

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Cetak

Hasil cetak spesimen menggunakan *Desain of Eksperimen* $L_9(3^4)$ (tabel 3.5) dengan dimensi spesimen 20 mm x 12 mm x 7 mm (gambar 3.1) dengan tiga kali replikasi pada setiap baris eksperimennya. Jumlah spesimen yang dicetak pada setiap replikasinya ialah 9 spesimen, sehingga total spesimen yang dicetak sejumlah 27 spesimen (gambar 4.1). Spesimen hasil cetak diberi penomoran sesuai dengan urutan DOE dan urutan replikasi, dimana A untuk replikasi pertama, B untuk replikasi kedua, dan C untuk replikasi ketiga.



Gambar 4.1 Hasil Cetak Spesimen

Semua spesimen hasil cetak kemudian diukur dengan akurasi dimensi x ialah 20 mm, dimensi y ialah 12 mm, dan dimensi z ialah 7 mm dengan titik pengukuran seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2. Hasil pengukuran pada titik pengukuran tersebut kemudian dirata-rata (Lampiran 2) dan hasil pengukuran pada ketiga replikasi juga dirata-ratakan. Hasil pengukuran dimensi x, y dan z ditunjukkan pada tabel 4.1 sampai tabel 4.3.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Dimensi x

Run Time	Replikasi			Rata-rata
	1	2	3	
1	19.62	19.60	19.52	19.58
2	19.72	19.80	19.82	19.78

3	19.80	18.72	19.80	19.44
4	19.60	19.68	19.70	19.66
5	19.68	19.71	19.72	19.70
6	19.80	20	20	19.93
7	19.60	19.82	19.70	19.71
8	19.68	19.68	19.60	19.65

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Dimensi y

Run Time	Replikasi			Rata-rata
	1	2	3	
1	12.10	12.16	12.20	12.15
2	12.30	12.36	12.36	12.34
3	12.36	12.30	12.36	12.34
4	12.10	12.16	12.16	12.14
5	12.30	12.24	12.30	12.28
6	12.36	12.46	12.36	12.39
7	12.10	12.36	12.16	12.21
8	12.30	12.30	12.16	12.25
9	12.46	12.36	12.36	12.39

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Dimensi z

Run Time	Replikasi			Rata-rata
	1	2	3	
1	6.80	6.48	6.72	6.67
2	6.80	6.48	7.26	6.85
3	6.54	6.68	6.70	6.64
4	6.80	6.70	6.58	6.69
5	6.80	6.40	6.60	6.60
6	6.50	6.50	6.70	6.57
7	6.54	6.30	6.88	6.57
8	6.70	6.40	6.80	6.63
9	6.70	6.70	6.78	6.73

Nilai hasil replikasi dan nilai rata-rata pada tabel-tabel diatas, kemudian dimasukkan kedalam *software* minitab 17 untuk dilakukan pengolahan data.

4.2 Hasil Analisis

4.2.1 Rasio S/N (*Signal to Noise Ratio*) terhadap Respon

Perhitungan nilai rasio S/N pada metode taguchi dilakukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap respon. Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan menggunakan *software* minitab 17, dimana nilai pada tabel 4.1, tabel 4.2, dan tabel 4.3 digunakan sebagai data masukan untuk mendapatkan nilai Rasio S/N terhadap respons. Penelitian ini menggunakan karakteristik rasio S/N *nominal is best* untuk memperoleh parameter proses agar dapat menghasilkan dimensi yang mendekati ukuran spesimen 20 mm x 12 mm x

7 mm (gambar 3.1). Nilai rasio S/N pada setiap baris percobaan didapatkan berdasarkan perhitungan rasio S/N *nominal is best* (rumus 2.1) dan tabel 4.1 sampai 4.3 digunakan sebagai data masukan untuk masing-masing respons. Adapun perhitungan rasio S/N *nominal is best* untuk respon akurasi dimensi x pada eksperimen pertama ialah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \bar{y}^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \\
 \bar{y}^2 &= \frac{19.62^2 + 19.60^2 + 19.52^2}{3} \\
 \bar{y}^2 &= 383.37827 \\
 \bullet \quad s^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\
 s^2 &= \frac{(19.62-19.58)^2 + (19.60-19.58)^2 + (19.52-19.58)^2}{3-1} \\
 s^2 &= \frac{(0.04)^2 + (0.02)^2 + (-0.06)^2}{2} \\
 s^2 &= 0.0028 \\
 \bullet \quad S/N_1 &= 10 \times \log 10 \left[\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right] \quad (2.1) \\
 S/N_1 &= 10 \times \log 10 \left[\frac{383.37827}{0.0028} \right] \\
 S/N_1 &= 51.36
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan rasio S/N pada respon akurasi dimensi x, dimensi y, dan dimensi z ditunjukkan pada tabel-tabel dibawah ini :

Tabel 4.4 Nilai Rasio S/N Dimensi x

Run Time	Parameter				Rata-rata	SNR
	NT	LH	ID	PS		
1	195°C	0.10 mm	60%	30 mm/s	19.58	51.36
2	195°C	0.15 mm	80%	35 mm/s	19.78	51.45
3	195°C	0.20 mm	100%	50 mm/s	19.44	29.88
4	200°C	0.10 mm	80%	50 mm/s	19.66	51.40
5	200°C	0.15 mm	100%	30 mm/s	19.72	59.52
6	200°C	0.20 mm	60%	35 mm/s	19.93	44.74
7	205°C	0.10 mm	100%	35 mm/s	19.71	45.05
8	205°C	0.15 mm	60%	50 mm/s	19.65	52.58
9	205°C	0.20 mm	80%	30 mm/s	19.81	64.69

