

Optimasi Parameter 3D Printing pada Material PETG terhadap Kekuatan Tarik dan Building Time Menggunakan Metode Taguchi – Grey Relational Analysis

Achmad Faizal Cholis^{1*}, Bayu Wiro Karuniawan², Rizal Indrawan³

Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia ^{1*,2,3}
E-mail: achmadfaizal@student.ppns.ac.id^{1*}

Abstract – Nowadays 3D printing technology is often used as a production machine, but production efficiency and good mechanical properties are priorities in the production process. Tensile strength and production time (building time) are some of the response variables of mechanical properties and production efficiency. In this study, the 3D printing parameters like nozzle size, layer height, print speed, and infill pattern will be used as an independent variables to obtain optimal output for tensile strength response and building time. The experimental design was calculated using the Taguchi method with an orthogonal matrix $L_9(3^4)$ with 3 replications. Then the data was analyzed using Gray Relational Analysis to obtain the optimal combination of parameters for the combined response. After the prediction experiment had been conducted, a confirmation experiment was used as a validation of the experiment success. The optimal parameters obtained are nozzle size 0.8 mm, layer height 0.2 mm, print speed 50 mm/s, and concentric infill pattern with an average tensile strength of ± 25.033 Mpa with a building time of ± 28.0056 minutes. After analysis, the nozzle size parameter has a contribution of 44.39%, layer height of 42.31%, print speed of 1.18%, and infill pattern of 12.13% to the combined response.

Keyword: 3D Printing, Additive Manufacturing, Optimization, Parameters, PETG, Taguchi Grey Relational Analysis.

Nomenclature

NS	nozzle size atau ukuran nozzle
LH	layer height atau tinggi lapisan
PS	print speed atau kecepatan cetak
IP	infill pattern
mm	satuan dari NS dan LH
mm/s	satuan dari PS
UTS	Ultimate Tensile Strength
BT	Building Time
MPA	satuan dari UT
min	satuan dari BT

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur terus mengalami perkembangan dari waktu ke waktu, dimana pada saat ini industri manufaktur sudah berada pada industri 4.0. Menperin menjelaskan, penerapan industri 4.0 merupakan upaya untuk melakukan otomatisasi dan digitalisasi pada proses produksi, dengan ditandai meningkatnya konektivitas, interaksi, serta batas antara manusia, mesin, dan sumber daya lainnya yang semakin konvergen melalui teknologi informasi dan komunikasi.

Adapun lima teknologi utama yang menopang pembangunan sistem industri 4.0, yaitu *IoT*, *Artificial Intelligence (AI)*, *Human-Machine Interface*, teknologi robotik dan sensor, serta teknologi 3D Printing (Kemenperin.co.id, 2019).

Rapid Prototyping atau yang disebut 3D printing adalah teknik membentuk dan merakit sebuah produk dengan cara yang cepat dengan integrasi antara sistem CAD (*Computer Aided Design*) dan mesin dengan sistem *Rapid prototyping* (3D printing, CNC). Pembentukannya dengan menambahkan lapis demi lapis sesuai dengan irisan yang diolah dengan CAD [5].

Dalam proses manufaktur sifat mekanik suatu produk (kekuatan tarik, kekuatan lentur, dll) dan efisiensi produksi (waktu produksi, kemudahan produk untuk diproduksi, dll) merupakan beberapa hal yang sering diperhatikan. Namun dalam 3D printing banyak parameter yang mempengaruhi sifat mekanik dan efisiensi produksi dari suatu produk. Hal ini dapat dilihat dari beberapa penelitian sebelumnya. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Z.S Suzen dkk tentang pengaruh parameter *nozzle temperature* dan *infill pattern* terhadap kekuatan tarik dari produk 3D printing [7]. Begitu juga dengan penelitian yang dilakukan oleh Awwaliyah tentang pengaruh parameter *layer height*, *nozzle temperature*, dan *print speed* terhadap kekasaran dimensi dan waktu mencetak (*building time*) [1]. Jika kombinasi parameter tidak optimal maka sifat mekanik maupun efisiensi produksi dari produk 3D printing juga tidak akan optimal, seperti produk yang mudah

patah (getas) karena kekuatan tarik yang rendah maupun waktu produksi yang sangat lama karena parameter yang tidak optimal.

