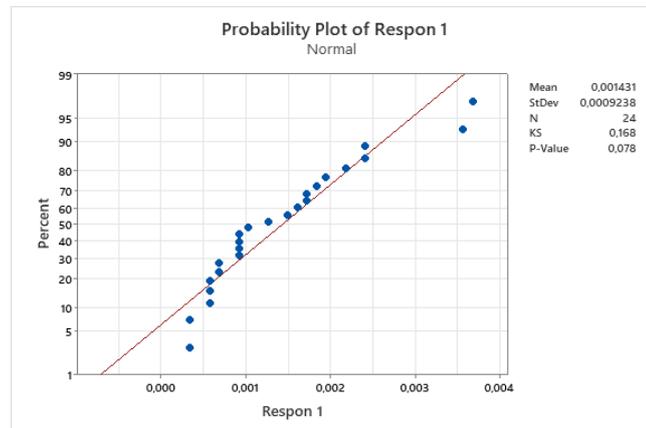
Nilai  $R^2$  dari persamaan regresi dapat ditemukan dalam model *summary* yang dihasilkan oleh *software* Minitab. Nilai  $R^2$  ini mencerminkan sejauh mana model mampu menjelaskan variasi pada respons untuk setiap *error* dimensi (tabel 4.7).

**Tabel 4.7 Nilai R-Square**

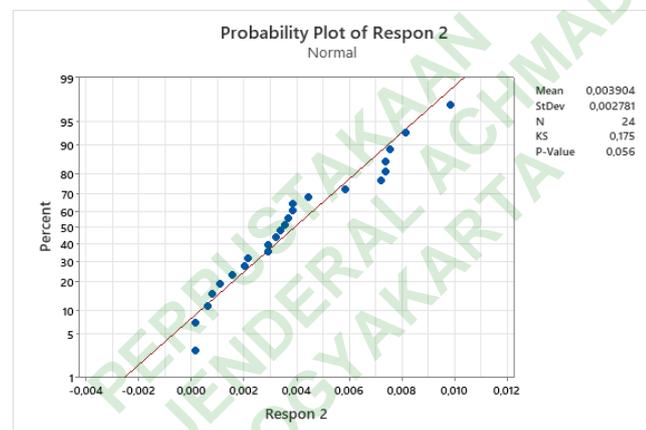
Variabel Respon	Nilai R-Square
<i>Error</i> dimensi x	70,78%
<i>Error</i> dimensi y	69,87%
<i>Error</i> dimensi z	38,94%
Kekerasan permukaan	57,59%

### 4.2.3 Uji Distribusi Normal

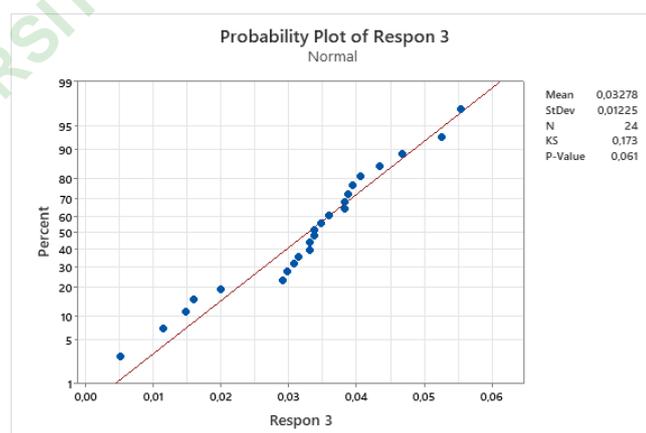
Uji normalitas distribusi dilakukan dengan menggunakan grafik normal *probability plot* yang dihasilkan oleh *software* Minitab. Grafik ini berguna untuk memeriksa apakah asumsi, bahwa residual memiliki distribusi normal dapat terpenuhi. Jika residual tidak mengikuti distribusi normal, maka keakuratan interval kepercayaan dan nilai P dapat terganggu. Uji normalitas ini menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov*.



