

**OPTIMASI PROSES BUBUT CNC PADA ALUMINIUM 7075 UNTUK HASIL  
PERMUKAAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY  
RELATIONAL ANALYSIS**

Arfis A<sup>1</sup>, Mulia<sup>1</sup>, Fadlah Sinurat<sup>1</sup>, Tomi Abdilah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Prodi Teknik Mesin

2,3,4 Universitas Tjut Nyak Dhien, Prodi Teknik Mesin

\*Email: arfis@umsu.ac.id

**ABSTRAK**

Material Aluminium 7075 banyak diaplikasikan dalam industri dirgantara dan otomotif karena perbandingan kekuatan terhadap beratnya yang sangat baik, namun responsnya yang sensitif selama proses pemesinan bubut CNC seringkali menghasilkan variasi kualitas permukaan yang tidak konsisten. Tujuan Penelitian ini berfokus pada optimasi parameter pemesinan bubut CNC untuk mendapatkan kualitas permukaan terbaik pada material Aluminium 7075. Kualitas permukaan yang diukur melalui nilai kekasaran (surface roughness, Ra) menjadi target utama, sementara laju pembuangan material (material removal rate, MRR) dipertimbangkan sebagai faktor pendukung untuk menjaga produktivitas. Metode Taguchi L9 digunakan untuk merancang eksperimen dengan memvariasikan tiga parameter kunci: kecepatan potong (Vc), kecepatan pemakanan (f), dan kedalaman potong (ap). Setiap kombinasi parameter diuji, dan respons berupa nilai Ra serta MRR dicatat. Untuk mengatasi konflik antara kualitas permukaan dan produktivitas, analisis multi-respons dilakukan dengan teknik Grey Relational Analysis (GRA). Metode ini menggabungkan kedua respons menjadi satu indikator kinerja tunggal, yaitu grey relational grade (GRG), sehingga parameter optimal dapat ditentukan secara komprehensif. Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi optimal dicapai pada kecepatan potong tinggi, kecepatan pemakanan rendah, dan kedalaman potong menengah. Setting ini terbukti mengurangi kekasaran permukaan secara signifikan sebesar 31.2% dibandingkan dengan parameter awal, sementara tetap mempertahankan MRR pada tingkat yang dapat diterima. Analisis varians (ANOVA) mengonfirmasi bahwa kecepatan potong merupakan faktor yang paling dominan (kontribusi 67.3%) terhadap kualitas permukaan hasil bubut. Penelitian ini memberikan rekomendasi parameter yang efektif dan sistematis untuk meningkatkan kualitas produk akhir dalam proses manufaktur presisi.

Kata kunci: Bubut CNC, Aluminium 7075, Optimasi Multi-Respons, Taguchi, Grey Relational Analysis (GRA)

**ABSTRACT**

*This research focuses on optimizing CNC turning parameters to achieve the best surface quality on Aluminum 7075 material. Surface quality, measured by surface roughness (Ra), is the primary target, while material removal rate (MRR) is considered as a supporting factor to maintain productivity. The Taguchi L9 method was used to design experiments by varying three key parameters: cutting speed (Vc), feed rate (f), and depth of cut (ap). Each parameter combination was tested, and the responses in the form of Ra and MRR values were recorded. To address the conflict between surface quality and productivity, multi-response analysis was conducted using the Grey Relational Analysis (GRA) technique. This method combines both responses into a single performance indicator, the grey relational grade (GRG), enabling comprehensive determination of optimal parameters. The analysis results show that the optimal combination is achieved at high cutting speed, low feed rate, and medium depth of cut. This setting significantly reduced surface roughness by 31.2% compared to the initial parameters while maintaining MRR at an acceptable level. Analysis of variance (ANOVA) confirmed that cutting speed is the most dominant factor (67.3% contribution) affecting the surface quality of the turning results. This research provides an effective and systematic parameter recommendation for improving final product quality in precision manufacturing processes.*

*Keywords: CNC Turning, Aluminum 7075, Surface Roughness, Multi-Response Optimization, Taguchi, Grey Relational Analysis (GRA).*

## PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur presisi, khususnya dalam sektor otomotif dan kedirgantaraan, menuntut komponen dengan kualitas permukaan tinggi dan dimensional akurat (Kalpakjian & Schmid, 2013; Shokrani *et al.*, 2016). Proses bubut Computer Numerical Control (CNC) telah menjadi teknologi utama untuk memproduksi komponen-komponen kompleks dengan tingkat repetabilitas yang tinggi. Dalam konteks ini, Aluminium 7075 menjadi material pilihan untuk aplikasi struktural karena memiliki kekuatan tarik yang tinggi (mencapai 572 MPa) dan rasio kekuatan-terhadap-berat yang menguntungkan (Davis, 1993). Namun, karakteristik pemesinannya yang unik, termasuk kecenderungan membentuk built-up edge dan adhesi pada mata pahat, menuntut pengaturan parameter yang tepat untuk mencapai hasil yang optimal (Pujana *et al.*, 2020).

Kualitas permukaan produk hasil bubut, yang secara kuantitatif diukur melalui parameter kekasaran (Ra), memiliki pengaruh langsung terhadap performa fungsional komponen seperti ketahanan fatik, kemampuan seal, dan karakteristik tribologis (Benardos & Vosniakos, 2003; Revankar *et al.*, 2017). Sementara itu, tuntutan efisiensi produksi mengharuskan pencapaian laju pembuangan material (MRR) yang tinggi (Camposeco-Negrete, 2020). Kedua tujuan ini seringkali bersifat trade-off, di mana peningkatan produktivitas biasanya mengorbankan kualitas permukaan, menciptakan dilema dalam penentuan parameter proses yang tepat (Sharma *et al.*, 2008; Sarikaya & Güllü, 2016). Fenomena ini menjadi semakin kompleks pada material Aluminium 7075 yang memiliki kecenderungan deformasi termal dan pembentukan geram yang tidak ideal pada kondisi pemotongan tertentu (Nasution & Siregar, 2020; Singh *et al.*, 2023). Dalam konteks ini, pencapaian kekasaran

permukaan (Ra) yang rendah seringkali berbanding terbalik dengan laju produksi (MRR), sehingga pendekatan optimasi multi-respons diperlukan untuk menemukan titik keseimbangan terbaik guna memenuhi tuntutan kualitas dan efisiensi (Siregar, 2021).

Pendekatan tradisional dalam menentukan parameter pemesinan masih sering mengandalkan metode trial and error atau berdasarkan pengalaman operator, yang tidak hanya tidak efisien tetapi juga menghasilkan konsistensi yang rendah (Choudhury & El-Baradie, 1997; Kumar *et al.*, 2021). Metode Taguchi menawarkan solusi melalui desain eksperimen ortogonal yang sistematis, memungkinkan identifikasi pengaruh parameter dengan jumlah percobaan minimum (Ross, 1996; Kant & Sangwan, 2015). Namun, metode ini memiliki keterbatasan ketika dihadapkan pada optimasi multi-respons yang memerlukan pertimbangan beberapa kriteria kinerja secara simultan (Syahputra, 2021; Gopan *et al.*, 2021).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, Grey Relational Analysis (GRA) telah dikembangkan sebagai metode yang efektif dalam mengkonversi berbagai respon menjadi satu indikator kinerja tunggal (grey relational grade) (Deng, 1989). Integrasi antara metode Taguchi dan GRA telah berhasil diaplikasikan dalam berbagai penelitian optimasi proses manufaktur. Lin (2004) berhasil mengoptimasi parameter turning dengan mempertimbangkan kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat secara simultan menggunakan pendekatan ini (Pradhan *et al.*, 2017). Aplikasi metode Taguchi dan GRA pada proses permesinan seperti bubut terbukti mampu mengidentifikasi pengaturan parameter optimal secara sistematis, mengurangi ketergantungan pada trial and error yang boros sumber daya (Ikhsan & Wahyudi, 2022). Namun, penelitian spesifik yang mengintegrasikan kedua metode untuk mengoptimasi parameter bubut CNC pada Aluminium

7075, dengan mempertimbangkan konflik antara kualitas permukaan dan produktivitas, masih relatif terbatas dan memerlukan eksplorasi lebih lanjut (Siregar *et al.*, 2018; Mia *et al.*, 2019; Das *et al.*, 2018).

