

Optimasi Multi-Objektif Proses Pemesinan Milling dengan Metode Taguchi Kolaborasi Grey Relational Analysis

Nadila Attin Miftah
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
nadilattin@student.telkomuniversity.ac.id

Denny Sukma Eka Atmaja
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
dennysukma@telkomuniversity.ac.id

Ayudita Oktafiani
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
ayuditaoktafiani@telkomuniversity.ac.id

Abstract—This research focuses on multi-objective optimization to minimize surface roughness and maximize the material removal rate (MRR) on aluminum alloy 6061 T6. The experiment was designed based on the L9 orthogonal array and carried out by milling machining. The input parameters selected from the milling machining conditions are spindle speed, feed rate, and depth of cut. The responses obtained from these experiments are surface roughness and material removal rate. To achieve these two objectives simultaneously, the Taguchi method collaboration with gray relational analysis can be used. The effect of cutting parameters on surface roughness and MRR can be determined using ANOVA and interaction plots. The optimal parameters to achieve minimum surface roughness and maximum MRR are the combination of a spindle speed of 600 rpm, a feed rate of 50 mm/min, and a depth of cut of 0.7 mm.

Keywords—surface roughness, material removal rate, Taguchi method, grey relational analysis, ANOVA

I. PENDAHULUAN

Proses pemesinan *milling* adalah salah satu jenis proses pemesinan yang banyak digunakan dalam pembuatan bagian pahatan yang kompleks menggunakan *high-performance materials* diberbagai sektor industri seperti *aerospace*, *biomedis*, dan *otomotif* (Moayyedian et al., 2020). Material yang biasa digunakan dalam industri tersebut adalah *aluminum alloy* 6061 T6 yang mana material tersebut memiliki kombinasi yang unik dan sifat mekanik yang baik, terutama *strength-to-weight ratio* dan ketahanan korosi yang unggul. Keuletan (*ductility*) dan kemampuan bentuk (*formability*) dari paduan ini dan *tempering* yang serupa secara substantial meningkat pada suhu diatas suhu kamar [2].

Tujuan yang ingin dicapai dalam industri modern adalah untuk menghasilkan produk dengan biaya yang rendah, berkualitas tinggi dengan produktivitas maksimum dalam waktu singkat. Pemilihan parameter pemotongan yang tepat diperlukan untuk menghasilkan produk dengan kualitas yang diinginkan dan produktivitas pemesinan maksimum. Dalam proses pemesinan *milling*, parameter pemotongan seperti *spindle speed*, *feed rate* dan *depth of cut* memiliki dampak terhadap laju pembuangan material atau *material removal rate* (MRR) dan kualitas pemesinan seperti kekasaran permukaan atau *surface roughness* (Ra) [3].

Kekasaran permukaan merupakan teknik pengukuran kualitas suatu produk dan diartikan sebagai faktor yang sangat mempengaruhi biaya [4]. Kekasaran permukaan juga mempengaruhi beberapa sifat fungsional seperti *heat transmission*, kemampuan menahan *lubricants*, gesekan permukaan, keausan, dan lainnya. Oleh karena itu, pemilihan dan kontrol parameter proses pemesinan yang tepat diperlukan untuk mencapai kualitas permukaan yang baik [5].

Tingkat produktivitas dari proses pemesinan ditunjukkan dengan laju pembuangan material. Semakin tinggi laju pembuangan material, semakin tinggi tingkat produktivitasnya. Setiap proses produksi selalu dituntut untuk menghasilkan kualitas yang tinggi dengan tingkat produktivitas yang tinggi [5]. Di sisi lain, nilai laju pembuangan material yang tinggi lebih diminati pada industri manufaktur karena dapat

diterapkan pada produksi massal dalam waktu yang lebih singkat tanpa mengurangi kualitas produk [6]

Oleh karena itu, perlu dilakukan pemilihan kombinasi parameter pemesinan yang tepat agar produk hasil proses pemesinan dapat menghasilkan kualitas yang tinggi dengan produktivitas yang tinggi. Metode yang dapat digunakan adalah metode Taguchi. Metode ini hanya bisa menyelesaikan satu respon saja. Maka dari itu perlu dikombinasikan dengan metode lain untuk menyelesaikan kasus multi respon seperti *grey relational analysis* (GRA), *fuzzy logic*, dan *neural network* [6]. Tabel 1 memberikan deskripsi singkat mengenai hasil penelitian yang masih berkaitan.

Tabel 1.

Hasil penelitian yang berkaitan.

