

Analisis Pengaruh Variasi Parameter 3D *Printing* terhadap Kekuatan Tarik, Kekuatan Impak, dan *Building Time* menggunakan Metode Taguchi – Grey Relational Analysis

Ajeng Sukarno Putri ^{1*}, Bayu Wiro Karuniawan ², Farizi Rachman ³

Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*,2,3}

Email: ajengsukarnoputri11@gmail.com^{1*}; bayuwiro@ppns.ac.id²; farizirachman@ppns.ac.id³

Abstract – The use of 3D printing in the manufacturing industry is not only limited to making prototypes, but also used in engineering applications. Optimal results in every production process are something to be achieved. One of them is a product with high tensile strength and impact strength, and fast building time. This study discusses the optimization of 3D printing results which are used as reference materials in the development of 3D printing technology. The experimental design used in this study was the Taguchi method with the orthogonal matrix $L_9(3^4)$ with three replications. The optimal combination of combined response is obtained by using the Gray Relational Analysis approach. Furthermore, a confirmation experiment was carried out as a validation of the experiment's success. The optimal parameter results are layer height of 0.3 mm, infill pattern with a concentric pattern, and print speed of 60 mm/s. Based on the combined response analysis, the layer height parameter contribution is 51.576%, the infill pattern is 32.021%, and the print speed is 6.574%.

Keyword: 3D Printing, Building Time, Impact Strength, Tensile Strength, Taguchi – Grey Relational Analysis

Nomenclature

LH	layer height
IP	infill pattern
PS	print speed
mm	satuan LH
mm/s	satuan PS
s	satuan building time
MPa	satuan kekuatan tarik
J/mm²	satuan kekuatan impak

1. PENDAHULUAN

Dunia industri manufaktur terus mengalami perkembangan dari waktu ke waktu. Salah satu teknologi yang menunjang berkembangnya industri manufaktur pada era revolusi industri 4.0 adalah teknologi 3D *printing*. Dalam era revolusi industri 4.0, Kementerian Perindustrian (Kemenperin) mendorong industri manufaktur di Indonesia agar mampu menciptakan inovasi dengan memanfaatkan teknologi terkini, seperti *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), *Human Machine Interface*, *Robotic and Sensor Technology*, serta teknologi 3D *Printing* [1].

Teknologi 3D *printing* juga disebut sebagai *Additive Manufacturing* (AM) merupakan teknologi yang mampu membuat objek nyata dari *Computer Aided Design* (CAD). Proses pembentukan objek dengan cara menambahkan lapisan demi lapisan sampai objek tersebut jadi. Salah satu metode yang cukup populer dalam AM yaitu *Fused Deposition Modeling* (FDM), dimana produk yang dihasilkan dengan cara ekstrusi termoplastik melalui *nozzle*.

AM mempunyai kelebihan dibandingkan dengan metode manufaktur konvensional, antara lain kemampuan untuk membuat objek dengan geometri yang rumit, proses desain ke manufaktur yang sangat cepat, material sisa yang dihasilkan lebih sedikit, lebih mudah dalam proses pengembangan produk, *prototyping*, dan manufaktur [2].

FDM merupakan salah satu teknik *Rapid Prototyping* (RP) yang sering digunakan. Pada awal perkembangannya, produk yang dibuat dengan teknik RP hanya sebatas untuk pembuatan *prototype* saja. Namun, sekarang mulai banyak produk dengan menggunakan teknik RP yang digunakan dalam aplikasi teknik [3].