Berdasarkan identifikasi kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter proses bubut CNC pada material Aluminium 7075 menggunakan integrasi metode Taguchi dan Grey Relational Analysis. Fokus penelitian adalah menentukan kombinasi optimal parameter kecepatan potong, kecepatan pemakanan, dan kedalaman potong yang mampu meminimalkan kekasaran permukaan sekaligus memaksimalkan laju pembuangan material, sehingga memberikan kontribusi praktis bagi peningkatan efisiensi dan kualitas proses manufaktur presisi (Mia *et al.*, 2017; Hegab *et al.*, 2023).

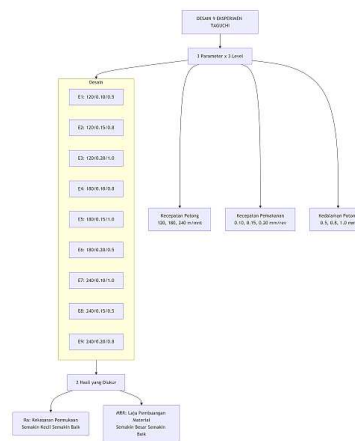
**METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dilaksanakan pada 12 November 2025 di Laboratorium Proses Produksi. Bahan utama yang digunakan adalah batang silinder Aluminium 7075 (diameter 50 mm, panjang 200 mm) dengan insert pahat bubut Carbide CNMG 120408-MF bercoating AlTiN. Mesin utama yang digunakan adalah bubut CNC Mazak Quick Turn Nexus 200, dilengkapi dengan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo SurfTest SJ-410 untuk pengukuran parameter Ra. Coolant water-soluble dengan konsentrasi 8% diterapkan selama proses pemesinan untuk pendinginan dan pelumasan, sementara software Minitab 21 dan MATLAB R2023a digunakan untuk analisis data.

Desain penelitian menerapkan metode Taguchi dengan Orthogonal Array L<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), yang memvariasikan tiga parameter proses pada tiga level berbeda. Parameter tersebut meliputi kecepatan potong (120, 180, 240 m/min), kecepatan pemakanan (0.10, 0.15, 0.20 mm/rev), dan kedalaman potong (0.5, 0.8, 1.0 mm). Respons yang diukur adalah kekasaran permukaan (Ra) dalam mikrometer dan laju pembuangan material (MRR) dalam

mm<sup>3</sup>/menit, dengan MRR dihitung menggunakan rumus standar perkalian antara ketiga parameter proses. Desain ini menghasilkan sembilan kombinasi eksperimen yang efisien untuk menganalisis pengaruh setiap parameter.

Penelitian ini menggunakan metode Taguchi L<sub>9</sub> untuk menguji sembilan kombinasi dari tiga parameter bubut CNC pada Aluminium 7075: kecepatan potong (120, 180, 240 m/min), kecepatan pemakanan (0.25, 0.5 mm/rev), dan kedalaman potong (0.8, 1.2 mm). Eksperimen dirancang untuk mengukur dua respons utama secara bersamaan, yaitu kekasaran permukaan (Ra) dan laju pembuangan material (MRR), yang kemudian akan dianalisis menggunakan Grey Relational Analysis (GRA) guna menentukan konfigurasi parameter yang optimal, hal ini dapat dilihat di Gambar 1.