Tabel 4.5 Nilai Rasio S/N Dimensi y

Run Time	Parameter				Rata-rata	SNR
	NT	LH	ID	PS		
1	195°C	0.10 mm	60%	30 mm/s	12.15	47.66
2	195°C	0.15 mm	80%	35 mm/s	12.34	51.03
3	195°C	0.20 mm	100%	50 mm/s	12.34	51.03
4	200°C	0.10 mm	80%	50 mm/s	12.14	50.89
5	200°C	0.15 mm	100%	30 mm/s	12.28	50.99
6	200°C	0.20 mm	60%	35 mm/s	12.39	46.64
7	205°C	0.10 mm	100%	35 mm/s	12.21	39.05
8	205°C	0.15 mm	60%	50 mm/s	12.25	43.61
9	205°C	0.20 mm	80%	30 mm/s	12.39	46.64

Tabel 4.6 Nilai Rasio S/N Dimensi z

Run Time	Parameter				Rata-rata	SNR
	NT	LH	ID	PS		
1	195°C	0.10 mm	60%	30 mm/s	6.67	32.05
2	195°C	0.15 mm	80%	35 mm/s	6.85	24.85
3	195°C	0.20 mm	100%	50 mm/s	6.64	37.64
4	200°C	0.10 mm	80%	50 mm/s	6.69	35.67
5	200°C	0.15 mm	100%	30 mm/s	6.60	30.37
6	200°C	0.20 mm	60%	35 mm/s	6.57	35.10
7	205°C	0.10 mm	100%	35 mm/s	6.57	27.07
8	205°C	0.15 mm	60%	50 mm/s	6.63	30.07
9	205°C	0.20 mm	80%	30 mm/s	6.73	43.27

Hasil pengolahan data nilai rasio S/N dan *means plot* terhadap respon ditunjukkan pada gambar 4.2 sampai gambar 4.7 dan tabel 4.7 sampai tabel 4.12. Adapun analisis nilai rasio S/N terhadap respon akurasi dimensi x yang diolah menggunakan *software* minitab 17 menghasilkan tabel nilai rasio S/N pada masing-masing level dan *ranking* pengaruh parameter proses terhadap respon berdasarkan nilai rasio S/N (tabel 4.7). *Ranking* parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respons ditentukan berdasarkan nilai delta pada *response table* rasio S/N. Delta ialah selisih antara nilai rata-rata rasio S/N terbesar dengan nilai rata-rata rasio S/N terkecil. Pada tabel *response* rasio S/N semakin besar nilai delta menunjukan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respons.

Tabel 4.7 Response Table For S/N Ratio Dimensi x

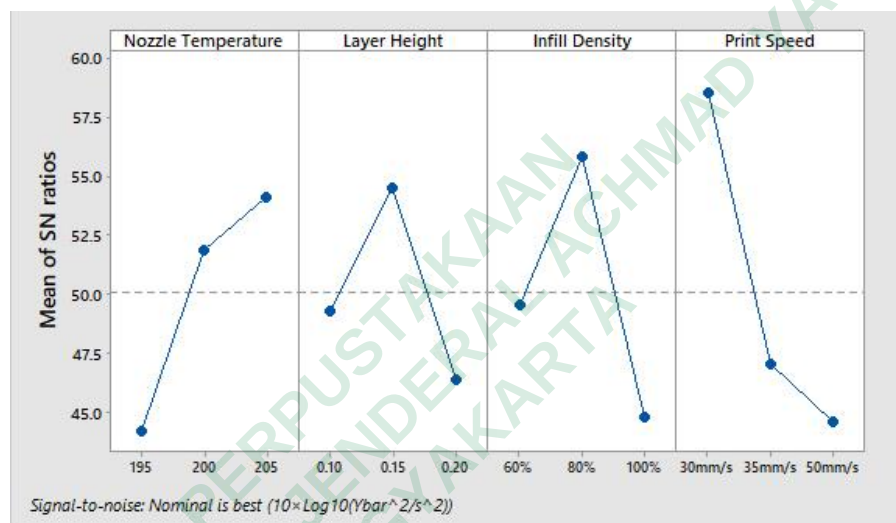
Level	Nozzle Temperature	Layer Height	Infill Density	Print Speed
1	44.23	49.27	49.56	58.03
2	51.89	54.52	55.85	47.08
3	54.11	46.44	44.82	44.62
Delta	9.87	8.08	11.03	13.91
Rank	3	4	2	1

Berdasarkan nilai delta rasio S/N dimensi x (tabel 4.7) nilai rasio S/N dengan kriteria *nominal is best* menunjukkan urutan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi x ialah *print speed*, *infill density*, *nozzle temperature*, dan *layer height* yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap akurasi dimensi x. Parameter proses *print speed* memiliki pengaruh paling besar terhadap respons dimensi x, hal tersebut dapat dilihat dari nilai rata-rata dan nilai rasio S/N (tabel 4.4) yang menunjukkan perubahan nilai level *print speed* berpengaruh terhadap nilai rata-rata dan nilai rasio S/N. Pada saat nilai level *print speed* ditingkatkan (50 mm/s) akurasi dimensi menurun dengan variabilitas yang tinggi karena nilai rasio S/N kecil, sedangkan pada nilai level *print speed* diturunkan (30 mm/s) menunjukkan nilai rata-rata yang mendekati nilai target dengan variabilitas yang lebih rendah karena memiliki nilai rasio S/N yang paling besar. *Print speed* yang lebih tinggi dapat menyebabkan lapisan tidak menempel dengan baik atau adhesi antar layer kurang optimal, sehingga dapat menyebabkan penyusutan dimensi.

Urutan kedua parameter proses yang berpengaruh terhadap respons dimensi x ialah *infill density*. Kerapatan pada bagian internal objek berpengaruh terhadap kekuatan struktur spesimen dan kestabilan dimensi atau tingkat penyusutan. Berdasarkan nilai rata-rata dan nilai rasio S/N *infill density* dengan nilai level 80% memiliki kestabilan dimensi dan variabilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai level lainnya. Urutan ketiga parameter proses yang berpengaruh terhadap respons dimensi x ialah *Nozzle Temperature*. Suhu ekstrusi yang terlalu rendah dapat menyebabkan lelehan filament yang tidak stabil, sedangkan suhu ekstrusi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan filament meleleh berlebihan yang akan mempengaruhi dimensi hasil cetak seperti terjadi pemuaian atau pelebaran dimensi. Pada penelitian ini nilai level *nozzle temperature* yang menghasilkan dimensi spesimen yang mendekati nilai target dengan variabilitas yang rendah ialah pada nilai level 205°C. *layer height* yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap akurasi dimensi x karena perubahan nilai level parameter proses *layer height* tidak berpengaruh signifikan (tabel 4.4) dimana hasil eksperimen menunjukkan perubahan nilai level tersebut tidak memiliki perubahan yang signifikan terhadap nilai rata-

rata atau nilai rasio S/N. Tinggi lapisan biasanya dapat mempengaruhi keakuratan dimensi karena jumlah lapisan dan kualitas lapisan yang dihasilkan.