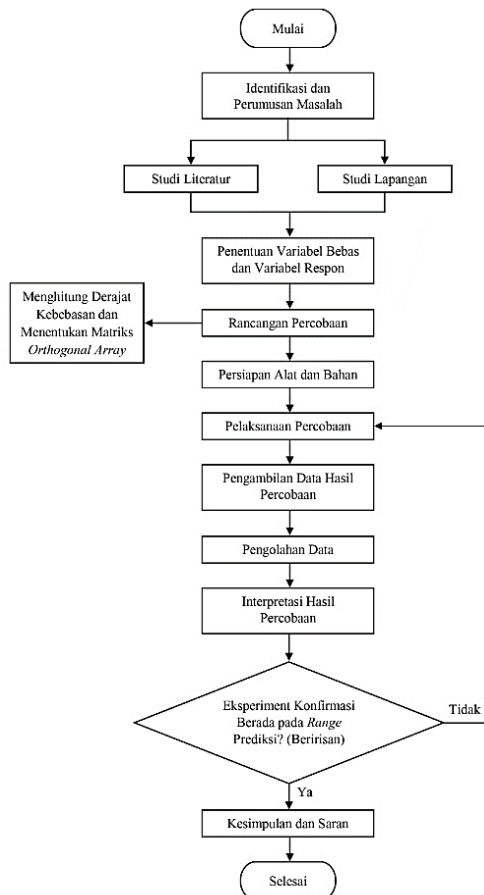
Contoh pemanfaatan teknologi FDM digunakan pada penelitian tentang rancang bangun protesis lengan pada bawah siku (amputasi transradikal) menggunakan material ABS. Tujuannya untuk menunjang kehidupan sehari-hari dalam lingkup genggam kuat (*power grip*) dan memiliki bentuk yang menarik untuk meningkatkan kepercayaan diri penyandang. Penelitian tersebut juga melakukan analisis genggam dan analisis uji tarik untuk memperoleh bentuk dan kekuatan tangan normal manusia. Namun, pada penelitian tersebut masih terdapat kekurangan mengenai unsur kekuatan pada bagian tangan dan jari. Untuk mekanisme *joint* pada jari dirasa kurang kuat sehingga kebutuhan *power grip* kurang terpenuhi [4].

Oleh karena itu, penelitian ini membahas tentang analisis kekuatan hasil cetak 3D *printing* yang tujuannya digunakan sebagai bahan referensi pada penelitian selanjutnya tentang pengembangan teknologi 3D *printing*.

Proses analisis digunakan untuk mencari produk dengan kuat tarik tertinggi, kuat dampak tertinggi, dan *building time* tercepat. Material yang digunakan pada penelitian ini yaitu filamen ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) dengan variabel bebas yang diteliti yaitu *layer height*, *infill pattern*, dan *print speed*.

2. METODOLOGI

Tahapan penelitian dilakukan berdasarkan diagram alir di bawah ini agar penelitian lebih terarah sesuai dengan tujuan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Penentuan Variabel Respon dan Variabel Bebas

a. Variabel Respon

1. Building Time

Building time mempunyai karakteristik *Smaller is Better* yang berarti semakin kecil *building time* yang dibutuhkan, maka semakin baik kualitasnya. *Building time* dipilih menjadi salah satu variabel respon dikarenakan *building time* sangat berpengaruh terhadap efisiensi waktu dalam proses pembentukan produk.

2. Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik mempunyai karakteristik *Larger is Better* yang berarti semakin besar nilai kuat tarik yang dimiliki, maka semakin baik kualitasnya. Kekuatan tarik dipilih menjadi salah satu variabel

respon dikarenakan keinginan untuk menggali informasi mengenai parameter optimum untuk menghasilkan objek cetak dengan kuat tarik tertinggi menggunakan filamen ABS dengan tujuan bahwa hasil dari penelitian ini dapat dijadikan tolak ukur tentang kekuatan tarik bahan tersebut.

3. Kekuatan Impak

Kekuatan dampak mempunyai karakteristik *Larger is Better* yang berarti semakin besar nilai kuat dampak yang dimiliki, maka semakin baik kualitasnya. Kekuatan dampak dipilih menjadi salah satu variabel respon dikarenakan keinginan untuk menggali informasi mengenai parameter optimum untuk menghasilkan objek cetak dengan kuat dampak tertinggi menggunakan filamen ABS dengan tujuan bahwa hasil dari penelitian ini dapat dijadikan tolak ukur tentang kekuatan dampak bahan tersebut.

b. Variabel Bebas

1. Layer Height

Layer height merupakan jarak antar lapisan yang dapat diatur ketinggiannya untuk proses 3D printing.