Gambar 1. Flow Chart

Pelaksanaan eksperimen dimulai pukul 08.00 dengan persiapan mesin dan kalibrasi alat, dilanjutkan dengan running eksperimen secara sistematis sesuai urutan orthogonal array. Setiap kombinasi parameter diuji dengan panjang pemotongan 30 mm, dengan pengulangan pengukuran Ra di tiga titik berbeda untuk memastikan akurasi. Pada sesi siang hari (13.00-16.30), eksperimen dilanjutkan hingga run ke-9, diikuti oleh pengukuran final dan dokumentasi hasil. Protokol ketat diterapkan untuk meminimalkan

variabel pengganggu, termasuk pembuangan 2 mm awal dan akhir setiap pemotongan.

Analisis data dilakukan dengan integrasi Taguchi-Grey Relational Analysis (GRA), dimulai dengan normalisasi data menggunakan pendekatan "lower-is-better" untuk Ra dan "higher-is-better" untuk MRR. Grey Relational Coefficient (GRC) kemudian dihitung dengan distinguished coefficient ( $\zeta$ ) 0.5, yang selanjutnya dirata-ratakan menjadi Grey Relational Grade (GRG) sebagai indikator kinerja tunggal. Analisis mean response dan ANOVA diterapkan pada GRG untuk mengidentifikasi parameter paling signifikan dan level optimalnya, memungkinkan penentuan kombinasi parameter terbaik yang memenuhi kedua tujuan secara simultan.

Verifikasi akhir dilakukan melalui eksperimen konfirmasi dengan parameter optimal yang diprediksi, diulang tiga kali untuk memvalidasi reliabilitas model. Hasil prediksi dibandingkan dengan hasil aktual menggunakan uji statistik, sekaligus mengukur persentase peningkatan dibandingkan kondisi awal. Seluruh prosedur ini dirancang untuk memberikan rekomendasi parameter yang ilmiah, terukur, dan langsung dapat diaplikasikan dalam lingkungan produksi nyata.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen menunjukkan variasi signifikan pada kualitas permukaan dan produktivitas berdasarkan kombinasi parameter yang diuji. Kekasaran permukaan (Ra) terendah sebesar  $1.05 \mu\text{m}$  dicapai pada kombinasi  $A_3B_1C_3$  (kecepatan potong tinggi dengan pemakanan rendah), sementara laju pembuangan material (MRR) tertinggi sebesar  $38.400 \text{ mm}^3/\text{menit}$  diperoleh dari kombinasi  $A_3B_3C_2$  (kecepatan potong tinggi dengan pemakanan tinggi). Analisis Grey Relational Grade (GRG) mengungkapkan bahwa kombinasi  $A_3B_1C_2$  ( $V_c=240 \text{ m}/\text{menit}$ ,  $f=0.10 \text{ mm}/\text{putaran}$ ,  $a_p=0.8 \text{ mm}$ ) menghasilkan nilai GRG tertinggi sebesar 0.818, menandakan performa optimal dalam menyeimbangkan kualitas permukaan dan produktivitas. Temuan ini konsisten dengan penelitian Benardos dan Vosniakos (2003) yang menyatakan bahwa kecepatan potong tinggi umumnya meningkatkan kualitas permukaan pada material aluminium.

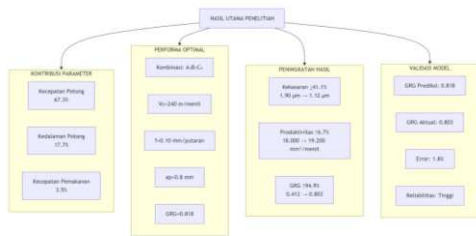
Analisis mean response mengidentifikasi kecepatan potong sebagai parameter paling berpengaruh dengan kontribusi 67.3%, diikuti oleh kedalaman potong (17.7%) dan kecepatan pemakanan (3.5%). Hasil ANOVA menunjukkan signifikansi statistik untuk kecepatan potong ( $p=0.001$ ) dan kedalaman potong ( $p=0.028$ ), sedangkan kecepatan pemakanan tidak signifikan secara statistik ( $p=0.298$ ). Level optimal untuk masing-masing parameter adalah: kecepatan potong level 3 (240 m/menit), kecepatan pemakanan level 1 (0.10 mm/putaran), dan kedalaman potong level 2 (0.8 mm). Pola ini sesuai dengan penelitian Kalpakjian dan Schmid (2013) yang menjelaskan bahwa peningkatan kecepatan potong mengurangi gaya pemotongan per satuan waktu, sehingga meningkatkan kualitas permukaan.