Nilai level parameter proses yang optimal dari faktor-faktor tersebut dapat ditentukan dengan melihat grafik nilai rasio S/N untuk respon akurasi dimensi x (gambar 4.2). Nilai level parameter proses yang optimal pada grafik rasio S/N ditentukan berdasarkan nilai rasio S/N yang paling besar, nilai tersebut menunjukkan bahwa nilai faktor yang dapat dikontrol (*signal*) lebih besar dari pada nilai faktor gangguan (*noise*) yang berarti variabilitas pada produk atau proses lebih rendah.



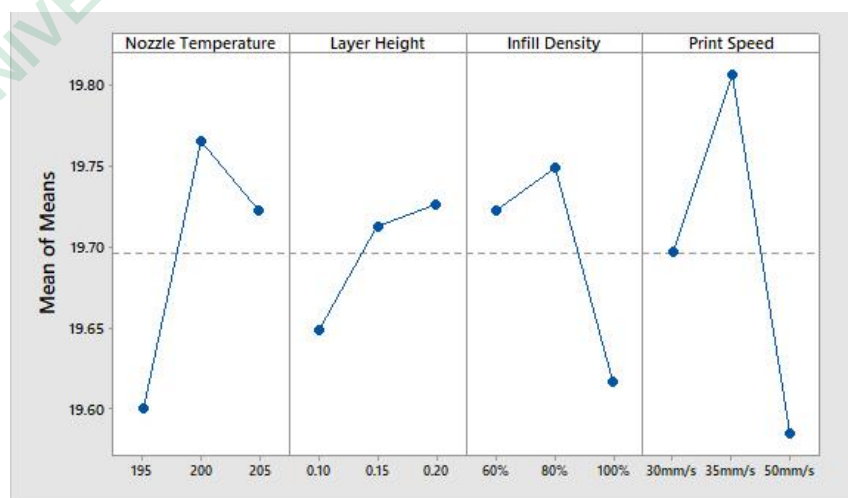
Gambar 4.2 Grafik Rasio S/N Respon Dimensi x

Berdasarkan gambar grafik rasio S/N respon dimensi x (gambar 4.2) nilai rasio S/N paling tinggi atau yang paling besar dijadikan acuan untuk memilih nilai level parameter proses yang optimal. Nilai level parameter proses optimal untuk mendapatkan respon akurasi dimensi x berdasarkan nilai rasio S/N pada grafik tersebut adalah *nozzle temperature* 205°C, *layer height* 0.15 mm, *infill density* 80%, dan *print speed* 30 mm/s.

Tabel 4.8 Response Means Plot Table Dimensi x

Level	Nozzle Temperature	Layer Height	Infill Density	Print Speed
1	19.60	19.65	19.72	19.70
2	19.77	19.71	19.75	19.81
3	19.72	19.73	19.62	19.58
Delta	0.17	0.08	0.13	0.22
Rank	2	4	3	1

Berdasarkan nilai delta *means plot* (tabel 4.8) urutan parameter proses yang berpengaruh untuk mendapatkan nilai akurasi dimensi x yang sesuai dengan nilai target ialah *print speed*, *nozzle temperature*, *infill density*, dan *layer height* yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap akurasi dimensi x. *print speed* memiliki pengaruh paling besar untuk menghasilkan nilai rata-rata yang mendekati akurasi dimensi x karena perubahan nilai level *print speed* pada setiap eksperimen menunjukkan perubahan nilai rata-rata eksperimen, pada saat nilai level *print speed* 35 mm/s menghasilkan nilai rata-rata yang stabil mendekati nilai target dimensi x tetapi variabilitas yang dihasilkan tidak stabil, sedangkan saat *print speed* 50 mm/s menunjukkan akurasi dimensi yang menurun. Pada urutan kedua parameter proses yang berpengaruh untuk mendapatkan nilai rata-rata yang mendekati nilai target dimensi x ialah *Nozzle temperature*. *nozzle temperature* 200°C menghasilkan nilai rata-rata yang paling mendekati nilai target dibandingkan dengan nilai level lainnya (tabel 4.4). Urutan ketiga parameter proses yang berpengaruh untuk mendapatkan nilai rata-rata yang mendekati nilai target yaitu *infill density*. *Infill density* dapat mempengaruhi tingkat kerapatan suatu spesimen dan kestabilan dimensi. *Layer height* memiliki pengaruh paling rendah terhadap akurasi dimensi x. Perubahan nilai level *layer height* pada setiap eksperimen tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai rata-rata eksperimen yang dihasilkan. Sedangkan untuk nilai parameter proses yang dapat menghasilkan akurasi dimensi x yang sesuai dengan nilai target berdasarkan nilai rata-rata ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik *Means Plot* Dimensi x

Berdasarkan gambar grafik *means plot* dimensi x (gambar 4.3) menunjukkan nilai level parameter proses optimal untuk mendapatkan akurasi dimensi x yang mendekati nilai target adalah *nozzle temperature* 200°C, *layer height* 0.20 mm, *infill density* 80%, dan *print speed* 35 mm/s.