2. Infill Pattern

Infill pattern merupakan pola yang digunakan untuk mengisi produk 3D printing. Perbedaan pola yang digunakan pada produk mempengaruhi kekuatan dan ketahanan struktur internal produk.

3. Print Speed

Print speed adalah kecepatan yang digunakan *extruder* saat mengeluarkan filamen mengikuti *building size* yang sudah diatur oleh *software*.

2.2 Rancangan Percobaan

Pada penelitian ini, nilai dari setiap level dan tipe *infill* ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1: Variabel Bebas

Variabel Bebas	Level 1	Level 2	Level 3
<i>Layer Height</i> (mm)	0.1	0.2	0.3
<i>Infill Pattern</i>	<i>Line</i>	<i>Grid</i>	<i>Concentric</i>
<i>Print Speed</i> (mm/s)	60	70	80

Berdasarkan perhitungan derajat kebebasan, matriks *Orthogonal Array* yang sesuai adalah $L_9(3^4)$.

Tabel 2: Rancangan Percobaan

Eksperimen ke-	Variabel Bebas		
	<i>Layer Height</i> (mm)	<i>Infill Pattern</i>	<i>Print Speed</i> (mm/s)
1	0.1	<i>Line</i>	60
2	0.1	<i>Grid</i>	80
3	0.1	<i>Concentric</i>	100
4	0.2	<i>Line</i>	80
5	0.2	<i>Grid</i>	100
6	0.2	<i>Concentric</i>	60
7	0.3	<i>Line</i>	100
8	0.3	<i>Grid</i>	60
9	0.3	<i>Concentric</i>	80

2.3 Persiapan Alat dan Bahan

a. Alat

1. Mesin 3D Printing

Mesin ini merupakan alat utama yang digunakan untuk mencetak spesimen. Mesin 3D printing yang digunakan pada penelitian ini merupakan mesin 3D printing milik Jade 3D Printing Surabaya dengan merek Creality seri CR 10 V3. Mesin 3D printing Creality CR 10 V3.



Gambar 2. Mesin 3D Printing Creality CR 10 V3

2. Mesin Uji Tarik

Mesin ini merupakan alat utama untuk melakukan pengujian tarik pada spesimen hasil 3D printing. Pada penelitian ini, mesin uji tarik yang digunakan milik Politeknik Negeri Malang dengan merek Tarno Grocki yang mempunyai kapasitas sebesar 100 kN.

3. Mesin Uji Impak

Mesin ini merupakan alat utama untuk melakukan pengujian impact pada spesimen hasil 3D printing. Pada penelitian ini, mesin uji impact yang digunakan milik Politeknik Negeri Malang yang mempunyai panjang lengan sebesar 62 cm dan beban bandul sebesar 8,1 kg.

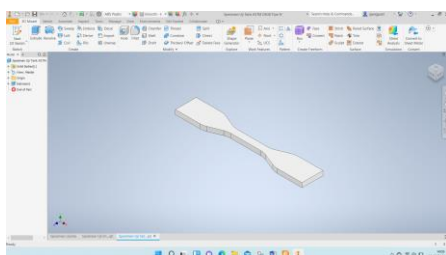
b. Bahan

1. Filamen ABS

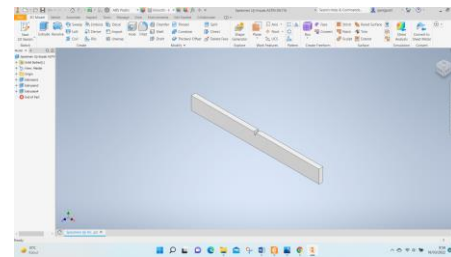
Filamen ABS merupakan material yang digunakan untuk membuat spesimen uji. Filamen ABS yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai merek CCTREE.