Referensi	Metode optimasi	Proses pemesinan	Respon
Singari et al., [7]	Taguchi	Turning	Ra, MRR
Warsi et., al., [8]	Taguchi + GRA	Turning	Ra, MRR, Cutting energy
Sakthivelu et al., [9]	Taguchi DOE	End milling	Ra, MRR

Dalam sebuah penelitian oleh Singari et al., [7] yang menggunakan metode Taguchi, didapatkan masing-masing kombinasi parameter yang optimal untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang minimum dan laju pembuangan material yang maksimum. Warsi et., al., [8] dalam penelitiannya melakukan penyelesaian kasus optimasi multi-respon dengan hasil yang didapatkan yaitu kombinasi parameter yang tepat secara simultan pada kekasaran permukaan, laju pembuangan material dan konsumsi energi. Sakthivelu et al., [9] menemukan dalam penelitiannya bahwa didapatkan masing-masing kombinasi parameter pemesinan *end milling* yang optimal untuk kekasaran permukaan dan laju pembuangan material yang tidak dilakukan secara simultan.

Penelitian ini menjelaskan tentang optimasi parameter pemesinan *milling* untuk material *aluminum alloy* 6061 T6. Tujuannya adalah untuk meminimalkan kekasaran permukaan sekaligus memaksimalkan laju pembuangan materia. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Taguchi yang dikolaborasikan dengan *grey relational analysis* untuk menyelesaikan kasus multi respon.

II. LANDASAN TEORI

A. Taguchi

Taguchi merupakan metode statistik yang dikembangkan oleh Genichi Taguchi untuk meningkatkan kualitas produksi dan *engineering*. Tujuan utama dari metode ini adalah untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi dengan biaya yang sangat rendah [5]. Keuntungan metode ini dibandingkan dengan metode optimasi lainnya adalah bahwa banyak faktor dapat dioptimalkan secara bersamaan dan lebih banyak informasi kuantitatif dapat diperoleh dengan jumlah eksperimen yang lebih sedikit [10]. Prosedur dari metode taguchi dapat dibagi menjadi tiga tahap yaitu *system design*, *parameter design*, dan *tolerance design* [11].

B. Grey Relational Analysis

Grey relational analysis (GRA) adalah bagian dari *grey system theory* yang dikemukakan oleh Deng pada tahun 1982 . *Grey relation analysis* mengoptimalkan *multi* respon sehingga dapat digunakan untuk memecahkan masalah yang kompleks dengan melibatkan banyak faktor dan variabe. Namun, metode Taguchi hanya berfungsi untuk menyelesaikan optimasi dengan respon tunggal. Maka metode *grey relational analysis* digunakan untuk menggabungkan semua respon menjadi satu nilai yang kemudian menghasilkan *single-respon* dalam masalah optimasi. Metode ini memiliki tiga tahapan penyelesaian yaitu *grey relational generation*, *grey relational coefficient*, dan *grey relational grade* [12].

III. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini diilustrasikan pada Gambar 1 dengan pengambilan dan pengolahan data dibagi menjadi tiga bagian utama. Tahap pertama yang dilakukan adalah mengidentifikasi variabel-variabel yang berpengaruh dalam proses pemesinan. Variabel pemesinan yang ingin didapatkan diawali dengan menentukan faktor yang berpengaruh dengan kekasaran permukaan dan laju pembuangan material yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*. Setiap faktor memiliki tiga level seperti pada Tabel 2.

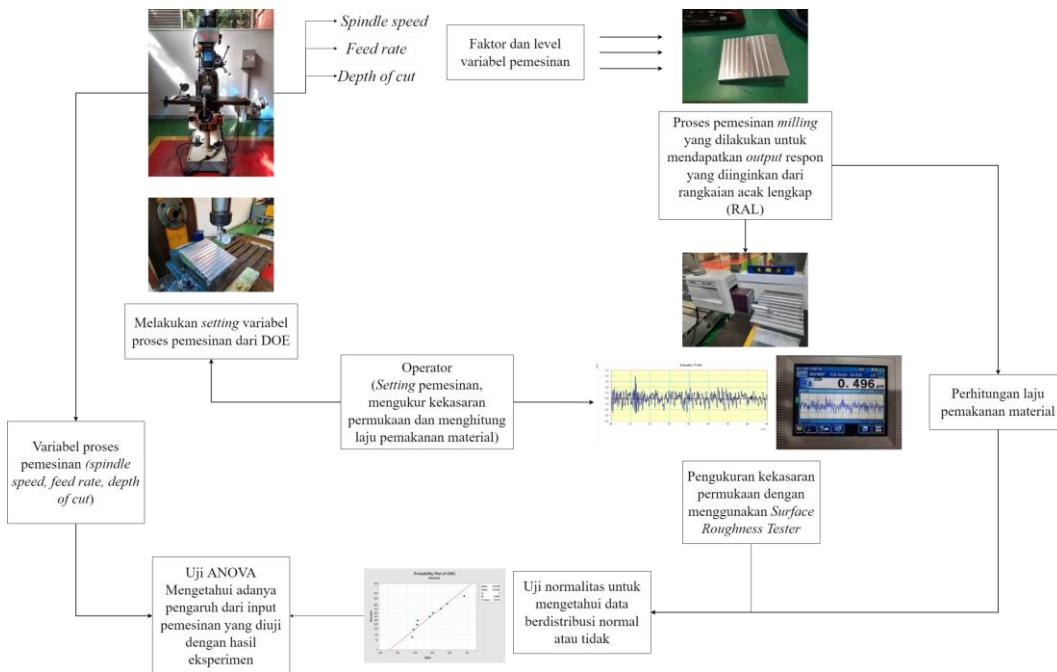
Tabel 2.
Data faktor dan level variabel pemesinan