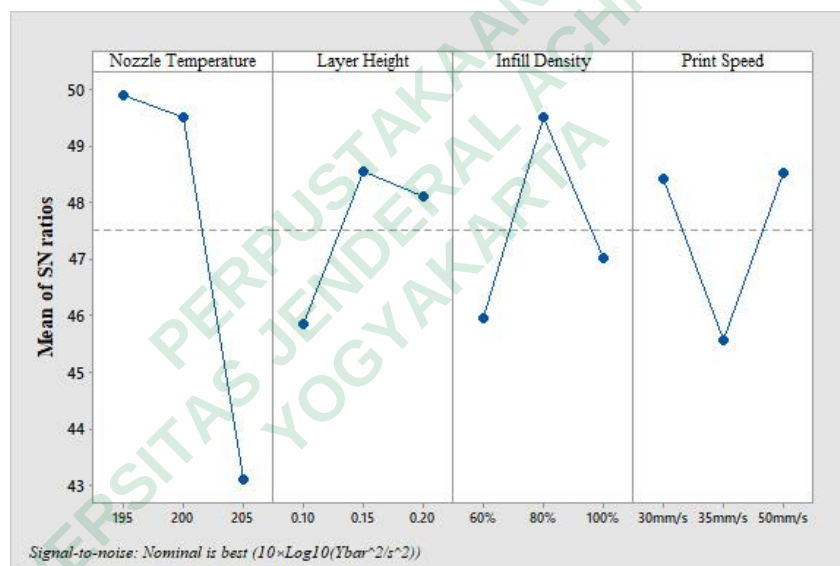
Analisis nilai rasio S/N pada respon akurasi dimensi y yang diolah menggunakan *software* minitab 17 menghasilkan tabel nilai rasio S/N pada masing-masing level dan *ranking* pengaruh parameter proses terhadap respon berdasarkan nilai rasio S/N (tabel 4.9).

Tabel 4.9 Response Table For S/N Ratio Dimensi y

Level	<i>Nozzle Temperature</i>	<i>Layer Height</i>	<i>Infill Density</i>	<i>Print Speed</i>
1	49.91	45.87	45.97	48.43
2	49.51	48.55	49.52	45.57
3	43.10	48.10	47.03	48.51
Delta	6.81	2.68	3.55	2.94
Rank	1	4	2	3

Berdasarkan nilai delta rasio S/N (tabel 4.9) nilai rasio S/N dengan kriteria *nominal is best* menunjukkan urutan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respons akurasi dimensi y ialah *nozzle temperature*, *infill density*, *print speed*, dan yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap respon akurasi dimensi y adalah *layer height*. *Nozzle temperature* memiliki pengaruh parameter yang berpengaruh paling besar terhadap respons akurasi dimensi y. Suhu ekstrusi yang tidak stabil atau terlalu tinggi biasanya akan berpengaruh terhadap dimensi cetak yang dihasilkan karena dapat menyebabkan penyusutan apabila filament tidak meleleh pada suhu yang sesuai dan akan terjadi pemuaihan karena filament meleleh berlebihan. Pada penelitian ini *nozzle temperature* 195°C menunjukkan hasil nilai rata-rata yang mendekati nilai target dimensi x dengan variabilitas yang rendah, dibandingkan dengan nilai level *nozzle temperature* yang lebih tinggi menunjukkan akurasi dimensi yang melebihi nilai target atau mengalami pemuaihan dan variabilitas lebih besar. Urutan kedua parameter proses yang berpengaruh terhadap respons akurasi dimensi y yaitu *infill density* yang berpengaruh terhadap kestabilan dimensi karena kerapatan inti spesimen yang digunakan. *Infill density* 80% dan 100% menunjukkan nilai rata-rata dan variabilitas yang lebih rendah atau lebih stabil dibandingkan dengan *infill density* 60% (tabel 4.5). Pada urutan ketiga, parameter

proses yang berpengaruh terhadap parameter dimensi y yaitu *print speed* yang dapat mempengaruhi akurasi dimensi cetakan karena penyusutan yang bisa disebabkan oleh adhesi antar lapisan tidak optimal. Pada penelitian ini *print speed* 30 mm/s dan 50 mm/s menunjukkan hasil nilai rata-rata yang mendekati nilai target dengan variabilitas yang rendah. *Layer height* memiliki pengaruh paling rendah terhadap respons akurasi dimensi y. Hal tersebut menunjukkan rental nilai level yang digunakan pada eksperimen sudah cukup optimal sehingga variasi tidak memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap perubahan akurasi dimensi y. Nilai level parameter proses yang optimal untuk mendapatkan nilai yang mendekati nilai akurasi dimensi y didapatkan berdasarkan nilai rasio S/N pada grafik rasio S/N (gambar 4.4).



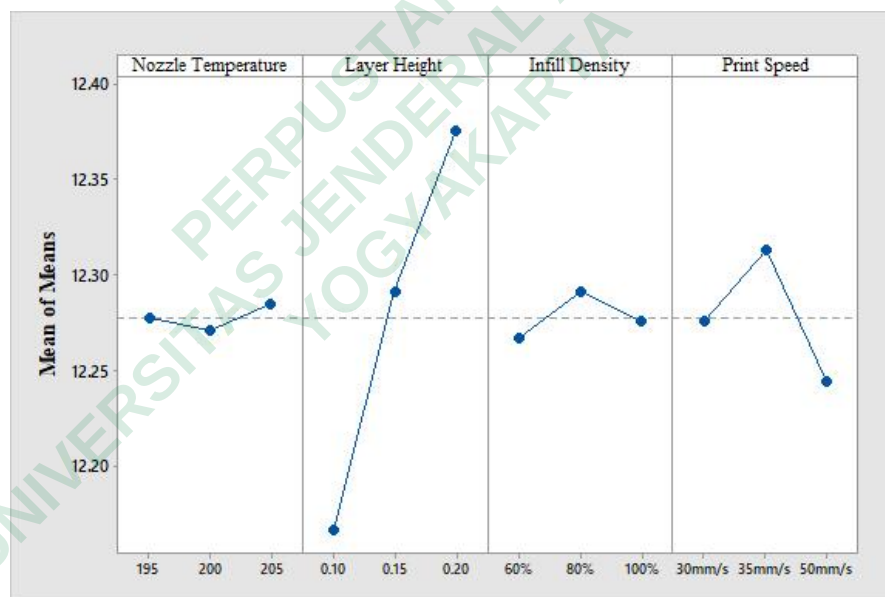
Gambar 4.4 Grafik Rasio S/N Respon Dimensi y

Berdasarkan gambar grafik rasio S/N respon dimensi y (gambar 4.4), nilai level parameter proses yang optimal ditentukan dari grafik dengan nilai rasio S/N paling tinggi atau paling besar, hal tersebut menunjukkan nilai signal (faktor yang dapat dikontrol) lebih besar dari faktor gangguan. Nilai level parameter proses optimal untuk menghasilkan respon akurasi dimensi y yang sesuai berdasarkan nilai rasio S/N pada grafik tersebut adalah *nozzle temperature* 195°C, *layer height* 0.15 mm, *infill density* 80%, dan *print speed* 50 mm/s.