2. File dengan Format Stereo Lithography (STL)

Penelitian ini dimulai dengan pembuatan desain spesimen tarik sesuai standar ASTM D638-14 tipe IV [5] dan spesimen impact sesuai standar ASTM D6110 [6] menggunakan software Autodesk Inventor Profesional 2020. Sebelum dimasukkan ke software slicer, desain 3D spesimen diekspor dengan format STL.



Gambar 3. Spesimen Uji Tarik



Gambar 4. Spesimen Uji Impak

2.4 Pengolahan Data

Data hasil pengukuran dan pengujian dianalisis menggunakan metode Taguchi – Grey Relational Analysis dengan tahapan sebagai berikut [7]:

a. Perhitungan Nilai Rasio S/N

Kekuatan tarik dan kekuatan impact memiliki karakteristik *larger is better* dan *building time* memiliki karakteristik *smaller is better* yang nilainya didapatkan dari persamaan berikut:

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

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

Keterangan:

n = banyaknya data

y_i = data respon pengamatan ke- i

b. Perhitungan Normalisasi Nilai rasio S/N

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

Keterangan:

$\text{Max } X_o^o(k)$ = nilai maksimum rasio S/N

$\text{Min } X_o^o(k)$ = nilai minimum rasio S/N

$X_o^o(k)$ = nilai rasio S/N setiap eksperimen

k = eksperimen yang dilakukan

c. Perhitungan Simpangan Deviasi

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

Keterangan:

$X_0^*(k)$ = nilai rasio S/N normalisasi terbesar

$X_i^*(k)$ = nilai rasio S/N normalisasi pada eksperimen ke- i

d. Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC)

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

Keterangan:

\square = koefisien pembeda (0.5)

Δ_{min} = nilai terendah dari rangkaian deviasi

Δ_{maks} = nilai tertinggi dari rangkaian deviasi

$\Delta_{oi}(k)$ = nilai deviasi

e. Perhitungan Grey Relational Grade (GRG)

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

Keterangan:

\square_i^* = nilai GRC

n = jumlah respon yang diteliti

f. Perhitungan Analysis of Varians (ANOVA)

ANOVA digunakan untuk menganalisis data eksperimen dari perhitungan derajat kebebasan (DF), jumlah kuadrat (SS), kuadrat tengah (MS) dan F_{hitung} .

g. Perhitungan Parameter Optimal

Parameter dikatakan optimal apabila memiliki nilai rata-rata rasio S/N terbesar dari ketiga level.

h. Perhitungan Prediksi GRG yang Optimal

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

Keterangan:

Y = rata-rata GRG

A/B/C = GRG optimal pada faktor A/B/C

i. Interval Kepercayaan

Berikut merupakan rumus interval kepercayaan eksperimen prediksi:

$$CI_p = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;df_e} MS_e}{n_{eff}}} \quad (8)$$

Keterangan :

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

$F_{\alpha;1;df_e}$ = rasio F

MS_e = rata-rata kuadrat error

Berikut merupakan rumus interval kepercayaan eksperimen konfirmasi:

$$CI_k = \pm \sqrt{F_{\alpha;1;V_e} MS_e \left[\left(\frac{1}{n_{eff}} \right) + \left(\frac{1}{r} \right) \right]} \quad (9)$$

Keterangan :

r = jumlah eksperimen konfirmasi

2.10 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk validasi terhadap kesimpulan hasil prediksi kombinasi parameter yang didapatkan dari analisis data sebelumnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengambilan Data

Tahapan pengambilan data pada penelitian ini dibagi menjadi tiga yaitu, pengambilan data *building time*, kekuatan tarik, dan kekuatan impact. Tabel 3 di bawah ini merupakan rangkuman hasil pengambilan data pada masing-masing variabel respon.