Variabel	Satuan	Level		
		1	2	3
<i>Spindle Speed</i>	rpm	600	800	1400
<i>Feed Rate</i>	mm/min	15	33	50
<i>Depth of Cut</i>	mm	0,3	0,5	0,7

Setelah menentukan variabel pemesinan, dilanjutkan dengan menentukan *design of experiment* (DOE) menggunakan metode Taguchi. Metode Taguchi menggunakan tabel yang dibuat secara khusus yang disebut “*orthogonal array*” untuk merancang eksperimen. Selain itu, *orthogonal array* ini juga berguna untuk mengurangi jumlah eksperimen [3]. Terdapat 3 faktor dalam penelitian ini, masing-masing dengan 3 level. Dengan menggunakan kombinasi *orthogonal array*, penelitian ini menggunakan kombinasi L9 yang artinya jumlah eksperimen yang dilakukan sebanyak 9 kali. Hasil dari *orthogonal array* yang menjadi acuan eksperimen dalam mencari kombinasi faktor dan level yang optimal untuk mendapatkan nilai error yang minimum [13].

Pada penelitian ini benda kerja yang digunakan adalah *aluminum alloy* 6061 T6. Ukuran benda kerja yang digunakan adalah 120 mm × 100 mm × 30 mm dan dibuat seperti anak tangga seperti Gambar 1. Benda kerja diproses pada mesin *milling* vertikal Hauw Gan ZX 7550Z. *Cutting tools* yang digunakan adalah HSS-AL dengan diameter 16 mm.

Tahap kedua yaitu melakukan pengukuran kekasaran permukaan dan menghitung laju pembuangan material dari benda kerja hasil proses pemesinan. Kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan *surface roughness tester* dan laju pembuangan material dihitung secara manual menggunakan rumus. Tahap ketiga yaitu pengolahan data kekasaran permukaan dan laju pembuangan material menggunakan analisis statistika. Analisis statistik diawali dengan uji normalitas menggunakan Shapiro-Wilk. Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah data berdistribusi normal atau tidak dengan melihat nilai signifikansinya. Jika data berdistribusi normal, dilanjutkan dengan uji ANOVA dengan menggunakan *two-way* ANOVA. Tujuannya adalah untuk menyelidiki apakah terdapat pengaruh dari berbagai kriteria yang diuji terhadap hasil yang diinginkan.



Gambar 1. Metodologi penelitian

IV. HASIL PEMBAHASAN DAN DISKUSI

A. Design of Experiment

Dalam menentukan banyaknya sampel penelitian dapat dilakukan dengan *orthogonal array*. *Orthogonal array* dapat digunakan untuk menentukan kombinasi antara faktor dan level pada variabel pemesinan. Matriks *orthogonal array* yang digunakan adalah $L_9(3^3)$ dengan jumlah eksperimen sebanyak 9. Tabel 3. Menunjukkan rangkaian acak lengkap kombinasi setiap eksperimen.

Tabel 3.

Rangkaian acak lengkap L_9

Eksperimen ke-	Spindle Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)
1	600	15	0,3
2	600	33	0,5
3	600	50	0,7
4	860	15	0,5
5	860	33	0,7
6	860	50	0,3
7	1400	15	0,7
8	1400	33	0,3
9	1400	50	0,5

B. S/N Ratio

S/N *Ratio* digunakan untuk mengukur karakteristik kualitas yang menyimpang dari nilai yang diinginkan. S/N *ratio* memiliki tiga karakteristik yaitu *smaller is better*, *large is better*, dan *nominal is best*. Penelitian ini bertujuan untuk mencapai kekasaran permukaan yang minimum dan laju pembuangan material yang maksimum. Karena tujuan dari optimasi respon adalah untuk meminimalkan kekasaran permukaan, karakteristik S/N *ratio* yang digunakan adalah *smaller is better*. Karakteristik S/N *ratio* yang digunakan untuk laju pembuangan material adalah *large is better* karena tujuan dari optimasi respon adalah untuk memaksimasi [3], [14]. Karakteristik tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini.

