

Analisa Pengaruh Parameter 3D Printing dengan Metode Taguchi – Grey Relational Analysis Terhadap Kekasaran Permukaan dan Building Time Produk

Nurul Maulidah Al Awwaliyah^{1*}, Bayu Wiro Karuniawan², Dhika Aditya Purnomo³

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

Email: alawwaliya18@gmail.com^{1*};

Abstract - Additive Manufacturing Technology (AM) is interesting concern to be developed or usually called by 3D printing. In the production process, good quality output and optimal production are very important. Kind of dependent variable that affects product quality and high selling value is surface roughness, and that becomes the value of efficiency is the products build time. In this study, independent variable or parameters namely layer height; nozzle temperature; and print speed are factors which is researched to obtain the optimal output. The design of experiment was made using the Taguchi method with orthogonal matrix of $L_9(3^3)$ by 3 times replication. Result analysis is using Grey Relational Analysis to obtain the optimal combination of parameters through the combined response. After conducting prediction experiments and getting optimal parameter predictions, a confirmation experiment is needed as a validation of the experiment's success. The optimal parameter results are the layer height of 0.05 mm, the nozzle temperature of 190°C, and the print speed of 60mm/s with average of roughness surface of 3.938 μ m and production time of $\pm 109,933$ minutes. Based on analysis, the contribution of layer height parameters were 41.2929%, the nozzle temperature 6.8134%, and the print speed 40.3769% through the combined response.

Keyword: 3D printing, Additive Manufacturing, parameters, Taguchi Grey Relational Analysis

Nomenclature

LH layer height atau tinggi lapisan
NT nozzle temperature atau suhu extruder
PS print speed atau kecepatan cetak
mm satuan dari LH
°C satuan dari NT
mm/s satuan dari PS
 μ m nilai kekasaran (Ra)

1. PENDAHULUAN

Teknologi *Additive Manufacturing* (AM) merupakan teknologi yang terus berevolusi dengan prinsip kerja membuat objek 3D dengan menggunakan CAD (*Computer Aided Design*). *Additive Manufacturing* telah menunjukkan untuk menjadi sebuah langkah inovasi manufaktur masa depan dengan kemampuannya dalam mewujudkan sebuah produk dan kapabilitasnya untuk memanufaktur desain yang kompleks untuk menjadi suatu produk [4]. Perwujudan teknologi ini biasa disebut sebagai *3D printing*. *3D printing* dianggap memiliki tingkat efisiensi yang baik karena prinsip kerjanya yaitu menghasilkan atau membentuk suatu produk sesuai dengan material (filamen) yang dipakai sehingga tidak menghasilkan sisa benda kerja (*waste*).

Pada proses produksinya, banyak hal yang perlu diperhatikan untuk mendapatkan *output* dengan kualitas yang baik dan produksi optimal. Secara umum setiap karakteristik kualitas memiliki suatu target [5]. Salah satu variabel

yang mempengaruhi target kualitas produk dan nilai jual yang tinggi yaitu tingkat kekasaran permukaan (*surface roughness*). Semakin halus permukaan maka kualitas dan harga jual suatu produk tersebut semakin tinggi. Selain itu, variabel lain yang menjadi penilaian efisiensi optimal produk adalah waktu proses pembuatan produk (*building time*). Semakin cepat waktu produksi, maka akan semakin efisien karena menghemat biaya (*cost efficient*) dan waktu.

Parameter merupakan faktor yang dapat diubah – ubah sesuai pengaturan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan keinginan. Pada penelitian ini parameter dalam mesin 3D printing, yaitu *layer height*, *nozzle temperature*, dan *print speed* merupakan variabel bebas yang akan diteliti dengan tujuan untuk mendapatkan hasil produk yang memiliki permukaan yang halus dengan waktu proses produksi optimal. Mesin yang digunakan yaitu 3D printer teknologi FFF (*Fused Filament Fabrication*) atau dikenal dengan teknologi FDM (*Fused Deposition Modelling*). Menggunakan *filament* berbahan PLA (*Polylactic Acid*). Material dipanaskan melalui *nozzle* yang dipanaskan, seperti proses ekstrusi dan bergerak sesuai koordinat *part* yang dibentuk. Teknologi FDM menggunakan *extruder* panas. Plastik dipanaskan dahulu di dalam *extruder* hingga *melting* dan diekstrusikan melalui *nozzle* kemudian digerakkan membuat susunan layer hingga membentuk produk yang diinginkan [2]. Desain eksperimen dilakukan dengan

menggunakan metode Taguchi dan analisa hasil menggunakan *Grey Relational Analysis* untuk mendapatkan kombinasi parameter yang optimum. Penelitian ini juga ditujukan untuk mengetahui besar kontribusi serta pengaruh parameter terhadap *output* kekasaran permukaan dan *building time* produk.