Berdasarkan permasalahan diatas maka pada penelitian ini akan dilakukan analisa dan optimasi terhadap parameter proses 3D printing dengan kekuatan tarik produk dan waktu mencetak produk (*building time*) sebagai variabel respon untuk mengetahui pengaruh parameter dan mendapatkan kombinasi parameter 3D printing terhadap sifat mekanik dan efisiensi produksi. Variabel bebas yang akan diteliti pada penelitian ini yaitu *nozzle size*, *layer height*, *print speed*, dan *infill pattern*. Dimana parameter *nozzle size* dipilih untuk mengetahui pengaruhnya pada kekuatan tarik dan *building time*, parameter *layer height* dan *print speed* dipilih karena merupakan 2 parameter dengan kontribusi tertinggi terhadap respon *building time* produk pada penelitian yang dilakukan oleh Awwaliyah, dan parameter *infill pattern* dipilih karena merupakan parameter paling berpengaruh terhadap respon kekuatan tarik pada penelitian yang dilakukan oleh Z.S Suzen dkk. Pemilihan Metode Taguchi untuk *Design of Experiment* (DoE) dalam penelitian ini dikarenakan dapat digunakan untuk memberikan hasil pemilihan level-level faktor yang dapat mengoptimalkan variabel respon, kemudian *Grey Relational Analysis* dipilih agar optimasi pada beberapa respon dapat dilakukan secara bersamaan dan mendapatkan parameter optimal produk dengan kekuatan tarik yang tinggi namun memiliki *building time* yang rendah.

2. METODOLOGI

2.1 Desain Eksperimen

Variabel respon yang diteliti yaitu kekuatan tarik dan *building time* produk. Penelitian ini menggunakan variabel bebas yang masing – masing dengan 3 level terdiri atas *nozzle size*, *layer height*, *print speed*, dan *infill pattern*. Tabel 1 menunjukkan penentuan variasi parameter berdasarkan pertimbangan setelah dilakukan observasi, kemampuan mesin dan rekomendasi parameter.

Tabel 1: Tabel Variabel Bebas

Variabel Bebas	Level 1	Level 2	Level 3
<i>Nozzle size</i>	0,4	0,6	0,8
<i>Layer height</i>	0,1	0,15	0,2
<i>Print speed</i>	40	50	60
<i>Infill pattern</i>	<i>Concentric</i>	<i>Line</i>	<i>Grid</i>

Pada metode Taguchi, desain eksperimen dirancang sesuai dengan matriks *orthogonal array*. Matriks *orthogonal array* digunakan untuk menganalisis data eksperimen dan digunakan untuk merancang eksperimen yang efisien sehingga dapat menentukan jumlah

eksperimen minimal yang dapat memberi informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter. Penentuan matriks tersebut berdasarkan perhitungan derajat kebebasan, jumlah faktor (parameter penelitian), dan jumlah level faktor. Kemudian ditentukan matriks *orthogonal array* $L_9(3^4)$ yang akan dilakukan sebanyak 3 kali replikasi. Matriks tersebut memiliki total 9 eksperimen dan 4 faktor dengan 3 level pada masing – masing faktor. Tabel 2 menunjukkan desain eksperimen sesuai perhitungan dengan menggunakan *Software Minitab 19*.

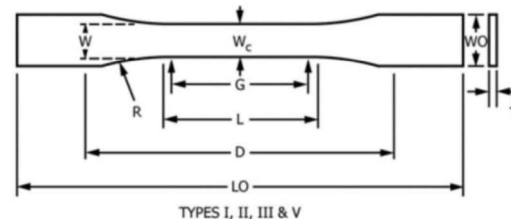
Tabel 2: Desain Eksperimen $L_9(3^4)$

Eksp.	Variabel Bebas			
	NS	LH	PS	IP
1	0,4	0,1	40	<i>Concentric</i>
2	0,4	0,15	50	<i>Line</i>
3	0,4	0,2	60	<i>Grid</i>
4	0,6	0,1	50	<i>Grid</i>
5	0,6	0,15	60	<i>Concentric</i>
6	0,6	0,2	40	<i>Line</i>
7	0,8	0,1	60	<i>Line</i>
8	0,8	0,15	40	<i>Grid</i>
9	0,8	0,2	50	<i>Concentric</i>