1. *Large is better (maximize)*

Large is better adalah karakteristik *S/N Ratio* yang menunjukkan bahwa semakin besar nilainya, semakin baik.

$$\frac{S}{N_L} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

2. *Smaller is better (minimize)*

Smaller is better adalah karakteristik *S/N Ratio* yang menunjukkan jika semakin kecil nilainya, semakin baik.

$$\frac{S}{N_S} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

Dimana n adalah jumlah item data eksperimen dan y_i adalah nilai hasil eksperimen.

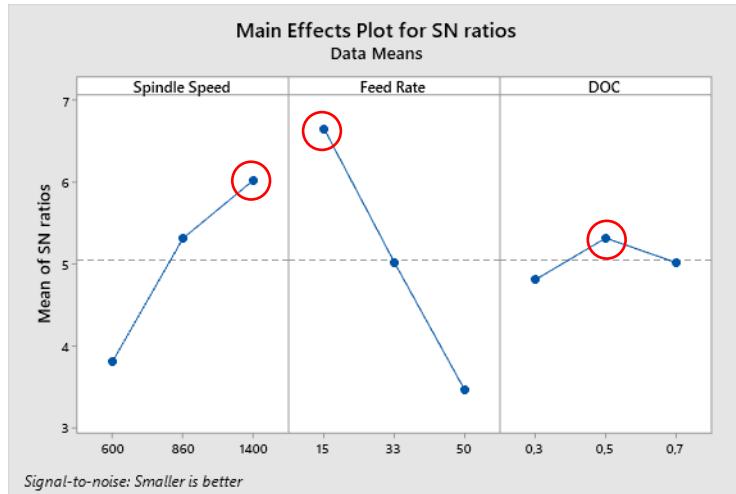
Pada penelitian ini, perhitungan *S/N ratio* dibantu dengan *software* Minitab 19. Hasil eksperimen dan perhitungan *S/N ratio* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4.
Hasil eksperimen dan *S/N ratio*

Eksperimen	Ra (μm)	MRR (mm^3/min)	<i>S/N Ratio</i>	
			Ra	MRR
1	0,510	45,00	5,849	33,064
2	0,710	165,00	2,978	44,350
3	0,742	350,00	2,587	50,881
4	0,417	75,00	7,597	37,501
5	0,505	231,00	5,928	47,272
6	0,758	150,00	2,410	43,522
7	0,471	105,00	6,535	40,424
8	0,492	99,00	6,159	39,913
9	0,538	250,00	5,377	47,959

Semua parameter pemesinan yang optimal disorot dalam *main effects plot* pada Gambar 2 dan 3. Kedua gambar tersebut menunjukkan variasi respon individu dengan tiga faktor yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* secara terpisah. Gambar 2 menunjukkan *main effects plot* dari kekasaran permukaan yang tidak terbentuk garis horizontal sejajar dengan sumbu X. Ini berarti bahwa setiap level faktor mempengaruhi respon dengan cara yang berbeda. Kondisi optimal untuk *setting* parameter kekasaran permukaan adalah *spindle speed* 1400 rpm, *feed rate* 15 mm/min, dan *depth of cut* 0,5 mm.

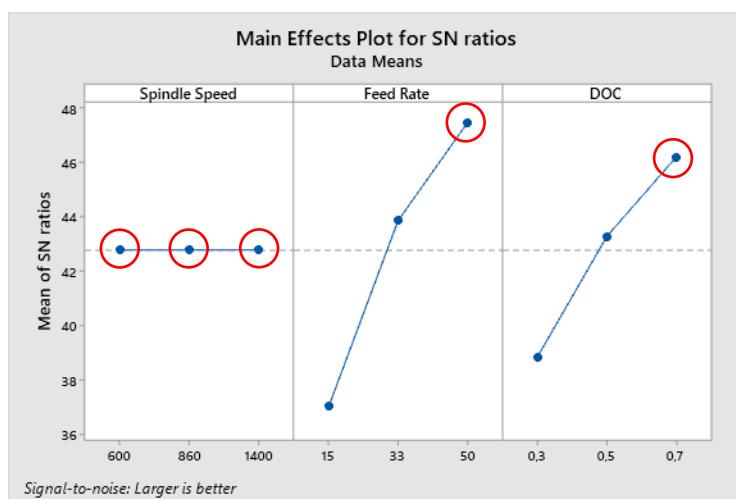
Gambar 2 menunjukkan bahwa kekasaran permukaan yang rendah dapat dicapai pada *spindle speed* tinggi dan *feed rate* rendah. Sebuah penelitian dari [15] berpendapat serupa dengan penelitian ini bahwa nilai kekasaran permukaan yang minimum dipengaruhi oleh *spindle speed* yang tinggi. Sebaliknya jika *feed rate* yang digunakan rendah maka hasil kekasaran permukaan juga rendah. Hal ini didukung oleh penelitian [9] yang mengatakan bahwa *feed rate* yang rendah merupakan variabel pemesinan yang paling besar pengaruhnya terhadap nilai kekasaran permukaan minimum. Penelitian lain [3] menunjukkan bahwa *feed rate* adalah variabel pemesinan yang paling berpengaruh dalam meminimalkan kekasaran permukaan. *Feed rate*, *cutting speed*, dan *depth of cut* yang rendah dapat meminimalkan kekasaran permukaan.