Tabel 4.10 Response Means Plot Table Dimensi y

Level	Nozzle Temperature	Layer Height	Infill Density	Print Speed
1	12.28	12.17	12.27	12.28
2	12.27	12.29	12.29	12.31
3	12.28	12.38	12.28	12.24
Delta	0.01	0.21	0.02	0.07
Rank	4	1	3	2

Berdasarkan nilai delta *means plot* dimensi y (tabel 4.10) urutan parameter proses yang berpengaruh untuk mendapatkan nilai akurasi dimensi y yang dapat mendekati nilai target ialah *layer height*, *print speed*, *infill density*, dan *nozzle temperature* yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap akurasi dimensi y. Sedangkan untuk nilai parameter proses yang dapat menghasilkan akurasi dimensi y yang sesuai dengan nilai target berdasarkan nilai rata-rata ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Means Plot Dimensi y

Berdasarkan gambar grafik *means plot* dimensi y (gambar 4.5) menunjukkan nilai level parameter proses optimal untuk mendapatkan akurasi dimensi y yang sesuai dengan nilai target adalah *nozzle temperature* 200°C, *layer height* 0.10 mm, *infill density* 60%, dan *print speed* 50 mm/s.

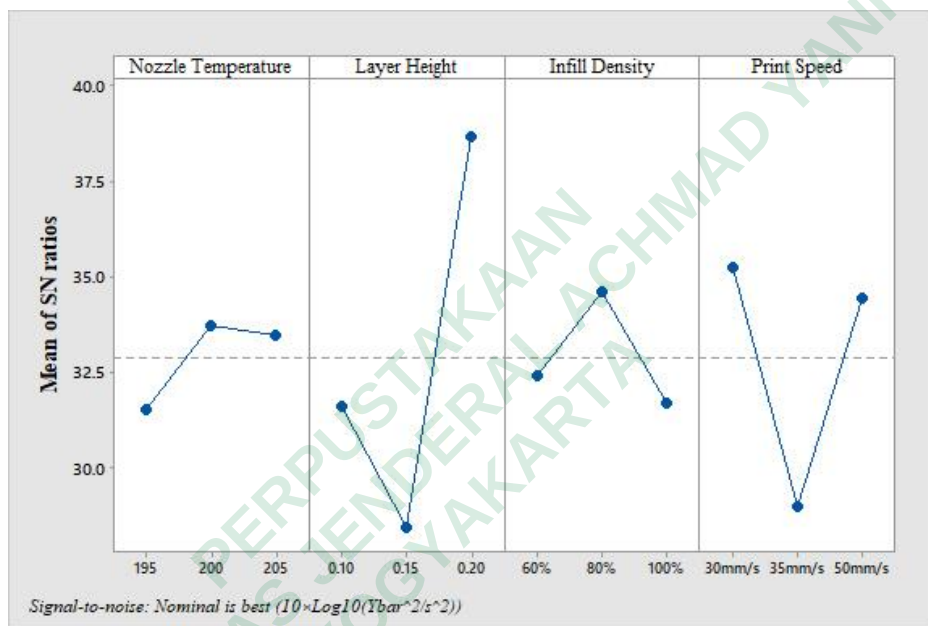
Analisis nilai rasio S/N pada respon akurasi dimensi z yang diolah menggunakan *software* minitab 17 menghasilkan tabel rata-rata rasio S/N pada masing-masing level yang ditunjukkan pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Response Table For S/N Ratio Dimensi z

Level	<i>Nozzle Temperature</i>	<i>Layer Height</i>	<i>Infill Density</i>	<i>Print Speed</i>
1	31.51	31.60	32.40	35.23
2	33.71	28.43	34.59	29.00
3	33.47	38.67	31.69	34.46
Delta	2.21	10.24	2.90	6.23
Rank	4	1	3	2

Berdasarkan nilai delta rasio S/N dimensi z (tabel 4.11) nilai rasio S/N dengan kriteria *nominal is best* menunjukkan urutan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi z ialah *layer height*, *print speed*, *infill density*, dan yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap respon akurasi dimensi z adalah *nozzle temperature*. Parameter paling berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi z yaitu *layer height*. *Layer height* yang lebih kecil memiliki nilai rata-rata yang mendekati nilai target tetapi variabilitas atau produk sensitif terhadap faktor gangguan karena nilai rasio S/N kecil, sedangkan pada penelitian ini *layer height* yang lebih besar memiliki nilai rata-rata akurasi dimensi z yang lebih stabil dengan variabilitas yang lebih rendah. Urutan kedua parameter proses yang berpengaruh terhadap respons akurasi dimensi z yaitu *print speed*, dimana pada saat faktor *print speed* 30 mm/s nilai rata-rata yang dihasilkan pada eksperimen lebih mendekati nilai target dimensi z dengan variabilitas yang rendah saat dikombinasikan dengan nilai level parameter proses yang tepat. Nilai level *Print speed* yang lebih sesuai akan lebih presisi karena adhesi antar layer lebih optimal. Urutan parameter proses ketiga yang berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi x yaitu *infill density*. Ketika *infill density* 80% menghasilkan nilai rata-rata mendekati nilai target dimensi z dibandingkan dengan nilai level lainnya dan variabilitas yang dihasilkan cukup rendah. Perbedaan hasil tersebut dapat disebabkan karena penggunaan kombinasi parameter proses lainnya yang kurang sesuai sehingga pada saat *infill density* 100 % menghasilkan nilai rata-rata yang lebih rendah dibandingkan dengan *infill density* 60% dan memiliki variabilitas yang cukup besar pada beberapa eksperimen. Parameter proses yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap respon akurasi

dimensi z adalah *nozzle temperature*. hal ini dapat disebabkan karena perbedaan nilai rasio S/N antar level tidak menyebabkan perubahan terhadap kestabilan dimensi z (tabel 4.6). Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai level yang digunakan untuk eksperimen dapat melelehkan material dengan baik, sehingga respon akurasi dimensi z tidak terpengaruh. Nilai level parameter proses yang optimal untuk mendapatkan nilai yang mendekati nilai akurasi dimensi z ditunjukkan pada gambar 4.6.