2. METODOLOGI

2.1 Desain Eksperimen

Variabel respon yang diteliti yaitu kekasaran permukaan dan *building time* produk. Kekasaran permukaan proses permesinan adalah harga kekasaran rata-rata aritmatika (Ra) dari garis rata-rata profil [5]. Sedangkan *building time* merupakan lama waktu yang ditempuh untuk membuat suatu produk.

Penelitian ini menggunakan variabel bebas yang masing – masing dengan 3 level terdiri atas *layer height*, *nozzle temperature*, dan *print speed*. Tabel 1 menunjukkan penentuan variasi parameter berdasarkan pertimbangan setelah dilakukan observasi, kemampuan mesin dan rekomendasi parameter sesuai *manual book*.

Tabel 1: Tabel Variabel Bebas

Variabel Bebas	Level 1	Level 2	Level 3
LH (mm)	0.05	0.15	0.25
NT(°C)	190	200	210
PS (mm/s)	20	40	60

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 replikasi sebanyak 3 kali. Matriks tersebut memiliki total 9 eksperimen dan 3 faktor dengan 3 level pada masing – masing faktor. Tabel 2 menunjukkan desain eksperimen sesuai perhitungan dengan menggunakan *Software Minitab18*.

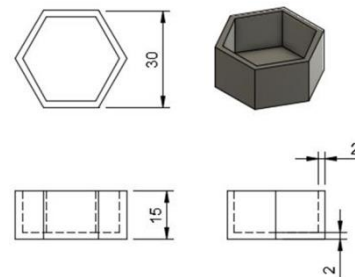
Tabel 2: Desain Eksperimen $L_9(3^4)$

Eksperimen	Variabel Bebas		
	LH(mm)	NT(°C)	PS (mm/s)
1	0,05	190	20
2	0,05	200	40
3	0,05	210	60
4	0,15	190	40
5	0,15	200	60
6	0,15	210	20
7	0,25	190	60
8	0,25	200	20
9	0,25	210	40

2.2 Alat dan Bahan Eksperimen

Alat yang digunakan untuk melakukan eksperimen antara lain yaitu mesin 3D *printer* merk Sindoh 3DWOX 2D (teknologi FFF atau *Fused Filament Fabrication*); komputer dengan aplikasi 3DWOX *Desktop Slicer*; *surface roughness tester* (mitutoyo SJ310) untuk menguji kekasaran permukaan; *stopwatch* untuk mengukur waktu proses atau *building time*.

Bahan yang diperlukan dalam eksperimen diantaranya adalah filamen jenis PLA (*Poly lactid Acid*) diameter 1.75mm; dan *file* hasil desain bentuk spesimen yang dibuat berbentuk *hexagonal*. Bentuk *hexagonal* atau segi 6 ini dipilih agar dapat melihat pengaruh pembentukan produk pada arah X dan Y. Gambar 1 menunjukkan sketsa desain spesimen. Eksperimen penelitian dilakukan di Laboratorium CNC, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS).



Gambar 1 : Sketsa Desain Spesimen

2.3 Taguchi – Grey Relational Analysis

Tahap pengolahan data dilakukan menggunakan Taguchi – *Grey Relational Analysis*. Metode Taguchi merupakan metodologi baru di bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu bersamaan menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin [3]. 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*. Kedua respon pada penelitian ini menggunakan kriteria rasio S/N *smaller is better*. *Smaller is better*

$$\frac{S}{N} \text{ rasio} = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \quad (1)$$

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.

$$X_i^*(k) = \frac{X_o^0(k) - \text{Min } X_o^0(k)}{\text{Max } X_o^0(k) - \text{Min } X_o^0(k)} \quad (2)$$

Keterangan :