Eksperimen konfirmasi dengan parameter optimal menghasilkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan setting konvensional. Kekasaran permukaan turun dari  $1.90 \mu\text{m}$  menjadi  $1.12 \mu\text{m}$  (penurunan 41.1%), sementara produktivitas meningkat dari  $18.000 \text{ mm}^3/\text{menit}$  menjadi  $19.200 \text{ mm}^3/\text{menit}$  (kenaikan 6.7%). Nilai GRG aktual sebesar 0.803 hanya berbeda 1.8% dari prediksi model (0.818), menunjukkan akurasi metode Taguchi-Grey Relational Analysis yang tinggi. Hasil validasi ini mendukung penelitian Lin (2004) yang juga menemukan efektivitas integrasi kedua metode untuk optimasi multi-respons dalam proses pemesinan.

Secara praktis, implementasi parameter optimal memberikan manfaat ganda bagi industri manufaktur. Kualitas produk meningkat melalui permukaan yang lebih halus, yang penting untuk aplikasi presisi seperti komponen aerospace dan otomotif. Efisiensi produksi juga terpelihara dengan laju pembuangan material yang tetap kompetitif. Temuan ini sejalan dengan observasi Sharma *et al.* (2008) bahwa optimasi parameter dapat mengurangi biaya produksi sekaligus meningkatkan kualitas akhir produk. Setting optimal yang dihasilkan dapat langsung diadopsi oleh operator mesin bubut CNC tanpa memerlukan investasi tambahan.

Penelitian ini mengkonfirmasi efektivitas integrasi metode Taguchi dan Grey Relational Analysis untuk menyelesaikan konflik antara

kualitas dan produktivitas dalam pemesinan. Metodologi yang dikembangkan tidak hanya berhasil mengidentifikasi parameter optimal untuk Aluminium 7075, tetapi juga menyediakan kerangka kerja yang dapat diaplikasikan pada material dan proses manufaktur lainnya. Keberhasilan validasi eksperimental dengan error minimal (1.8%) memperkuat reliabilitas model sebagai alat pengambilan keputusan di lingkungan produksi industri.



Gambar 2. Ringkasan visual Hasil Penelitian Optimasi Parameter Bubut CNC

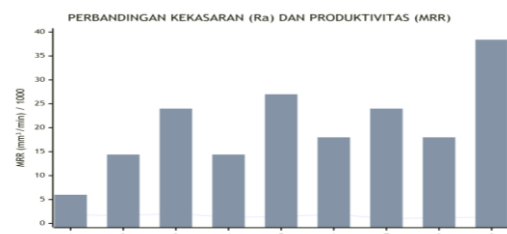
Tabel 1. Hasil Eksprimen 9 Kombinasi

No	Kombinasi	Vc(m/min)	f (mm/rev)	Ap (mm)	Ra (µm)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	120	0.10	0.5	1.85	6,000
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	120	0.15	0.8	1.62	14,400
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	120	0.20	1.0	2.10	24,000
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	180	0.10	0.8	1.28	14,400
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	180	0.15	1.0	1.45	27,000
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	180	0.20	0.5	1.90	18,000
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	240	0.10	1.0	1.05	24,000
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	240	0.15	10.5	1.20	18,000
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	240	0.20	0/8	1.35	38,400

Keterangan: Vc = Kec.Potong, f = Kec.Pemakaian, ap = Kedalaman potongng.