2.2 Alat dan Material Eksperimen

Alat yang digunakan untuk melakukan eksperimen antara lain yaitu mesin 3D printer merk ANET A8 (teknologi FDM atau *Fused Deposition Modelling*); laptop dengan aplikasi Ultimaker Cura; *Universal Testing Machine* (Hung Ta tipe HT-2402) untuk menguji kekuatan tarik; *stopwatch* untuk mengukur waktu proses atau *building time*.

Bahan yang diperlukan dalam eksperimen diantaranya adalah filamen jenis PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*). diameter 1.75 mm; dan file hasil desain bentuk spesimen yang dibuat sesuai dengan ASTM D638-14 tipe 1. Gambar 1 menunjukkan sketsa desain spesimen. Eksperimen pengujian tarik dilakukan di Universitas Jember.



Gambar 1. Sketsa Desain Eksperimen

2.3 Taguchi – Grey Relational Analysis

Tahap pengolahan data dilakukan menggunakan Taguchi – *Grey Relational Analysis*. Metode Taguchi merupakan metodologi yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu bersamaan untuk menekan biaya dan sumber

daya seminimal mungkin [6]. GRA sendiri merupakan metode sesuai dengan teori *grey*. Metode Taguchi *Grey Relational Analysis* kemudian digunakan untuk mengoptimalkan respon yang jumlahnya lebih dari satu atau multirespon. Berikut tahapan metode Taguchi – *Grey Relational Analysis* :

1. Perhitungan Rasio S/N

Rasio S/N (*rasio signal to noise*) digunakan untuk meminimalkan sensitivitas karakteristik kualitas terhadap faktor gangguan. Terdapat tiga jenis rasio S/N yang bergantung pada karakteristik kualitas yang diharapkan, yaitu *smaller is better*, *larger is better*, dan *nominal is better*. Respon kekuatan tarik menggunakan kriteria rasio S/N *larger is better*, sedangkan respon *building time* menggunakan *smaller is better*.

Larger is better

$$S/N \text{ ratio} = - \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

Smaller is better

$$S/N \text{ ratio} = - \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_{i=1}^2}{n} \right] \quad (2)$$

Keterangan :

n = jumlah pengulangan

y = data percobaan

2. Normalisasi Rasio S/N

Normalisasi dilakukan untuk mempermudah perhitungan selanjutnya karena setelah di normalisasi nominalnya akan berubah menjadi rentang 0 hingga 1. Berikut merupakan persamaan normalisasi rasio S/N.

$$X_i^* = \frac{Xo^o(k) - Min Xo^o(k)}{Max Xo^o(k) - Min Xo^o(k)} \quad (3)$$

Keterangan :

Max Xo^o(k) = Nilai maksimum perhitungan rasio S/N

Min Xo^o(k) = Nilai minimum perhitungan rasio S/N

Xo^o(k) = Nilai dari rasio S/N disetiap eksperimen

X_i^{} (k)* = Normalisasi rasio S/N

k = Eksperimen yang dilakukan

3. Simpangan Deviasi

Perhitungan simpangan deviasi yaitu dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta_{oi} (k) = |X_0^* (k) - X_i^* (k)| \quad (4)$$

Keterangan :

Δ_{oi} = Penyimpangan disetiap eksperimen

X₀^{} (k)* = nilai rasio S/N normalisasi terbesar

X_i^{} (k)* = nilai rasio S/N normalisasi pada

eksperimen ke - i

4. *Grey Relational Coefficient* (GRC)

$$\zeta_i^* (k) = \frac{\Delta \text{ min} + \zeta \Delta \text{ maks}}{\Delta_{oi} (k) + \zeta \Delta \text{ maks}} \quad (5)$$

Keterangan :