Tabel 3: Data Keseluruhan Percobaan

Kombinasi	Replikasi	Rata-Rata Building Time (s)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Harga Impact (J/mm ²)
1	1	5100.000	44.429	0.184
	2	5100.000	44.334	0.187
	3	5070.000	43.285	0.184
2	1	3135.500	36.023	0.187
	2	3108.500	33.534	0.187
	3	3099.000	35.009	0.141
3	1	2534.500	45.666	0.233
	2	2536.000	44.951	0.236
	3	2541.500	45.229	0.279

4	1	2227.500	40.951	0.356
	2	2223.500	41.038	0.360
	3	2225.500	37.210	0.325
5	1	1497.000	28.734	0.236
	2	1491.000	37.656	0.237
	3	1495.000	36.087	0.283
6	1	2136.500	45.027	0.376
	2	2130.500	42.759	0.386
	3	2133.000	41.487	0.340
7	1	1459.000	38.898	0.269
	2	1457.000	23.997	0.313
	3	1439.500	36.773	0.356
8	1	1480.000	24.852	0.320
	2	1484.500	29.379	0.410
	3	1483.500	35.006	0.356
9	1	1378.000	31.622	0.325
	2	1416.000	38.747	0.347
	3	1411.000	36.340	0.325

3.2 Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan data diawali dengan perhitungan rasio S/N dengan karakteristik *smaller is better* pada Persamaan 1 untuk respon *building time* dan karakteristik *larger is better* pada Persamaan 2 untuk respon kekuatan tarik dan kekuatan impact.

Tabel 4: Hasil Perhitungan Rasio S/N

Kombinasi	Building Time	Kekuatan Tarik	Kekuatan Impact
1	-74.134	32.870	-14.651
2	-69.868	30.834	-15.546
3	-68.088	33.118	-12.138
4	-66.949	31.956	-9.224
5	-63.489	30.483	-12.059
6	-66.581	32.673	-8.739
7	-63.238	29.806	-10.271
8	-63.421	29.216	-8.956
9	-62.934	30.927	-9.582

Selanjutnya yaitu tahap perhitungan normalisasi rasio S/N menggunakan Persamaan 3.

Tabel 5: Hasil Perhitungan Normalisasi Rasio S/N

Kombinasi	Building Time	Kekuatan Tarik	Kekuatan Impact
1	0.000	0.937	0.132
2	0.381	0.415	0.000
3	0.540	1.000	0.501
4	0.642	0.702	0.929
5	0.950	0.325	0.512
6	0.674	0.886	1.000
7	0.973	0.151	0.775

8	0.956	0.000	0.968
9	1.000	0.439	0.876

Selanjutnya yaitu tahap perhitungan simpangan deviasi menggunakan Persamaan 4.

Tabel 6: Hasil Perhitungan Simpangan Deviasi

Kombina si	Building Time	Kekuatan Tarik	Kekuatan Impak
1	1.000	0.063	0.868
2	0.619	0.585	1.000
3	0.460	0.000	0.499
4	0.358	0.298	0.071
5	0.050	0.675	0.488
6	0.326	0.114	0.000
7	0.027	0.849	0.225
8	0.044	1.000	0.032
9	0.000	0.561	0.124

Selanjutnya yaitu tahap perhitungan GRC menggunakan Persamaan 5.

Tabel 7: Hasil Perhitungan GRC

Kombina si	Building Time	Kekuatan Tarik	Kekuatan Impak
1	0.333	0.887	0.365
2	0.447	0.461	0.333
3	0.521	1.000	0.500
4	0.582	0.627	0.875
5	0.910	0.425	0.506
6	0.606	0.814	1.000
7	0.948	0.371	0.690
8	0.920	0.333	0.940
9	1.000	0.471	0.801

Selanjutnya yaitu tahap perhitungan GRG menggunakan Persamaan 6.

Tabel 8: Hasil Perhitungan GRG

Kombina si	GRG	Rasio S/N GRG	Ranking
1	0.529	-5.536	8
2	0.414	-7.668	9
3	0.674	-3.431	5
4	0.695	-3.163	4
5	0.614	-4.240	7
6	0.807	-1.867	1
7	0.670	-3.484	6
8	0.731	-2.721	3

Selanjutnya yaitu perhitungan ANOVA respon gabungan.