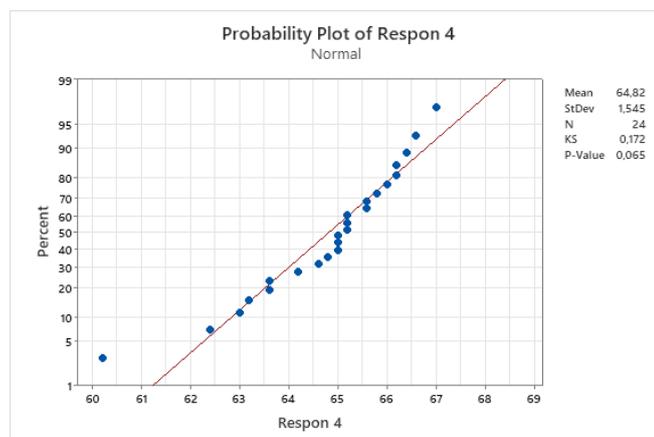
Gambar 4.2 Grafik *Probability Plot Residual Error Dimensi x*



Gambar 4.3 Grafik *Probability Plot Residual Error Dimensi y*



Gambar 4.4 Grafik *Probability Plot Residual Error Dimensi z*



Gambar 4.5 Grafik *Probability Plot Residual Kekerasan Permukaan*

Grafik normal *probability plot* pada respon *error* dimensi x (gambar 4.2), *error* dimensi y (gambar 4.3), *error* dimensi z (gambar 4.4), dan nilai kekerasan permukaan (gambar 4.5) menggambarkan nilai-nilai P dari uji normalitas yang diterapkan pada grafik tersebut.

Tabel 4.8 *P-Value Uji Normalitas Kolmogorov-Smirnov Test*

Respon	P-value	$\alpha$
Error dimensi x	0,078	0,05
Error dimensi y	0,056	0,05
Error dimensi z	0,061	0,05
Kekerasan permukaan	0,065	0,05

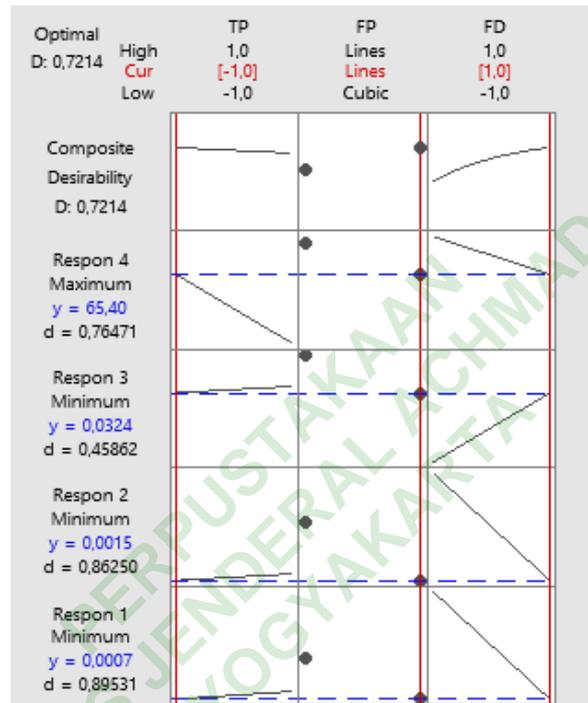
*P-value* hasil uji normalitas (dalam tabel 4.8) menunjukkan bahwa *P-value* untuk *error* dimensi x sebesar 0,078, *error* dimensi y sebesar 0,056, *error* dimensi z adalah 0,061, dan nilai kekerasan permukaan adalah 0,065, yang lebih besar dari tingkat signifikansi  $\alpha=0,05$ . Ini mengindikasikan bahwa residual dalam dimensi x, y, z, dan kekerasan permukaan terdistribusi secara normal.