ζ_i^{}* = *Grey Relational Coefficient*

ζ = Koefisien Pembeda (nilai *ζ* = 0,5)

Δ min = Nilai terendah dari rangkaian deviasi

Δ maks = Nilai tertinggi dari rangkaian deviasi

Δ_{oi} (k) = Nilai deviasi

5. *Grey Relational Grade* (GRG)

$$\gamma_i (k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_i^* (k) \quad (6)$$

Keterangan :

ζ_i^{}* = Nilai *grey relational coefficient* (GRC)

n = Jumlah respon yang diteliti

6. *Analysis of Variance* (ANOVA)

Analysis of variance atau ANOVA digunakan untuk melihat faktor eksperimen yang mempunyai pengaruh signifikan terhadap respon penelitian serta untuk mengetahui besar nilai kontribusi dari setiap faktor terhadap respon yang diteliti.

7. Prediksi GRG Optimal

Prediksi GRG ini bertujuan untuk mengetahui faktor yang berkontribusi optimal pada eksperimen. Perhitungan prediksi GRG optimal dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\mu \text{ prediksi} = Y + (A - Y) + (B - Y) + (C - Y) \quad (7)$$

Keterangan :

Y = nilai rata-rata keseluruhan GRG

A/B/C = nilai GRG yang optimal pada faktor *A/B/C*

8. Interpretasi Hasil Percobaan

a. Persen kontribusi

Perhitungan persen kontribusi merupakan tahapan untuk mengetahui persen kontribusi faktor maupun interaksi faktor yang signifikan dan *error*. Persamaan berikut yaitu untuk menghitung persen kontribusi [4].

$$\rho = \frac{SS_A}{SS_{(total)}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan :

SS_A = Jumlah kuadrat faktor A

SS_T = *Sum of square total*

b. Interval kepercayaan eksperimen prediksi

$$Cl_p = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha, df_1, df_2} MS_E}{n_{eff}}} \quad (9)$$

Keterangan :

$$n_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan}}$$

F_{α;1;df_E} = rasio F

MSE = rata-rata kuadrat error

c. Interval kepercayaan eksperimen konfirmasi

$$CI_k = \pm \sqrt{F_{\alpha;df_1;df_2} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (10)$$

Keterangan :

r = jumlah eksperimen konfirmasi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Hasil Eksperimen Prediksi

Setelah dilakukan pengujian kekuatan tarik 27 spesimen dan pengukuran waktu produksi (*building time*) maka didapatkan rangkuman hasil pada tabel 3.

Tabel 3: Data Hasil Eksperimen Prediksi

Eksp.	Replikasi	UTS (MPa)	BT (min)
1	1	18,21	86,250
	2	18,15	86,250
	3	17,4	86,250
2	1	17,17	57,700
	2	16,77	57,700
	3	17,44	57,700
3	1	18,78	44,983
	2	19,68	44,983
	3	19,77	44,983
4	1	17,96	52,667
	2	17,35	52,667
	3	16,9	52,667
5	1	21,05	32,217
	2	20,68	32,217
	3	21,13	32,217
6	1	22,21	43,200
	2	23,74	43,200
	3	22,42	43,200
7	1	18,65	38,167
	2	16,39	38,167
	3	16,25	38,167
8	1	21,57	37,450
	2	20,29	37,450
	3	21,24	37,450
9	1	25,1	28,000
	2	24,94	28,000
	3	25,06	28,017

3.2 Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan data diawali dengan perhitungan rasio S/N dengan kriteria *larger is*

better pada respon kekuatan tarik (X1), dan *smaller is better* pada *building time* (X2). Hal tersebut mengingat target respon yang diharapkan adalah semakin besar nilai kekuatan tarik dan semakin cepat *building time* maka semakin mendekati optimal. Hasil perhitungan rasio S/N dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4: Hasil Perhitungan Rasio S/N

Eksperimen	X1	X2
1	25,0611	-38,7152
2	24,6701	-35,2235
3	25,7535	-33,0610
4	24,8046	-34,4308
5	26,4239	-30,1617
6	27,1437	-32,7097
7	24,6073	-31,6338
8	26,4493	-31,4690
9	27,9703	-28,9449

Selanjutnya yaitu tahap perhitungan normalisasi rasio S/N menggunakan persamaan 3 dilanjutkan menghitung simpangan deviasi dengan persamaan 4. Hasil perhitungan disajikan pada tabel 5.