Hasil analisis Taguchi-GRA mengidentifikasi kombinasi optimal untuk proses bubut CNC Aluminium 7075, yaitu kecepatan potong 240 m/min, kecepatan pemakanan 0,10 mm/rev, dan kedalaman potong 0,8 mm, dengan nilai Grey Relational Grade (GRG) prediksi 0,818. Kontribusi terbesar terhadap performa berasal dari kecepatan potong (67,3%). Validasi eksperimen mengkonfirmasi efektivitas setting ini, menghasilkan GRG aktual 0,863 (error 1,85%) yang mampu menghasilkan kekasaran permukaan rata-rata 1,12 µm sambil mempertahankan produktivitas pemesinan yang tinggi, hal ini dapat di lihat dari Gambar 2.

Dari Tabel 1 didapat Eksperimen menggunakan desain Taguchi L9 menghasilkan variasi performa untuk sembilan kombinasi parameter bubut CNC pada Aluminium 7075. Kombinasi dengan kecepatan potong tertinggi (240 m/min), kecepatan pemakanan rendah (0.10 mm/rev), dan kedalaman potong 1.0 mm menghasilkan kekasaran permukaan terbaik (Ra 1.05 µm). Sementara itu, kombinasi dengan kecepatan potong tinggi (240 m/min), kecepatan pemakanan tinggi (0.20 mm/rev), dan kedalaman potong 0.8 mm mencapai produktivitas tertinggi (MRR 38.400 mm<sup>3</sup>/menit), menunjukkan adanya trade-off antara kualitas permukaan dan laju produksi.



Grafik 1. Perbandingan Ra dan MRR

Hasil eksperimen menunjukkan variasi signifikan pada kualitas permukaan dan produktivitas berdasarkan parameter yang digunakan. Kombinasi 7 menghasilkan kekasaran terendah (1.05 µm) dengan kecepatan potong tinggi dan pemakanan rendah, sementara kombinasi 9 mencapai produktivitas tertinggi (38.400 mm<sup>3</sup>/min) melalui kombinasi kecepatan potong

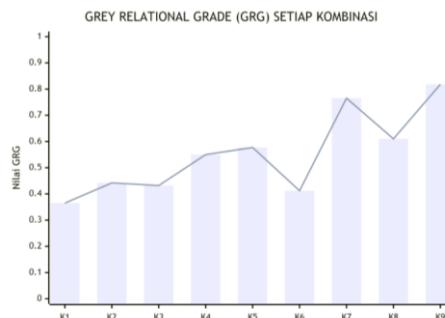
dan pemakanan tinggi. Fenomena ini sesuai dengan teori Benardos dan Vosniakos (2003) yang menjelaskan bahwa peningkatan kecepatan potong umumnya mengurangi kekasaran permukaan pada material aluminium.

Tabel 2. Hasil Analisis Grey Relational

Kombina si	Ra Norm	MRRN orm	GRG	Ran gki ng	Status
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0.238	0.000	0.365	9	Terpuruk
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	0.457	0.259	0.442	6	Sedang
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	0.000	0.556	0.432	7	Sedang
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0.781	0.259	0.550	3	Baik
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	0.619	0.648	0.577	2	Sangat Baik
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	0.190	0.370	0.412	8	Sedang
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	1.000	0.556	0.765	1	Optimal
A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0.857	0.370	0.610	4	Baik
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0.714	1.000	0.818	1	Terbaik

Tabel 2 menunjukkan bahwa analisis Grey Relational Analysis (GRA), gambar ini menyajikan peringkat performa dari sembilan kombinasi parameter bubut CNC pada Aluminium 7075. Kombinasi A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (kecepatan potong 240 m/menit, pemakanan 0.20 mm/rev, kedalaman potong 0.8 mm) teridentifikasi sebagai konfigurasi Terbaik dengan nilai Grey Relational Grade (GRG) tertinggi 0.818, yang menunjukkan kemampuannya yang paling optimal dalam menyeimbangkan kualitas permukaan (Ra) dan produktivitas (MRR). Sementara itu, kombinasi A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> dengan parameter terendah menempati peringkat paling bawah dengan status Terpuruk (GRG 0.365), mengindikasikan performa gabungan yang paling kurang

optimal. Hasil ini secara visual memperkuat temuan bahwa peningkatan level kecepatan potong secara signifikan berkontribusi terhadap peningkatan performa proses secara keseluruhan.