Max $X_o^0(k)$ = Nilai maksimum perhitungan rasio S/N

Min $X_o^0(k)$ = Nilai minimum perhitungan rasio S/N

$X_o^0(k)$ = Nilai dari rasio S/N disetiap eksperimen

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

k = Eksperimen yang dilakukan

3. Perhitungan Simpangan Deviasi

Perhitungan simpangan deviasi yaitu dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta_{oi}(k) = |X_o^0(k) - X_i^*(k)| \quad (3)$$

Keterangan :

Δ_{oi} = penyimpangan disetiap eksperimen

$X_o^0(k)$ = nilai rasio S/N normalisasi terbesar

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

4. Grey Relational Coefficient (GRC)

$$\gamma_i^*(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (4)$$

Keterangan :

Δ_{\min} = nilai terendah dari simpangan deviasi

Δ_{\max} = nilai tertinggi dari simpangan deviasi

ζ = koefisien pembeda (nilai $\zeta = 0,5$)

γ_i^* = Grey Relational Coefficient

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

5. Grey Relational Grade (GRG)

$$y_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_i^*(k) \quad (5)$$

Keterangan :

γ_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:

$$\mu_{\text{prediksi}} = Y + (A - Y) + (B - Y) + (C - Y) \quad (6)$$

Keterangan :

Y = nilai rata-rata keseluruhan GRG

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

A/B/C

8. Interpretasi hasil

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 [1].

$$\rho = \frac{SS_A}{SS_{\text{(total)}}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan :

SS_A = Jumlah kuadrat faktor A

SS_T = Sum of square total

b. Interval kepercayaan eksperimen prediksi

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

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

c. Interval kepercayaan eksperimen konfirmasi

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

Keterangan :

r = jumlah eksperimen konfirmasi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Hasil Eksperimen Prediksi

Setelah dilakukan pengujian kekasaran permukaan 27 spesimen dengan detail setiap spesimen ada 6 sisi yang diuji dan pengukuran waktu produksi (*building time*) maka didapatkan rangkuman hasil pada tabel 3.

Tabel 3 : Data Hasil Eksperimen Prediksi

Eksperimen	Replikasi	Rata - Rata Ra 6 sisi (µm)	Build Time (minutes)
1	1	4.860	166.667
	2	4.646	166.700
	3	4.975	166.650
2	1	4.179	121.450
	2	4.236	123.133
	3	4.486	123.117
3	1	4.893	110.433
	2	5.418	109.867
	3	4.830	109.933
4	1	10.249	39.400
	2	10.152	39.367
	3	10.178	39.367
5	1	9.415	35.033
	2	9.765	35.013
	3	9.562	34.983
6	1	13.492	54.067
	2	10.628	54.050
	3	10.599	54.033
7	1	17.895	21.167
	2	17.700	21.150
	3	18.185	21.150
8	1	19.005	32.700
	2	19.208	32.600
	3	18.746	32.600
9	1	18.550	23.767
	2	18.287	23.767
	3	18.241	23.767

3.2 Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan data diawali dengan perhitungan rasio S/N dengan kriteria *smaller is better* pada persamaan 1. Hal tersebut mengingat target respon yang diharapkan adalah semakin kecil nilai kekasaran permukaan 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	Kekasaran Permukaan	Building Time
1	-13.6766	-44.4373
2	-12.6739	-41.7676
3	-14.0722	-40.8340
4	-20.1660	-31.9050
5	-19.6286	-30.8838
6	-21.3280	-34.6559
7	-25.0705	-26.5085
8	-25.5693	-30.2732
9	-25.2772	-27.5194

Selanjutnya yaitu tahap perhitungan normalisasi rasio S/N menggunakan persamaan 2 dilanjutkan menghitung simpangan deviasi dengan persamaan 3. Hasil perhitungan disajikan pada tabel 5.

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

Eksperimen	Normalisasi S/N		Simpangan Deviasi	
	Kekasaran Permukaan	Build Time	Kekasaran Permukaan	Build Time
1	0.9222	0.0000	0.0778	1.0000
2	1.0000	0.1489	0.0000	0.8511
3	0.8916	0.2010	0.1084	0.7990
4	0.4190	0.6990	0.5810	0.3010
5	0.4607	0.7560	0.5393	0.2440
6	0.3289	0.5456	0.6711	0.4544
7	0.0387	1.0000	0.9613	0.0000
8	0.0000	0.7900	1.0000	0.2100
9	0.0226	0.9436	0.9774	0.0564

Hasil perhitungan simpangan deviasi kemudian akan dipakai untuk mencari nilai *grey relational coefficient* sesuai persamaan 4. 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 5. Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan GRC dan GRG.