Tabel 5: Hasil Normalisasi Rasio S/N & Simpangan Deviasi

Eksperimen	X ₁	X ₂
1	0,1349	0
2	0,0187	0,3574
3	0,3408	0,5787
4	0,0587	0,4385
5	0,5402	0,8755
6	0,7542	0,6147
7	0	0,7248
8	0,5477	0,7417
9	1	1

Hasil perhitungan simpangan deviasi kemudian akan dipakai untuk mencari nilai *grey relational coefficient* sesuai persamaan 5. Apabila nilai GRC bernilai 1, maka normalisasi dianggap cocok dengan kondisi ideal sehingga pada eksperimen dengan nilai GRC 1 memungkinkan menjadi eksperimen terbaik. Nilai GRC kemudian digunakan untuk mencari nilai GRG sesuai persamaan 6. Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan GRC dan GRG.

Tabel 6: Hasil Perhitungan GRC dan GRG

Eksp.	Y ₁	Y ₂	GRG	Rasio S/N GRG	Rank
1	0,3663	0,3333	0,3498	-9,1234	9
2	0,3375	0,4376	0,3876	-8,2332	8
3	0,4313	0,5427	0,4870	-6,2489	6
4	0,3469	0,4710	0,4090	-7,7662	7
5	0,5209	0,8006	0,6608	-3,5991	2
6	0,6704	0,5648	0,6176	-4,1860	3
7	0,3333	0,6450	0,4892	-6,2110	5
8	0,5251	0,6593	0,5922	-4,5507	4

9	1	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---

Tahap berikutnya yaitu *Analysis of Variance* (ANOVA). Dilakukan analisis untuk masing – masing respon kekuatan tarik, *building time*, dan respon GRG (*output* gabungan antara kekuatan tarik dan *building time*). Data yang digunakan adalah nilai rasio S/N masing – masing respon. ANOVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (df), besar kontribusi, jumlah kuadrat (*sum of square* atau SS), kuadrat tengah (*mean of square* atau MS), dan *F-value* (F_{hitung}). Tabel 7 sampai 12 adalah hasil ANOVA menggunakan *software* Minitab19.

Tabel 7: ANOVA Kekuatan Tarik

Faktor	Source	DF	Contribution	SS	MS	Fhitung
A	NS	2	20,57%	2,3682	1,1841	*
B	LH	2	59,22%	6,8182	3,4091	*
C	PS	2	5,20%	0,5992	0,2996	*
D	IP	2	15,00%	1,7270	0,8635	*
Error		0	*	*	*	
Total		8	100%			

Tabel 8: ANOVA Kekuatan Tarik (*Pooling Up*)

Faktor	Source	DF	Contribution	SS	MS	Fhitung	
A	NS	2	20,57%	2,3682	1,1841	3,9522	
B	LH	2	59,22%	6,8182	3,4091	11,3785	
C	PS	<i>Pooling Up</i>					
D	IP	2	15,00%	1,7270	0,8635	2,8821	
Error		2	5,20%	0,5992	0,2996		
Total		8	100%				

Tabel 9: ANOVA *Building Time*

Faktor	Source	DF	Contribution	SS	MS	Fhitung
A	NS	2	56,07%	38,3569	19,1784	*
B	LH	2	27,40%	18,7416	9,3708	*
C	PS	2	15,76%	10,7837	5,3919	*
D	IP	2	0,77%	0,5234	0,2617	*
Error		0	*	*	*	
Total		8	100%			

Tabel 10: ANOVA *Building Time* (*Pooling Up*)

Faktor	Source	DF	Contribution	SS	MS	Fhitung	
A	NS	2	56,07%	38,3569	19,1784	73,29	
B	LH	2	27,40%	18,7416	9,3708	35,81	
C	PS	2	15,76%	10,7837	5,3919	20,60	
D	IP	<i>Pooling Up</i>					
Error		2	0,77%	0,5234	0,2617		
Total		8	100%				