Dengan demikian, hasil-hasil ini menunjukkan bahwa residual dalam semua dimensi terdistribusi normal. Karena asumsi distribusi telah terpenuhi, maka analisis signifikansi yang telah dilakukan dapat dianggap valid.

### 4.3 Optimasi kombinasi faktor untuk respon *error* dimensi terkecil dan nilai kekerasan tertinggi

Sebuah proses optimasi dilakukan dengan merancang kombinasi terbaik dari faktor-faktor atau parameter-parameter dalam proses cetak mesin 3D printer untuk

mencapai tingkat *error* dimensi yang terkecil dan nilai kekerasan permukaan tertinggi. Hasil dari optimasi ini, yang diperoleh dari *software* Minitab (gambar 4.6), mendapatkan kombinasi level parameter proses cetak yang optimal. Kombinasi ini mencakup *temperature printing* 235 °C, *fill pattern lines*, dan *fill density* 25%.



Gambar 4.6 Hasil Kombinasi Optimasi

Pada proses pencetakan spesimen yang telah dioptimalkan, dilakukan tiga kali replikasi untuk menghasilkan nilai rata-rata dari setiap respon *error* dimensi dan nilai kekerasan permukaan.

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Optimasi Spesimen

Respon	Replikasi			Rata-rata
	1	2	3	
<i>Error</i> dimensi x	0,0008	0,0007	0,0010	0,0008
<i>Error</i> dimensi y	0,0031	0,0002	0,0002	0,0010
<i>Error</i> dimensi z	0,0286	0,0366	0,0229	0,0293
Kekerasan permukaan	66,4	67,8	67,8	67,3333

Hasil pengukuran spesimen yang telah mengalami proses optimasi (Tabel 4.9) mengindikasikan bahwa rata-rata dari tiga kali replikasi proses pencetakan

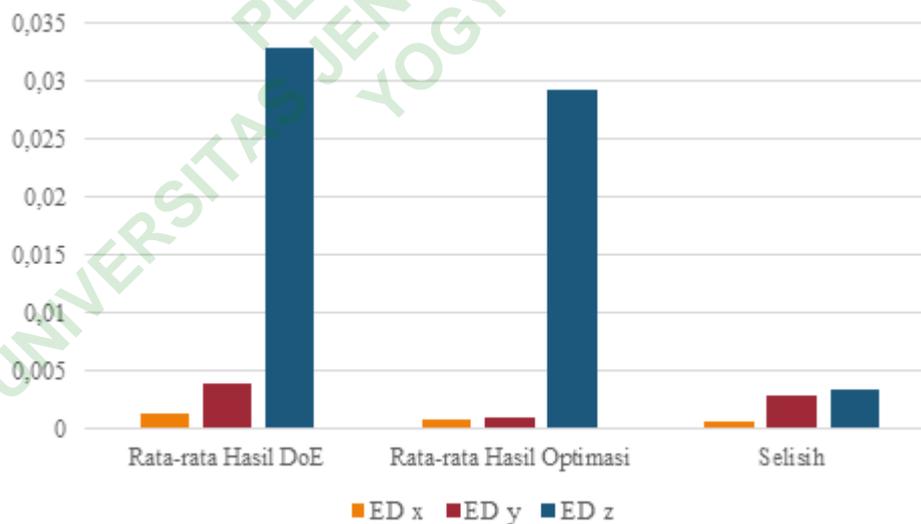
adalah sebagai berikut: *error* dimensi x sebesar 0,0008, *error* dimensi y sebesar 0,0010, *error* dimensi z sebesar 0,0293, dan nilai kekerasan permukaan sebesar 67,333.