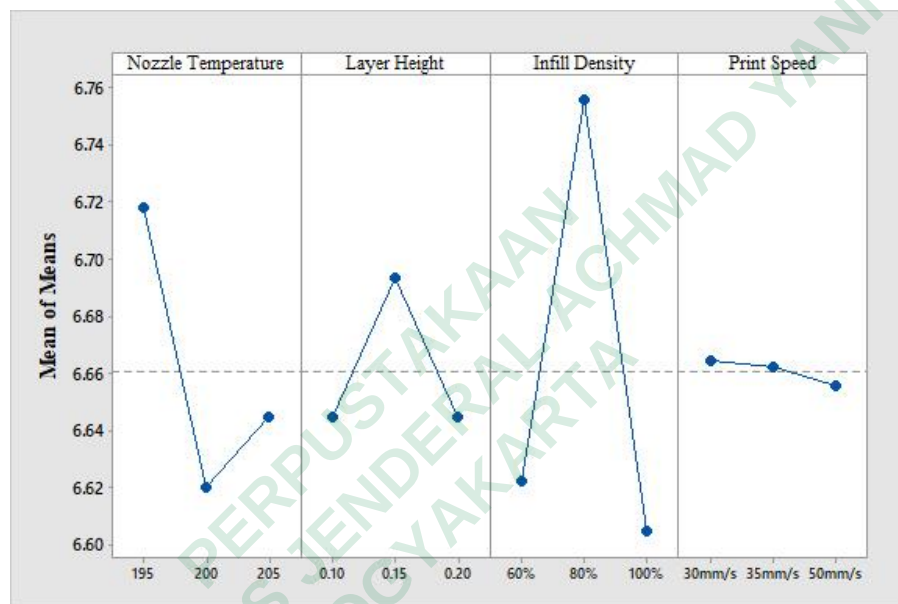
Gambar 4.6 Grafik Rasio S/N Respon Dimensi z

Berdasarkan gambar grafik rasio S/N dimensi z (gambar 4.6) nilai level parameter proses yang optimal ditentukan dari grafik dengan nilai rasio S/N paling tinggi atau paling lebih besar. Nilai level parameter proses yang optimal untuk mendapatkan respon akurasi dimensi z berdasarkan nilai rasio S/N pada grafik tersebut adalah *nozzle temperature* 200°C, *layer height* 0.20 mm, *infill density* 80%, dan *print speed* 30 mm/s.

Tabel 4.12 Response Means Plot Table Dimensi z

Level	Nozzle Temperature	Layer Height	Infill Density	Print Speed
1	6.718	6.644	6.622	6.664
2	6.620	6.693	6.756	6.662
3	6.644	6.644	6.604	6.656
Delta	0.098	0.049	0.151	0.009
Rank	2	3	1	4

Berdasarkan nilai delta *means plot* dimensi z (tabel 4.12) urutan parameter proses yang berpengaruh untuk mendapatkan nilai akurasi dimensi z yang dapat mendekati nilai target ialah *layer height*, *print speed*, *infill density*, dan *nozzle temperature* yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap akurasi dimensi z. Sedangkan untuk nilai parameter proses yang dapat menghasilkan akurasi dimensi z yang sesuai dengan nilai target berdasarkan nilai rata-rata ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Means Plot Dimensi z

Berdasarkan gambar grafik *means plot* dimensi z (gambar 4.7) menunjukkan bahwa nilai level parameter proses optimal untuk mendapatkan akurasi dimensi z yang sesuai dengan nilai target adalah *nozzle temperature* 195°C, *layer height* 0.15 mm, *infill density* 80%, dan *print speed* 30 mm/s.

4.2.2 ANOVA (*Analysis Of Variance*) terhadap Respon

ANOVA atau analisis varians pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besar kontribusi masing-masing parameter proses terhadap respon akurasi dimensi x, dimensi y, dan dimensi z. ANOVA pada penelitian ini dilakukan menggunakan *software* minitab 17 untuk menentukan besar kontribusi dan tingkat signifikansi pada masing-masing faktor atau parameter proses dengan melihat nilai *F-Value* atau *P-Value*.

Penelitian ini menggunakan matriks $L_9(3^4)$ yang memiliki 9 baris eksperimen, 4 faktor dengan 3 level pada setiap faktor dan dilakukan 3 kali replikasi oleh karena itu total *degree of freedom* (df) adalah 8. Apabila hasil total df pada tabel ANOVA adalah 8 maka df untuk *error* akan bernilai 0. Nilai df *error* akan digunakan sebagai pembagi dalam menentukan nilai *F-Value* dan *P-Value* (tabel 2.4), jika nilai df *error* adalah 0, maka nilai F_{Hitung} dan *P-Value* tidak dapat dihitung sehingga tingkat signifikansi pada masing-masing faktor atau parameter proses tidak dapat ditentukan. Oleh karena itu, pada penelitian ini faktor yang memiliki pengaruh paling rendah terhadap respon akurasi dimensi x, dimensi y, dan dimensi z berdasarkan tabel *respon for S/N ratio* akan dihilangkan atau dieliminasi dalam perhitungan ANOVA untuk mendapatkan nilai df *error* pada masing-masing tabel ANOVA terhadap respon. Hasil ANOVA atau analisis varians pada masing-masing respon ditunjukkan pada tabel 4.13 sampai tabel 4.18.