Tabel 11: ANOVA GRG

Faktor	Source	DF	Contribution	SS	MS	Fhitung
A	NS	2	44,39%	28,0861	14,0430	*
B	LH	2	42,31%	26,7694	13,3847	*
C	PS	2	1,18%	0,7454	0,3727	*
D	IP	2	12,13%	7,6721	3,8360	*
Error		0	*	*	*	
Total		8	100%			

Tabel 12: ANOVA GRG (*Pooling Up*)

Faktor	Source	DF	Contribution	SS	MS	Fhitung	
A	NS	2	44,39%	28,0861	14,0430	37,68	
B	LH	2	42,31%	26,7694	13,3847	35,91	
C	PS	<i>Pooling Up</i>					
D	IP	2	12,13%	7,6721	3,8360	10,29	
Error		2	1,18%	0,7454	0,3727		
Total		8	100%				

Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwa nilai dari F_{hitung} tidak diketahui dikarenakan derajat kebebasan dari *error* bernilai 0. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Rikma Mila Ilmaya tentang “optimasi kekerasan

baja S45C pada proses *hardening helical gear* menggunakan metode taguchi” untuk mengatasi permasalahan seperti diatas perlu dilakukan strategi *pooling up* [3]. *Pooling up* ini merupakan suatu penggabungan faktor dengan signifikansi terendah sebagai *error* [2].

Berdasarkan hasil ANOVA, dapat diketahui persen kontribusi tiap faktor pada masing – masing respon. Selain itu, dilakukan uji hipotesis untuk mengetahui pengaruh faktor secara statistik. Keputusan yang dibuat yaitu apabila $F_{hitung} < F_{tabel}$ maka H_0 diterima dengan arti tidak ada pengaruh dari faktor. Sedangkan apabila $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka H_1 diterima dengan arti ada pengaruh dari faktor. Penelitian ini menggunakan F_{tabel} (tabel $F_{\alpha;df1;df2}$) yang memiliki probabilitas kepercayaan 95% dengan $\alpha = 0.05$; $df1 =$ jumlah faktor – 1 ; $df2 =$ jumlah eksperimen – jumlah faktor. Berikut hasil hipotesis pada tabel 13.

Tabel 13: Hasil Uji Hipotesis

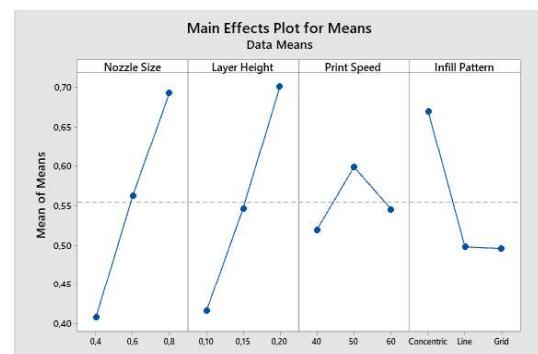
Respon	Hipotesis
Kekuatan Tarik	Hanya LH yang terima H_1
<i>Building Time</i>	Hanya IP yang terima H_0
GRG	Hanya PS yang terima H_0

Perhitungan parameter optimal selanjutnya dilakukan untuk mengetahui level yang paling optimal atau berpengaruh pada setiap faktor atau parameter terhadap respon gabungan atau serentak. Perhitungan ini menggunakan data rasio S/N GRG. Prediksi parameter optimal dapat dilihat pada tabel 14.

Tabel 14: Parameter Optimal GRG

Level	NS	LH	PS	IP
1	-7,8685	-7,7002	-5,9533	-4,2408
2	-5,1838	-5,4610	-5,3331	-6,2100
3	-3,5872	-3,4783	-5,3530	-6,1886
Delta	4,2813	4,2219	0,6202	1,9692
Rank	1	2	4	3

Semakin besar nilai rata-rata tiap level maka semakin tinggi kontribusi terhadap respon gabungan. Kombinasi parameter optimal yang didapat adalah faktor A (*NS*) pada level 3 yang bernilai 0.8 mm, faktor B (*LH*) pada level 3 dengan nilai 0,2 mm, faktor C (*PS*) pada level 2 atau 50 mm/s, dan faktor D (*IP*) pada level 1 atau *concentric*. Gambar 2 merupakan grafik level faktor sesuai *software* Minitab18.