Tabel 6 : Hasil Perhitungan GRC dan GRG

Eks.	GRC		GRG	S/N GRG	Rank
	Kekasaran Permukaan	Build Time			
1	0.8654	0.3333	0.5994	-4.4461	5
2	1.0000	0.3701	0.6850	-3.2857	1
3	0.8218	0.3849	0.6033	-4.3887	4
4	0.4625	0.6242	0.5434	-5.2979	7
5	0.4811	0.6720	0.5765	-4.7833	6
6	0.4269	0.5239	0.4754	-6.4586	9
7	0.3422	1.0000	0.6711	-3.4645	2
8	0.3333	0.7042	0.5188	-5.7002	8
9	0.3384	0.8987	0.6186	-4.1725	3

Tahap berikutnya yaitu *Analysis of Variance* (ANOVA). Dilakukan analisis untuk masing – masing respon kekasaran permukaan, *building time*, dan respon GRG (*output* gabungan antara kekasaran permukaan 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 9 adalah hasil ANOVA menggunakan *software* Minitab18.

Tabel 7 : ANOVA Kekasaran Permukaan

Source	df	% contribution	SS	MS	F_{hitung}
LH	2	98.75	211.91	105.96	836.18
NT	2	0.63	1.34	0.67	5.29
PS	2	0.50	1.08	0.54	4.26
Error	2	0.19	0.25	0.13	
Total	8	100	214.59		

Tabel 8 : ANOVA Building Time

Source	df	% contribution	SS	MS	F_{hitung}
LH	2	93.50	319.45	159.73	64832.35
NT	2	0.00	0.00	0.00	0.85
PS	2	6.50	22.19	11.10	4503.56
Error	2	0.00	0.001	0.003	
Total	8	100	341.65		

Tabel 9 : ANOVA GRG

Source	df	% contribution	SS	MS	F_{hitung}
LH	2	41.29	3.47	1.74	3.59
NT	2	6.81	0.57	0.29	0.59
PS	2	40.38	3.40	1.70	3.51
Error	2	11.52	0.97	0.48	
Total	8	100	8.41		

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 90% dengan $\alpha = 0.10$; $df1 = \text{jumlah faktor} - 1$; $df2 = \text{jumlah eksperimen} - \text{jumlah faktor}$. Berikut hasil hipotesis pada tabel 10.

Tabel 10 : Hasil Uji Hipotesis

Respon	F_{hitung}			F_{tabel}	Hipotesis
	LH	NT	PS		
Kekasaran Permukaan	836.18	5.29	4.26	3.46	Semua faktor terima H_1
Building Time	64832.35	0.85	4503.56	3.46	LH dan PS terima H_1
GRG	3.59	0.59	3.51	3.46	LH dan PS terima H_1

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 11.

Tabel 11 : Parameter Optimal GRG

Level	LH	NT	PS
1	-4.04018	-4.4028	-5.534971
2	-5.5133	-4.5898	-4.2520485
3	-4.44574	-5.0066	-4.212203
Delta	1.473122	0.603779	1.32276804
Rank	1	3	2

Semakin besar nilai rata-rata tiap level maka semakin tinggi kontribusi terhadap respon gabungan. Kombinasi parameter optimal yang didapat adalah faktor A (LH) pada level 1 yang bernilai 0.05 mm, faktor B (NT) pada level 1 dengan nilai 190°C, dan faktor C (PS) pada level 3 atau 60 mm/s. 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 6 untuk digunakan pada perhitungan interval kepercayaan prediksi sebagai pembanding dengan nilai hasil eksperimen konfirmasi sehingga dapat ditarik kesimpulan pembuktian keberhasilan eksperimen konfirmasi.

$$\begin{aligned} \mu_{\text{prediksi}} &= Y + (A - Y) + (B - Y) + (C - Y) \\ &= (-4.6664) + ((-4.0402) - (-4.6664)) + \\ &\quad ((-4.4028) - (-4.6664)) + ((-4.2122) - \\ &\quad (-4.6664)) \\ &= -3.3224 \end{aligned}$$

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. F_{tabel} yang dipilih yaitu dengan probabilitas kepercayaan 90% dengan $F_{0.10;1;2} = 8.53$. Nilai mean square of error yang digunakan yaitu dari tabel 9.