#### 4.4 Uji Konfirmasi

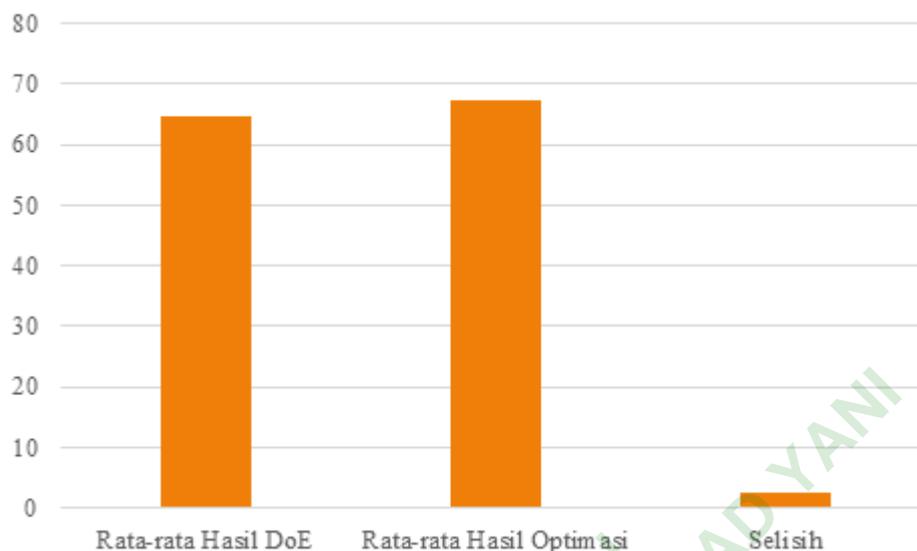
Uji konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi hasil dari proses optimasi yang telah dilakukan sebelumnya. Hasil yang diperoleh dari cetak spesimen yang telah dioptimalkan adalah nilai rata-rata dari setiap *error* dimensi. Kemudian, hasil ini dibandingkan dengan nilai rata-rata dari hasil dari eksperimen desain eksperimen sebelumnya (DoE) untuk setiap *error* dimensi.

**Tabel 4.10 Perbandingan Hasil DoE dengan Hasil Optimasi**

Respon	Rata-rata Hasil DoE	Rata-rata Hasil Optimasi	Selisih
<i>Error</i> dimensi x	0,0014	0,0008	0,0006
<i>Error</i> dimensi y	0,0039	0,0010	0,0029
<i>Error</i> dimensi z	0,0328	0,0293	0,0035
Kekerasan permukaan	64,816	67,3333	2,5173



**Gambar 4.7 Perbandingan *Error* Dimensi Hasil DoE dengan Hasil Optimasi**



**Gambar 4.8 Perbandingan Nilai Kekerasan Permukaan Hasil DoE dengan Hasil Optimasi**

Selisih dari hasil perbandingan DoE dengan hasil optimasi yaitu *error* dimensi x menunjukkan bahwa hasil optimasi lebih rendah dibandingkan hasil DoE dengan selisih yaitu 0,0006 yang artinya hasil optimasi lebih baik dari hasil DoE. Pada *error* dimensi y menunjukkan bahwa hasil optimasi lebih rendah dibandingkan hasil DoE dengan selisih yaitu 0,0029, yang artinya hasil optimasi lebih baik dari hasil DoE. Pada *error* dimensi z menunjukkan bahwa hasil optimasi lebih rendah dibandingkan hasil DoE dengan selisih yaitu 0,0035 yang artinya hasil optimasi lebih baik dari hasil DoE. Pada kekerasan permukaan menunjukkan bahwa hasil optimasi lebih tinggi dibandingkan hasil DoE dengan selisih yaitu 2,5173 yang artinya hasil optimasi lebih baik dari hasil DoE.

Hasil kombinasi parameter yang optimal dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas hasil cetak 3D *printing* pada material PETG. Hal ini dapat bermanfaat untuk berbagai aplikasi, seperti pembuatan prototipe, produk manufaktur, dan karya seni.