Tabel 4.13 ANOVA Rasio S/N Dimensi x

<i>Source</i>	DF	SS	Kontribusi	MS	<i>F-Value</i>	<i>P-Value</i>
<i>Nozzle Temperature</i>	2	161.0	20.75%	80.55	1.60	0.385
<i>Infill Density</i>	2	183.7	23.67%	91.84	1.82	0.354
<i>Print Speed</i>	2	330.4	42.58%	165.19	3.27	0.234
<i>Error</i>	2	100.9	13.00%	50.42		
Total	8	776.0	100.00%			

Berdasarkan hasil ANOVA rasio S/N dimensi x (tabel 4.13) menunjukkan persen kontribusi masing-masing faktor terhadap respon akurasi dimensi x dengan nilai kontribusi pada masing-masing faktor ialah *print speed* sebesar 42.58%, *infill density* sebesar 23.67% dan *nozzle temperature* sebesar 20.75%. Untuk mengetahui pengaruh faktor terhadap respon akurasi dimensi x secara signifikan ditentukan dengan melakukan analisis hipotesis F berdasarkan hasil F_{Hitung} pada tabel 4.13. Hasil hipotesis pada ANOVA rasio S/N dimensi x (tabel 4.14).

Tabel 4.14 Hasil Hipotesis F rasio S/N Dimensi x

No.	Faktor	F_{Hitung}	F_{Tabel}	Hipotesis
1.	<i>Nozzle Temperature</i>	1.60	5.14	H ₀ diterima dan H ₁ ditolak yang berarti faktor tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon.
2.	<i>Infill Density</i>	1.82	5.14	
3.	<i>Print Speed</i>	3.27	5.14	

Berdasarkan hasil hipotesis F pada nilai rasio S/N dimensi x (tabel 4.14) nilai F_{Hitung} pada parameter proses *nozzle temperature*, *infill density*, dan *print speed*

lebih kecil dibandingkan dengan nilai F_{Tabel} ($F_{Hitung} < F_{Tabel}$). Nilai F_{Tabel} pada penelitian ini menggunakan F_{Tabel} (tabel $\alpha, df1, df2$) yang memiliki tingkat kepercayaan 95% dengan $\alpha = 0.05$, $df1 = 3-1 = 2$, dan $df2 = 9-3 = 6$ (hal 36), nilai F_{Tabel} dihitung menggunakan *excel*. Hasil hipotesis F rasio S/N menunjukkan bahwa ketiga parameter tersebut tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon akurasi dimensi x.

Tabel 4.15 ANOVA Rasio S/N Dimensi y

<i>Source</i>	DF	SS	Contribution	MS	F-Value	P-Value
<i>Nozzle Temperature</i>	2	87.54	64.07%	43.768	7.08	0.124
<i>Infill Density</i>	2	19.95	14.60%	9.973	1.16	0.383
<i>Print Speed</i>	2	16.79	12.29%	8.395	1.36	0.424
<i>Error</i>	2	12.36	9.05%	6.180		
Total	8	136.63	100.00%			

Berdasarkan hasil ANOVA rasio S/N dimensi y (tabel 4.15) menunjukkan persen kontribusi masing-masing faktor terhadap respon akurasi dimensi y dengan nilai kontribusi pada masing-masing faktor ialah *nozzle temperature* sebesar 64,07%. *infill density* sebesar 14,60% dan *print speed* sebesar 12,29%. Untuk mengetahui pengaruh faktor terhadap respon akurasi dimensi y secara signifikan ditentukan dengan melakukan analisis hipotesis F berdasarkan hasil F_{Hitung} pada tabel 4.15. Hasil hipotesis pada ANOVA rasio S/N dimensi y ditunjukkan pada tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Hipotesis F Rasio S/N Dimensi y

No.	Faktor	F_{Hitung}	F_{Tabel}	Hipotesis
1.	<i>Nozzle Temperature</i>	7.08	5.14	H_1 diterima, ada pengaruh dari faktor
2.	<i>Infill Density</i>	1.16	5.14	H_0 diterima, tidak ada pengaruh dari faktor
3.	<i>Print Speed</i>	1.36	5.15	H_0 diterima, tidak ada pengaruh dari faktor

Berdasarkan hasil hipotesis F pada nilai rasio S/N dimensi y (tabel 4.16) nilai F_{Hitung} pada parameter proses *nozzle temperature* lebih besar dari pada nilai F_{Tabel} ($F_{Hitung} > F_{Tabel}$), sedangkan untuk parameter proses *infill density*, dan *print speed* nilai F_{Hitung} lebih kecil dibandingkan dengan nilai F_{Tabel} ($F_{Hitung} < F_{Tabel}$). Hasil hipotesis F Rasio S/N menunjukkan bahwa faktor atau parameter proses *nozzle temperature* berpengaruh secara signifikan terhadap respon akurasi dimensi y, sedangkan faktor *print speed* dan *infill density* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon akurasi dimensi y.

Tabel 4.17 ANOVA Rasio S/N Dimensi z

Source	DF	SS	Contriubution	MS	F-Value	P-Value
Layer Height	2	164.917	64.31%	82.459	18.90	0.050
Infill Density	2	13.734	5.36%	6.867	1.57	0.389
Print Speed	2	69.062	26.93%	34.531	7.91	0.112
Error	2	8.728	3.40%	4.364		
Total	8	256.441	100.00%			

Berdasarkan hasil ANOVA rasio S/N dimensi z (tabel 4.17) menunjukkan persen kontribusi masing-masing faktor terhadap respon akurasi dimensi z dengan nilai kontribusi pada masing-masing faktor ialah *layer height* sebesar 64.31% *infill density* sebesar 5.36% dan *print speed* sebesar 26.93%. Untuk mengetahui pengaruh faktor terhadap respon akurasi dimensi z secara signifikan ditentukan dengan melakukan analisis hipotesis F berdasarkan hasil F_{Hitung} pada tabel 4.17. Hasil hipotesis pada ANOVA rasio S/N dimensi z ditunjukkan pada tabel 4.18.