Gambar 2. Main effects plot S/N Ratio kekasaran permukaan

Gambar 3 merupakan *main effects plot* dari laju pembuangan material. Dari sudut pandang *main effect plots*, faktor *spindle speed* membentuk garis horizontal yang sejajar dengan sumbu X. Ini berarti setiap level faktor tersebut memberikan pengaruh terhadap respon dengan cara yang sama. Terlepas dari faktor *spindle speed* pada variabel pemesinan, ini memiliki efek yang sama pada laju pembuangan material. Oleh karena itu, *setting* parameter yang optimal untuk laju pembuangan material adalah B3, C3 yaitu *feed rate* 50 mm/min dan *depth of cut* 0,7 mm.

Dari Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa laju pembuangan material yang tinggi dapat dicapai jika *feed rate* dan *depth of cut* tinggi. Hal ini didukung oleh penelitian [9] yang mengatakan bahwa *depth of cut* yang tinggi merupakan variabel pemesinan yang besar pengaruhnya terhadap nilai laju pembuangan material maksimum. Penelitian lain dari [3] menunjukkan peningkatan *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* mengakibatkan bahwa laju pembuangan material maksimum. Diantara ketiga variabel tersebut, *feed rate* yang paling signifikan terhadap laju pembuangan material.



Gambar 3. Main effects plot S/N Ratio laju pembuangan material

C. Grey Relational Analysis

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan kombinasi optimal dari parameter pemesinan *milling* yaitu optimal, yaitu meminimalkan kekasaran permukaan sekaligus memaksimalkan laju pembuangan material. Karena metode Taguchi hanya dapat menyelesaikan respon tunggal, maka perlu untuk mengkolaborasikan dengan *grey*

relational analysis untuk multi respon. Di bawah ini merupakan penyelesaian dengan *grey relational analysis*.

1) Langkah 1: Grey Relational Generation

Langkah pertama dalam *grey relational analysis* adalah melakukan normalisasi hasil S/N ratio yang diperoleh dari Taguchi dalam rentang 0 dan 1. Tahap ini disebut dengan *grey relational generation*. Normalisasi dilakukan tergantung pada jenis kriterianya. Untuk kriteria kekasaran permukaan adalah *smaller is better* (Persamaan 3) dan laju pembuangan material adalah *large is better* (Persamaan 4).

1. Smaller is better

$$Z_{ij} = \frac{\max(y_{ij}, i=1,2,\dots,n) - y_{ij}}{\max(y_{ij}, i=1,2,\dots,n) - \min(y_{ij}, i=1,2,\dots,n)} \quad (3)$$

2. Large is better

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij}, i=1,2,\dots,n)}{\max(y_{ij}, i=1,2,\dots,n) - \min(y_{ij}, i=1,2,\dots,n)} \quad (4)$$

Dimana Z_{ij} adalah hasil setelah *grey relational generation*, dan $\max(y_{ij}, i = 1,2,\dots,n)$ dan $\min(y_{ij}, i = 1,2,\dots,n)$ adalah nilai terbesar dan terkecil dari nilai y_{ij} untuk respon ke- i .

Tabel 5 merupakan hasil normalisasi dari S/N ratio yang diperoleh dari metode Taguchi.