Tabel 9: ANOVA GRG

Sour ce	D F	SS	Contri bution %	MS	F _{hitung}
LH	2	13.218	51.58%	6.6089	5.25
IP	2	8.206	32.02%	4.1031	3.26
PS	2	1.685	6.57%	0.8424	0.67
Error	2	2.519	9.83%	1.2594	
Total	8	25.628	100.00 %		

Penelitian ini menggunakan F_{tabel} dengan tingkat kepercayaan 95%, dan $\alpha = 0.05$; DF_1 = jumlah derajat kebebasan faktor; DF_2 = jumlah derajat kebebasan error. Keputusan yang dibuat yaitu apabila $F_{hitung} < F_{tabel}$, maka H_0 diterima yang berarti tidak adanya pengaruh signifikan terhadap respon. Sedangkan

apabila $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka H_1 diterima yang berarti adanya pengaruh signifikan terhadap respon.

Tabel 10: Hasil Uji Hipotesis

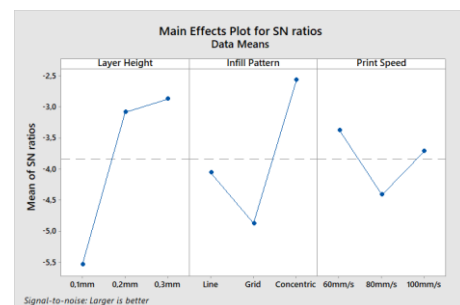
Respon	F _{hitung}			F _{tabel}	Hipotes is
	LH	IP	PS		
Building Time	118,031	15,379	19,534	19	LH dan PS terima H_1
Kekuatan Tarik	40,657	31,441	1,593	19	LH dan IP terima H_1
Kekuatan Impak	5,932	1,000	0,151	19	Semua faktor tolak H_1
GRG	5,248	3,258	0,669	19	Semua faktor tolak H_1

Selanjutnya dilakukan perhitungan parameter optimal untuk mengetahui level yang paling berpengaruh pada respon gabungan. Perhitungan ini menggunakan data rasio S/N GRG.

Tabel 11: Parameter Optimal GRG

Level	LH	IP	PS
1	-5,545	-4,061	-3,375
2	-3,090	-4,876	-4,415
3	-2,873	-2,570	-3,718
Delta	2,672	2,306	1,040
Rank	1	2	3

Tabel 4.17 menunjukkan bahwa parameter optimal terhadap respon gabungan yaitu LH pada level 3 dengan nilai 0,3 mm, IP pada level 3 dengan pola concentric, dan PS pada level 1 dengan nilai 60 mm/s.



Gambar 5. Grafik Level Optimal Respon Gabungan

Berikut adalah perhitungan nilai prediksi GRG optimal menggunakan Persamaan 7.

$$\begin{aligned} \mu_{prediksi} &= \bar{y}_m + \sum_{i=1}^q \gamma_i - \gamma_m \\ &= -3,836 + ((-2,873 - 3,836)) + \\ &\quad (-2,570 - 3,836) + \\ &\quad (-3,375 - 3,836) \\ &= -1,146 \end{aligned}$$

Tahap selanjutnya yaitu interpretasi hasil percobaan yang bertujuan untuk mengetahui nilai interval acuan yang akan dibandingkan dengan nilai interval eksperimen konfirmasi. Perhitungan interval kepercayaan menggunakan Persamaan 8. Tingkat

kepercayaan yang digunakan yaitu 95% dengan F_{tabel} yaitu $F_{(0,05;1;2)} = 18,513$.

$$n_{ef} = \text{banyaknya pengamatan efektif}$$

$$= \frac{9 \times 3}{1+2+2+2}$$

$$= 3,857$$

$$Cl_p = \sqrt{\frac{F_{\alpha; d_{f1}; d_{f2}} MS_E}{n_{eff}}}$$

$$= \sqrt{\frac{18,513 \times 1,259}{3,857}}$$

$$= \pm 2,459$$

$$\mu_{prediksi} - Cl_p \leq \mu_{prediksi} \leq \mu_{prediksi} + Cl_p$$

$$-1,146 - 2,459 \leq \mu_{prediksi} \leq -1,146 + 2,459$$

$$-3,604 \leq \mu_{prediksi} \leq 1,313$$

3.3 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan parameter optimal GRG untuk respon gabungan. Berikut merupakan perhitungan interval kepercayaan konfirmasi sesuai persamaan 9.