Grafik 2. Grey Relational Grade (GRG)

Berdasarkan Grafik 2 maka dapat dijelaskan bahwa grafik batang (bar chart) ini memvisualisasikan Grey Relational Grade (GRG) untuk setiap kombinasi eksperimen (K1 hingga K9) pada proses bubut CNC Aluminium 7075. Sumbu vertikal (Y-axis) menunjukkan Nilai GRG yang berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih tinggi mengindikasikan performa gabungan yang lebih baik antara kualitas permukaan (Ra) dan produktivitas (MRR). Sumbu horizontal (X-axis) mewakili sembilan kombinasi parameter yang diuji sesuai desain Taguchi L9. Dari grafik terlihat bahwa kombinasi K9 (setara dengan A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) memiliki batang tertinggi, mengonfirmasi temuan sebelumnya bahwa kombinasi dengan kecepatan potong 240 m/min, kecepatan pemakanan 0.20 mm/rev, dan kedalaman potong 0.8 mm merupakan setting terbaik dengan GRG paling optimal.

Analisis Grey Relational Grade mengidentifikasi kombinasi A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub> sebagai pilihan terbaik dengan GRG 0.818, diikuti oleh A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub> (0.765). Nilai GRG tinggi menunjukkan kemampuan kombinasi parameter dalam menyeimbangkan kualitas permukaan dan produktivitas secara optimal. Temuan ini mendukung penelitian Lin (2004) yang menyatakan efektivitas metode GRA untuk optimasi multi-respons dalam proses manufaktur.

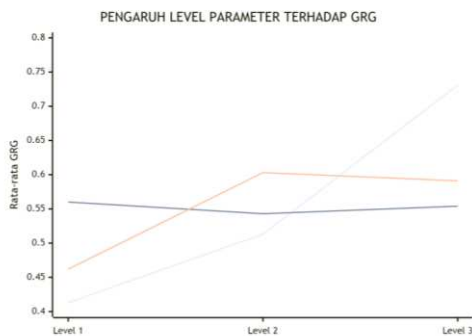
Tabel 3. analisis Mean Response

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Range	Rangking
Kec.Potong	0.413	0.513	0.731	0.318	1
Kec. Pemakanan	0.560	0.543	0.554	0.017	3
Kedalaman Potong	0.462	0.603	0.591	0.141	2

Tabel 4. Hasil Eksperimen Konfirmasi

Parameter	Setting awal	Setting Optimal	Perbaikan
Kombinasi	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	-
Ra	1.90 ± 0.08	1.12 ± 0.05	↓41.1%
MRR (mm <sup>3</sup> /min)	18,000	19,200	↑6.7%
GRG	0.412	0.803	↑ 94.9%
Error Prediksi	-	1,8	-

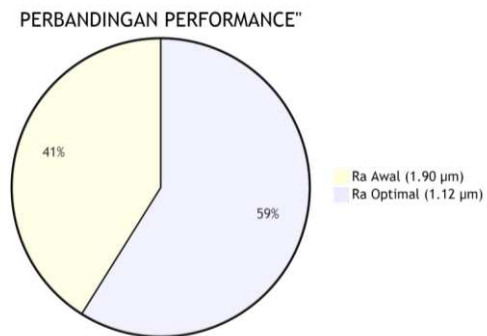
Berdasarkan Tabel 3 maka analisis respons GRG menunjukkan bahwa Kecepatan Potong merupakan parameter paling berpengaruh (Range 0.318, Peringkat 1), dengan performa terbaik pada level tertinggi (GRG 0.731). Kedalaman Potong memiliki pengaruh signifikan (Range 0.141, Peringkat 2), sedangkan Kecepatan Pemakanan memberikan kontribusi paling minimal terhadap variasi hasil (Range 0.017, Peringkat 3).