Tabel 5.
Hasil normalisasi S/N ratio

Eksperimen	S/N Ratio		Grey Relational Grade	
	Ra	MRR	Ra	MRR
1	5,849	33,064	0,337	0,000
2	2,978	44,350	0,891	0,633
3	2,587	50,881	0,966	1,000
4	7,597	37,501	0,000	0,249
5	5,928	47,272	0,322	0,797
6	2,410	43,522	1,000	0,587
7	6,535	40,424	0,205	0,413
8	6,159	39,913	0,277	0,384
9	5,377	47,959	0,428	0,836

2) Langkah 2: Grey Relational Coefficient

Grey relational coefficient merupakan tahapan dalam *grey relational analysis* untuk mengetahui hubungan antara hasil referensi dengan hasil normalisasi S/N ratio. *Grey relational coefficient* dihitung menggunakan Persamaan 5 dan hasilnya pada Tabel 6.

$$\gamma(y_0^*(k), y_i^*(k)) = \frac{\Delta \min + \varepsilon \Delta \max}{\Delta_{on}(k) + \varepsilon \Delta \max} \quad (5)$$

Dimana $y_0^*(k)$ adalah urutan referensi, $y_i^*(k)$ adalah urutan perbandingan tertentu, $\Delta_{on}(k) = \|y_0^*(k) - y_i^*(k)\|$, $\Delta \min$ adalah nilai terkecil dari $y_i^*(k)$, dan $\Delta \max$ adalah nilai terbesar dari $y_i^*(k)$.

Tabel 6.
Grey Relational Coefficient

Eksperimen	Nilai Delta		Grey Relational Coefficient	
	Ra	MRR	Ra	MRR
1	0,663	1,000	0,430	0,333
2	0,109	0,367	0,821	0,577
3	0,034	0,000	0,936	1,000
4	1,000	0,751	0,333	0,400
5	0,678	0,203	0,424	0,712
6	0,000	0,413	1,000	0,548

7	0,795	0,587	0,386	0,460
8	0,723	0,616	0,409	0,448
9	0,572	0,164	0,466	0,753

3) Langkah 3: Grey Relational Grade

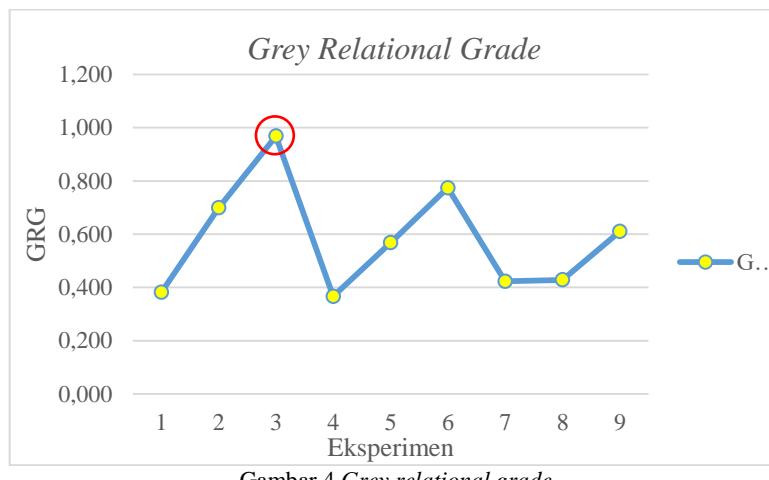
Langkah terakhir dalam *grey relational grade* adalah menjumlahkan bobot dari dua respon dari *grey relational coefficient* untuk mendapatkan *grade* dari setiap eksperimen. Adanya *grade* bertujuan untuk mengubah *single-respons* menjadi *multi-respons*. Eksperimen dengan *grade* tertinggi berarti kombinasi variabel tersebut mendekati optimal. Nilai *grey relational grade* pada Tabel 7 diperoleh dengan menggunakan Persamaan 6.

$$\bar{\gamma}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^m \gamma_{in} \quad (6)$$

Dimana $\bar{\gamma}_j$ adalah nilai *grey relational analysis* dan n adalah jumlah karakteristik kinerja.

Tabel 7.
Grey Relational Grade.

Eksperimen	<i>Grey Relational Grade</i>	
	Ra	MRR
1	0,382	8
2	0,699	3
3	0,968	1
4	0,367	9
5	0,568	5
6	0,774	2
7	0,423	7
8	0,429	6
9	0,610	4