$$Cl_k = \sqrt{F_{\alpha; d_{f1}; d_{f2}} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$= \sqrt{18,513 \times 1,259 \left[\frac{1}{3,857} + \frac{1}{3} \right]}$$

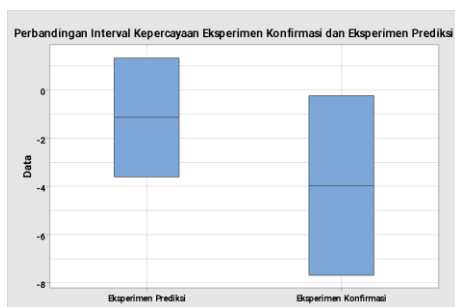
$$= \pm 3,717$$

$$\mu_{konfirmasi} - Cl_k \leq \mu_{konfirmasi} \leq \mu_{konfirmasi} + Cl_k$$

$$-3,965 - 3,717 \leq \mu_{konfirmasi} \leq -3,965 + 3,717$$

$$-7,682 \leq \mu_{konfirmasi} \leq -0,248$$

Berdasarkan hasil perhitungan interval kepercayaan, didapatkan nilai minimum kepercayaan sebesar -7,682 dan nilai maksimum kepercayaan sebesar -0,248. Selanjutnya nilai interval kepercayaan eksperimen prediksi dengan nilai interval kepercayaan eksperimen konfirmasi dibuat perbandingan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. Perbandingan Interval Kepercayaan Eksperimen Konfirmasi dan Eksperimen Prediksi

Berdasarkan gambar di atas dapat diketahui bahwa grafik eksperimen prediksi dan eksperimen konfirmasi saling beririsan, hal tersebut berarti kombinasi level dari variabel bebas dinyatakan berhasil.

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan ANOVA pada respon gabungan, dapat diketahui bahwa parameter proses *layer height*, *infill pattern*, dan *print speed* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon gabungan. Namun, ketiga parameter proses tersebut memberikan kontribusi terhadap respon gabungan sebesar 51,576%, 32,021%, dan 6,574%.

Kombinasi parameter proses yang optimal pada mesin 3D *printing* menggunakan material ABS terhadap respon *building time*, kekuatan tarik, dan kekuatan impact secara bersamaan yaitu parameter *layer height* pada level 3 dengan nilai 0,3 mm, *infill pattern* pada level 3 dengan pola *concentric*, dan *print speed* pada level 1 dengan nilai 60 mm/s.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

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

7. PUSTAKA

- [1] Kemenperin, "Implementasi Industri 4.0 Memacu Investasi Teknologi dan Produksi," 2019. <https://kemenperin.go.id/artikel/20160/Implementasi-Industri-4.0-Memacu-Investasi-Teknologi-dan-Produksi>.
- [2] D. Andriyansyah, Herianto, and Purfaji, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Filamen Polylactic Acid Menggunakan Metode Taguchi," *Semin. Nas. Pendidik. Tek. Otomotif*, no. ISSN : 2338-0284, pp. 61–68, 2018.
- [3] R. A. Tanjung, M. I. P. Hidayat, and S. T. Wicaksono, "Analisis Distribusi Tegangan pada Struktur Sandwich yang Dipreparasi dengan PLA 3D Printer," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [4] M. Rahman and D. Kuswanto, "Rancang Bangun Protesis Lengan untuk Tunadaksa pada Bawah Siku (Amputasi Transradial)," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [5] ASTM (American Society for Testing and Material). 2015. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International. United States.
- [6] ASTM (American Society for Testing and Material). 2010. *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics*. ASTM International. United States.
- [7] I. Soejanto, *Rekayasa Kualitas : Eksperimen dengan Teknik Taguchi*. Penerbit Yayasan Humaniora, 2008.