Gambar 2. Grafik Level Faktor Optimal GRG

Pada tahap selanjutnya yaitu perhitungan prediksi GRG optimal sesuai dengan rumus pada persamaan 7 untuk digunakan pada perhitungan interval kepercayaan prediksi sebagai pembanding dengan nilai hasil eksperimen konfirmasi sehingga dapat ditarik kesimpulan pembuktian keberhasilan eksperimen konfirmasi.

$$\begin{aligned} \mu \text{ prediksi} &= Y + (A - Y) + (B - Y) + (D - Y) \\ &= (-3,2872) \\ &\quad + ((-3,5872) - (-3,2872)) \\ &\quad + ((-3,4783) - (-3,2872)) \\ &\quad + ((-4,2408) - (-3,2872)) \\ \mu \text{ prediksi} &= -4,7320 \end{aligned}$$

Interpretasi hasil terbagi menjadi dua tahapan yaitu perhitungan persentase kontribusi dan interval kepercayaan. Perhitungan persentase kontribusi telah dilakukan sebelumnya pada perhitungan ANOVA. Sehingga langkah selanjutnya adalah interpretasi hasil berupa perhitungan interval kepercayaan untuk eksperimen prediksi. Persamaan 8 akan digunakan sebagai rumus perhitungan. Ftabel yang dipilih yaitu dengan probabilitas kepercayaan 95% dengan $F_{0,05;1;2} = 18.51$. Nilai *mean square of error* yang digunakan yaitu dari tabel 12.

$$\begin{aligned} neff &= \frac{9 \times 3}{1 + 2 + 2 + 2} \\ neff &= 3,8571 \\ CI &= \pm \sqrt{\frac{F_{0,05;1;2} \times MSError}{3,8571}} \\ CI &= \pm \sqrt{\frac{18,51 \times 0,3727}{3,8571}} = 1,3374 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu \text{ prediksi} - CI &\leq \mu \leq \mu \text{ prediksi} + CI \\ -4,7320 - 1,3374 &\leq \mu \leq -4,7320 + 1,3374 \\ -6,0694 &\leq \mu \leq -3,3946 \end{aligned}$$

Nilai interval tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan pada eksperimen konfirmasi.

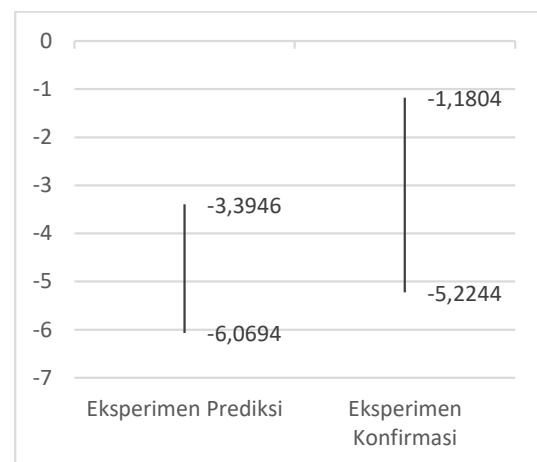
3.3 Eksperimen Konfirmasi

Tujuan dari eksperimen konfirmasi yaitu untuk validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh selama tahap sebelumnya yaitu tahap analisa. Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan mencetak spesimen sesuai parameter GRG dan level optimal yang telah diprediksi sebelumnya. *Output* dari eksperimen konfirmasi adalah menghasilkan interval kepercayaan konfirmasi. Berikut merupakan perhitungan interval kepercayaan konfirmasi sesuai persamaan 10.