$$n_{\text{eff}} = \frac{9 \times 3}{1 + (2 + 2 + 2)} = 3.8571$$

$$Cl_p = \pm \sqrt{8.53 \times 0.4845 \times \left[\frac{1}{3.8571} \right]}$$

$$Cl_p = \pm 1.0351$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{prediksi}} - Cl_p &\leq \mu \leq \mu_{\text{prediksi}} + Cl_p \\ -3.3224 - 1.0351 &\leq \mu \leq -3.3224 + 1.0351 \\ -4.3575 &\leq \mu \leq -2.2873 \end{aligned}$$

Nilai interval tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan pada eksperimen konfirmasi.

3.3 Eksperimen Konfirmasi

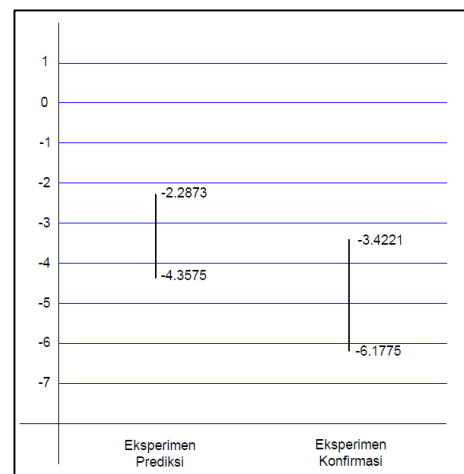
Tujuan dari eksperimen konfirmasi yaitu untuk validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh selama tahap sebelumnya yaitu tahap analisa. Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan mencetak spesimen sesuai parameter GRG dan level optimal yang telah diprediksi sebelumnya. Output dari eksperimen konfirmasi adalah menghasilkan interval kepercayaan konfirmasi. Berikut merupakan perhitungan interval kepercayaan konfirmasi sesuai persamaan 9.

$$Cl_k = \pm \sqrt{8.53 \times 0.4845 \times \left[\frac{1}{3.8571} + \frac{1}{5} \right]}$$

$$Cl_k = \pm 1.3777$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{konfirmasi}} - Cl_k &\leq \mu \leq \mu_{\text{konfirmasi}} + Cl_k \\ -4.7998 - 1.3777 &\leq \mu \leq -4.7998 + 1.3777 \\ -6.1775 &\leq \mu \leq -3.4221 \end{aligned}$$

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 kekasaran permukaan dan proses *building time* produk yang optimal yaitu parameter *layer height* 0.05mm, *nozzle temperature* 190°C, dan *print speed* 60mm/s.

Pada respon **kekasaran permukaan**, *layer height* memiliki kontribusi sebesar 98.7540%, *nozzle temperature* 0.6250%, *print speed* 0.5030%. Kontribusi pada respon **building time** yaitu *layer height* sebesar 93.5022%, *nozzle temperature* 0.0012%, *print speed* 6.4951%. Dan kontribusi pada **respon gabungan**, parameter *layer height* sebesar 41.2929%, *nozzle temperature* 6.8134%, *print speed* 40.3769%.

Pada uji hipotesis F_{tabel} dengan probabilitas kepercayaan 90% ($\alpha = 0.10$), menunjukkan bahwa semua parameter memiliki pengaruh terhadap respon **kekasaran permukaan** dengan melihat nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ sehingga memenuhi kriteria hipotesis. Pada respon **building time** dan **respon gabungan**, hanya parameter *layer height* dan *print speed* yang dinyatakan berpengaruh secara statistik karena memiliki nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$.

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.

6. PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] Rinanto, A. & Wahyudi, S., 2017. Perkembangan Teknologi Rapid Prototyping: Study Literatur. *Jurnal Metris*, pp. 1411-3287.
- [3] Soejanto, I., 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [4] Vinodh, S. & Sindhe, P., 2016. Parametric Optimization of 3D Printing Process Using MCDM Method. *the 6th International and 27th All Indian Manufacturing Technology, Design and Research (AIMTDR) Conference*. India, 2016. Springer Nature Singapore Pte Ltd.

- [5] Wibisana, B.I., 2016. *Analisa Pengaruh Parameter Temperature, Cooling Time Dan Injection Rate Terhadap Tingkat Kekasaran Block Join Recorder Saxophone*. Tugas Akhir. Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.