Tabel 4.18 Hasil Hipotesis F Rasio S/N Dimensi z

No.	Faktor	F_{Hitung}	F_{Tabel}	Hipotesis
1.	Layer Height	18.90	5.14	H_1 diterima, ada pengaruh dari faktor
2.	Infill Density	1.57	5.14	H_0 diterima, tidak ada pengaruh dari faktor
3.	Print Speed	7.91	5.15	H_1 diterima, ada pengaruh dari faktor

Berdasarkan hasil hipotesis F pada nilai rasio S/N dimensi z (tabel 4.18) nilai F_{Hitung} pada parameter proses *layer hight* dan *print speed* lebih besar dari pada nilai F_{Tabel} ($F_{Hitung} > F_{Tabel}$), sedangkan untuk parameter proses *infill density* memiliki nilai F_{Hitung} lebih kecil dibandingkan dengan nilai F_{Tabel} ($F_{Hitung} < F_{Tabel}$). Hasil hipotesis F Rasio S/N menunjukkan bahwa faktor atau parameter proses *layer height* dan *print speed* berpengaruh secara signifikan terhadap respon akurasi dimensi z, sedangkan faktor *infill density* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon akurasi dimensi z.

4.2.3 Uji Konfirmasi

Uji konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi kesimpulan berdasarkan hasil analisis. Uji konfirmasi pada penelitian ini dilakukan dengan cara mencetak spesimen menggunakan pengaturan parameter proses optimal pada akurasi dimensi

x, y, dan z yang direplikasi sebanyak tiga kali. Hasil cetak spesimen uji konfirmasi kemudian di ukur dimensinya sesuai dengan titik pengukuran yang digunakan pada penelitian (gambar 3.2) serta dihitung nilai rasio S/N dan nilai *means* pada setiap spesimen uji konfirmasi. Nilai rasio S/N dan nilai *means* tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai prediksi rasio S/N dan nilai prediksi *means* untuk menentukan tingkat keakuratan hasil optimasi pada penelitian (tabel 4.19).

Tabel 4.19 Perbandingan Hasil DOE dan Hasil Prediksi Taguchi

Respon	Replikasi			Hasil DOE		Prediksi		Selisih	
	1	2	3	<i>Means</i>	SNR	<i>Means</i>	SNR	<i>Means</i>	SNR
Dimensi X	20.2	20.1	20.2	20.17	50.86	19.7911	19.7922	1.9%	30.1%
Dimensi Y	12.16	12.16	12.2	12.17	54.44	12.2711	53.9741	0.8%	0.9%
Dimensi Z	6.8	6.69	6.7	6.73	40.88	6.70222	43.5134	0.4%	6.1%

Berdasarkan perbandingan nilai *means* dan nilai SNR hasil optimasi dengan nilai *means* dan nilai SNR hasil prediksi taguchi (tabel 4.19), didapatkan selisih hasil DOE dengan hasil prediksi taguchi yaitu pada dimensi x menunjukkan selisih nilai rata-rata (*means*) relatif lebih kecil (1,9%) dan lebih kecil dari nilai toleransi yang ditetapkan yaitu 0.2 mm – 0.5 mm dan pada selisih nilai SNR cukup besar (15,4%) hal tersebut berarti hasil prediksi cukup akurat terhadap nilai rata-rata, namun terdapat perbedaan yang cukup signifikan pada tingkat variasi (SNR). Pada dimensi y hasil perbandingan DOE dengan prediksi menunjukkan selisih yang sangat kecil pada *means* maupun nilai SNR (<1%) dan lebih kecil dari nilai toleransi (<0.2 mm). Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil prediksi sesuai atau akurat dengan hasil DOE, yang berarti parameter proses yang didapat pada penelitian ini layak digunakan. Sedangkan pada dimensi z perbandingan hasil DOE dengan hasil prediksi pada *means* memiliki selisih yang sangat kecil yaitu 0.4 % sedangkan pada nilai SNR memiliki selisih yang masih dalam batas toleransi yang dapat diterima, oleh karena itu parameter proses yang didapatkan juga layak digunakan atau direkomendasikan. Secara keseluruhan, selisih nilai means yang didapatkan kurang dari nilai toleransi yang digunakan pada penelitian yaitu kurang dari 0.2 mm – 0.5 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil perbandingan membuktikan bahwa metode taguchi mampu memberikan prediksi yang akurat terhadap hasil optimasi.

Selanjutnya ialah memvalidasi hasil optimasi dengan dimensi desain penelitian untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil optimasi dengan nilai target. Validasi hasil optimasi terhadap nilai target dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata hasil optimasi dengan nilai dimensi desain penelitian (tabel 4.20).

Tabel 4.20 Perbandingan Hasil Optimasi dan Dimensi *Design*

Respon	Replikasi			Means Hasil Optimasi	Dimensi Desain	Selisih	%	Nilai Toleransi (mm)
	1	2	3					
Dimensi X	20.20	20.10	20.20	20.17	20	0.17	1.0085	0.2 – 0.5
Dimensi Y	12.16	12.16	12.20	12.17	12	0.17	1.014167	0.2 – 0.5
Dimensi Z	6.80	6.69	6.70	6.73	7	0.27	0.961429	0.2 – 0.5

Berdasarkan perbandingan nilai rata-rata (*means*) hasil optimasi dengan nilai dimensi desain penelitian (tabel 4.20) menunjukkan nilai rata-rata pada dimensi x, y, dan z memiliki selisih yang sangat kecil terhadap ukuran dimensi desain. Nilai selisih antara hasil optimasi dengan ukuran dimensi desain memiliki selisih yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai toleransi yang ditetapkan pada penelitian (< 0,2 mm). Selisih atau nilai penyimpangan berada di bawah nilai toleransi 0,2 mm sampai 0,05 mm menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses hasil optimasi tidak hanya sesuai dengan nilai prediksi taguchi tetapi juga mampu menghasilkan dimensi yang mendekati spesifikasi dimensi desain yang diinginkan.