$$\begin{aligned} CIc &= \pm \sqrt{F_{0,05;1;2} \times MSError \left[\left(\frac{1}{neff} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \right]} \\ CIc &= \pm \sqrt{18,51 \times 0,3727 \left[\left(\frac{1}{3,8571} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \right]} = 2,0220 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu \text{ konfirmasi} - CIc &\leq \mu \leq \mu \text{ konfirmasi} + CIc \\ -3,2024 - 2,0220 &\leq \mu \leq -3,2024 + 2,0220 \\ -5,2244 &\leq \mu \leq -1,1804 \end{aligned}$$

Langkah selanjutnya adalah membuat perbandingan antara interval kepercayaan eksperimen prediksi dan interval kepercayaan eksperimen konfirmasi. Gambar 3 menunjukkan perbandingan interval kedua eksperimen.



Gambar 3. Perbandingan Interval Kepercayaan Eksperimen

Berdasarkan grafik perhitungan serta perbandingan interval kepercayaan dari kedua eksperimen, menunjukkan bahwa kedua interval saling beririsan sehingga validasi eksperimen dapat dinyatakan berhasil.

4. KESIMPULAN

Kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan dua respon gabungan berupa kekuatan tarik dan proses *building time* produk yang optimal yaitu parameter *nozzel size* 0,8 mm, *layer height* 0.2 mm, *print speed* 50 mm/s, dan *infill pattern concentric*.

Pada respon **kekuatan tarik**, *nozzle size* memiliki kontribusi sebesar 20,57%, *layer height* 59,22%, *print speed* 5,20%, dan *infill pattern* 15,00%. Kontribusi pada respon **building time** yaitu *nozzle size* memiliki kontribusi sebesar 56,07%, *layer height* 27,40%, *print speed* 15,76%, dan *infill pattern* 0,77%. Dan kontribusi pada **respon gabungan**, parameter *nozzle size* memiliki kontribusi sebesar 44,39%, *layer height* 42,31%, *print speed* 1,18%, dan *infill pattern* 12,13%.

Berdasarkan uji hipotesis diketahui bahwa hanya parameter *layer height* yang memiliki pengaruh signifikan terhadap respon kekuatan tarik, hanya parameter *infill pattern* yang tidak

memiliki pengaruh signifikan terhadap respon *building time*, dan hanya parameter *print speed* yang tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap respon gabungan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada seluruh keluarga penulis, dosen pembimbing, teman – teman dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah berkontribusi baik moril maupun materiil dalam penyelesaian penulisan artikel.

6. PUSTAKA

- [1] Awwaliyah, N. M. Al, Karuniawan, B. W. and Purnomo, D. A. (2020) ‘Analisa Pengaruh Parameter 3D Printing Dengan Taguchi - *Grey Relational Analysis* Terhadap Kekasaran Permukaan Dan *Building time* Produk’. **Tugas Akhir**. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
- [2] Halimah, P. dan Ekawati, Y. (2020). ‘Penerapan Metode Taguchi Untuk Meningkatkan Kualitas Bata Ringan Pada UD. XY Malang’. *Journal of Industrial Engineering and Management Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 13-26. Universitas Ma Chung Malang.
- [3] Ilmaya, R. M. (2018). ‘Optimasi Kekerasan Baja S45C pada Proses *Hardening Helical Gear* Menggunakan Metode Taguchi’. *Proceedings Conference on Design Manufacture Engineering and its Application Program*, (2654), pp. 1–5. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- [4] Nasir, S.M. et al., 2011. Warpage Analysis on Thin Plate by Taguchi Method and Analysis of Variance (ANOVA) fo PC, PC/ABS and ABS Materials. *International Review of Mechanical Engineering*, Vol.5, No.6.
- [5] Rinanto, A. dan Wahyudi, S., 2017. Perkembangan Teknologi Rapid Prototyping: Study Literatur. *Jurnal Metris*, pp. 1411-3287.
- [6] Soejanto, I., 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [7] Suzen, Z. S., Hasdiansah dan Yuliyanto (2020). ‘Pengaruh Tipe *Infill* dan Temperatur *Nozzle* terhadap Kekuatan Tarik Produk 3D *Printing* Filamen Pla+ Esun’. **Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur**, Vol. 12, No. 2, pp. 73-80. Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.