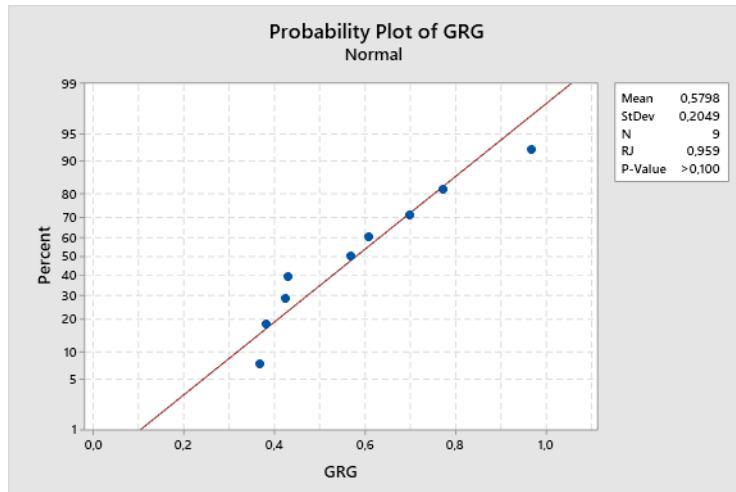
Gambar 4 *Grey relational grade*

Berdasarkan Tabel 7 dan Gambar 4, eksperimen 3 merupakan *setting parameter optimal* dengan *grade relational grade* tertinggi. Dari sini dapat disimpulkan bahwa eksperimen 3 adalah kombinasi terbaik untuk mencapai kekasaran permukaan dan laju pembuangan material secara simultan. *Setting parameter eksperimen 3* yaitu *spindle speed* 600 rpm, *feed rate* 50 mm/min, dan *depth of cut* 0,7 mm dengan kekasaran permukaan sebesar 0,742 μm dan laju pembuangan material sebesar 350 mm^3/min .

D. Analisis Statistika

1) Uji Normalitas

Uji normalitas dilakukan untuk mengetahui apakah data berdistribusi normal atau tidak [13]. Dalam penelitian ini digunakan uji normalitas Shapiro-Wilk karena dilihat dari jumlah sampel yang digunakan kurang dari 50 [16]. Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk ditunjukkan pada Gambar 5. Dari hasil tersebut didapatkan nilai *p-value* > 0,100. Karena nilai *p-value* > 0,05, data dapat dianggap berdistribusi normal.



Gambar 5. Probability plot

2) Uji ANOVA

Syarat dilakukannya uji ANOVA adalah data harus berdistribusi normal. Penelitian ini menggunakan *two-way* ANOVA. Analisis *two-way* ANOVA dilakukan dengan menggunakan *software* Minitab 19 dengan hasil pada Tabel 8.

Tabel 8.

Two way ANOVA

Source	Df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Kontribusi
Spindle Speed	2	0,058	0,029	3,03	0,248	17,260%
Feed Rate	2	0,233	0,117	12,2	0,076	69,444%
DOC	2	0,026	0,013	1,34	0,428	7,604%
Error	2	0,019	0,001			
Total	8	0,336				

Hasil analisis Tabel 8 dapat dijelaskan sebagai berikut.

- Hasil Pengujian Faktor *Spindle Speed*

P-value yang dihasilkan untuk faktor *spindle speed* adalah sebesar 0,248, lebih besar dari taraf kesalahan (α) sebesar 0,05. Dari sini dapat disimpulkan bahwa faktor *spindle speed* tidak memberikan pengaruh terhadap kekasaran permukaan dan laju pembuangan material.

- Hasil Pengujian Faktor *Feed Rate*

P-value yang dihasilkan untuk faktor *feed rate* adalah sebesar 0,076, lebih besar dari taraf kesalahan (α) sebesar 0,05. Dari sini dapat disimpulkan bahwa faktor *feed rate* tidak memberikan pengaruh terhadap kekasaran permukaan dan laju pembuangan material.

- Hasil Pengujian Faktor *Depth of cut*

P-value yang dihasilkan untuk faktor *depth of cut* adalah sebesar 0,428, lebih besar dari taraf kesalahan (α) sebesar 0,05. Dari sini dapat disimpulkan bahwa faktor *depth of cut* tidak memberikan pengaruh terhadap kekasaran permukaan dan laju pembuangan material.

Berdasarkan Tabel 8, terdapat persentase kontribusi untuk setiap faktornya. *Spindle speed* memberikan kontribusi sebesar 17,260%, *feed rate* memberikan kontribusi sebesar 69,444% dan *depth of cut* memberikan kontribusi sebesar 7,604%. Dari ketiga faktor tersebut, *feed rate* yang paling besar kontribusinya terhadap kekasaran permukaan dan laju pembuangan material secara simultan.

V. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, data hasil eksperimen yang terkumpul diolah dengan menggunakan metode Taguchi kolaborasi *Grey Relational Analysis* untuk mengoptimalkan kekasaran permukaan dan laju pembuangan material secara simultan. Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Kombinasi parameter pemesinan *milling* yang menghasilkan kekasaran permukaan dan laju pembuangan material yang optimum dihasilkan dari kombinasi *spindle speed* 600 rpm, *feed rate* 50 mm/min, dan *depth of cut* 0,7 mm.
2. Jika *spindle speed* yang digunakan tinggi, kekasaran permukaan yang dihasilkan minimum. Variabel ini tidak mempengaruhi terhadap laju pembuangan material.
3. Variabel *feed rate* berpengaruh terhadap hasil kekasaran permukaan dan laju pembuangan material. Jika *feed rate* rendah, maka menghasilkan kekasaran permukaan dan laju pembuangan material yang kecil. Namun jika *feed rate* tinggi, maka menghasilkan kekasaran permukaan dan laju pembuangan material yang besar.
4. Variabel *depth of cut* berpengaruh terhadap hasil kekasaran permukaan dan laju pembuangan material. *Depth of cut* yang tinggi dapat memaksimalkan tingkat laju pembuangan material yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Moayyedian, A. Mohajer, M. G. Kazemian, A. Mamedov, and J. F. Derakhshandeh, "Surface roughness analysis in milling machining using design of experiment," *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 10, Oct. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03485-5.
- [2] B. K. Roy, Y. P. Korkolis, Y. Arai, W. Araki, T. Iijima, and J. Kouyama, "Plastic deformation of AA6061-T6 at elevated temperatures: Experiments and modeling," *Int J Mech Sci*, vol. 216, p. 106943, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2021.106943.
- [3] L. Bouzid, S. Boutabba, M. A. Yallese, S. Belhadi, and F. Girardin, "Simultaneous Optimization of Surface Roughness and Material Removal Rate for Turning of X20Cr13 Stainless Steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, no. 5–8, pp. 879–891, Sep. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6043-9.
- [4] M. Nalbant, H. Gökkaya, and G. Sur, "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning," *Mater Des*, vol. 28, no. 4, pp. 1379–1385, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.01.008.
- [5] N. Lusi, D. Ridlo Pamuji, A. Fiverati, A. Afandi, and G. Sandy Prayogo, "Application of Taguchi and Grey Relational Analysis for Parametric Optimization of End Milling Process of ASSAB-XW 42," 2020.
- [6] A. Mufarrih, H. Istiqlaliyah, and M. M. Ilha, "Optimization of Roundness, MRR and Surface Roughness on Turning Process using Taguchi-GRA," in *Journal of Physics: Conference Series*, Aug. 2019, vol. 1179, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1179/1/012099.
- [7] R. M. Singari, R. M. S, and R. S. Mishra, "Optimization of Surface Roughness and Material Removal Rate on Conventional Dry Turning of Aluminium (6061)," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261295511>

- [8] S. S. Warsi, M. H. Agha, R. Ahmad, S. H. I. Jaffery, and M. Khan, "Sustainable turning using multi-objective optimization: a study of Al 6061 T6 at high cutting speeds," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 1–4, pp. 843–855, Jan. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2759-2.
- [9] S. Sakthivelu, T. Anandaraj, and M. Selwin, "Multi-Objective Optimization of Machining Conditions on Surface Roughness and MRR during CNC End Milling of Aluminium Alloy 7075 Using Taguchi Design of Experiments," 2017.
- [10] R. Pundir, G. H. V. C. Chary, and M. G. Dastidar, "Application of Taguchi method for optimizing the process parameters for the removal of copper and nickel by growing Aspergillus sp.," *Water Resour Ind*, vol. 20, pp. 83–92, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.wri.2016.05.001.
- [11] J. Z. Zhang and J. C. Chen, "Surface roughness optimization in a drilling operation using the taguchi design method," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 4, pp. 459–467, Apr. 2009, doi: 10.1080/10426910802714399.
- [12] H. Dave, S. Vallabhbhai, S. Kumar, and K. P. Desai, "Study on Micro Hole Accuracy and Electrode Depletion during Micro EDM process through Grey based Taguchi approach MACHINING OF CLOSED CONTOUR PROFILE ON CNC MILLING MACHINE View project Thermoacoustic View project," 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/236014396>
- [13] D. Sukma Eka, A. Muhammad, and K. Herliansyah, "Optimasi Parameter Pengukuran Dimensi dan Defect Ubin Keramik dengan Metode Taguchi," 2021.
- [14] E. Kuram and B. Ozcelik, "Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill," *Measurement*, vol. 46, no. 6, pp. 1849–1864, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2013.02.002.
- [15] N. S. Kumar, A. Shetty, A. Shetty, K. Ananth, and H. Shetty, "Effect of spindle speed and feed rate on surface roughness of carbon steels in CNC turning," in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 691–697. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.087.
- [16] N. Mohd Razali and Y. Bee Wah, *Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests*, vol. 2. 2011.