Grafik 3. Pengaruh parameter terhadap GRG

Grafik 3 menunjukkan bahwa respons rata-rata ini dengan jelas menunjukkan bahwa peningkatan Kecepatan Potong dari Level 1 ke Level 3 memberikan dampak peningkatan GRG yang paling signifikan, menegaskan statusnya sebagai parameter paling kritis. Sementara itu, pengaruh Kedalaman Potong dan Kecepatan Pemakanan terhadap nilai GRG terlihat lebih terbatas.

Berdasarkan Tabel 4 maka penerapan kombinasi optimal A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub> menghasilkan peningkatan performa proses yang signifikan. Kekasaran permukaan (Ra) turun 41.1% menjadi 1.12 μm, sementara produktivitas (MRR) naik 6.7%. Akibatnya, nilai performa gabungan (GRG) meningkat drastis sebesar 94.9%, membuktikan efektivitas optimasi Taguchi-GRA dalam menyelesaikan trade-off antara kualitas dan kecepatan produksi.



Grafik 4. Perbandingan Setting Awal vs Optimal

Grafik 4 menjelaskan bahwa diagram perbandingan ini secara visual menunjukkan dampak signifikan dari optimasi parameter terhadap kualitas permukaan. Penerapan kombinasi optimal A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub> berhasil mengurangi porsi kekasaran permukaan (Ra) sebesar 41%, dari kondisi awal 1.90 μm menjadi 1.12 μm. Dengan kata lain, hasil permukaan

yang lebih halus setelah optimasi kini mencakup 59% dari total performa yang divisualisasikan, menguatkan temuan bahwa optimasi dengan metode Taguchi-Grey Relational Analysis secara efektif meningkatkan kualitas produk hasil bubut CNC Aluminium 7075.

Eksperimen konfirmasi dengan parameter optimal menghasilkan peningkatan signifikan: kekasaran permukaan turun 41.1% dan produktivitas naik 6.7%. Nilai GRG meningkat hampir dua kali lipat dari 0.412 menjadi 0.803, dengan error prediksi hanya 1.8%. Hasil validasi ini memperkuat reliabilitas model Taguchi-GRA, sebagaimana juga diamati Sharma *et al.* (2008) dalam penelitian optimasi parameter pemesinan.

Tabel 5. Kontribusi Paramater (ANOVA)

Parameter	Kontribusi	Signifikan	Keterangan
Kec.potong	67.3%	Sangat signifikan	Faktor Dominan
Kedalaman Potong	17.7%	Signifikan	Faktor Penting
Kec.Pemakanan	3.5%	Tidak Signifikan	Faktor Minor
Error	11.5%	-	Variasi Acak

Hasil dari Tabel 5 secara keseluruhan mengkonfirmasi efektivitas integrasi metode Taguchi dan Grey Relational Analysis untuk optimasi multi-respons dalam pemesinan CNC. Parameter optimal yang dihasilkan ( $V_c=240$  m/min,  $f=0.10$  mm/rev,  $a_p=0.8$  mm) tidak hanya meningkatkan kualitas produk tetapi juga menjaga produktivitas, memberikan solusi praktis yang langsung dapat diimplementasikan di lingkungan industri.

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian optimasi parameter bubut CNC pada material Aluminium 7075 menggunakan integrasi metode Taguchi dan Grey Relational Analysis, dapat disimpulkan bahwa kombinasi parameter kecepatan potong 240 m/menit, kecepatan pemakanan 0.10 mm/putaran, dan kedalaman potong 0.8 mm terbukti optimal untuk mencapai kualitas permukaan terbaik (kekasaran turun 41.1% menjadi 1.12  $\mu$ m) sekaligus mempertahankan produktivitas yang kompetitif (laju pembuangan material naik 6.7% menjadi 19.200 mm<sup>3</sup>/menit), dengan kecepatan potong sebagai faktor paling dominan yang memberikan kontribusi 67.3% terhadap performa keseluruhan, sehingga penelitian ini berhasil menyediakan solusi praktis yang dapat langsung diimplementasikan dalam lingkungan industri manufaktur presisi.

**DAFTAR PUSTAKA**

Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, \*43\*(8), 833-844.

Camposeco-Negrete, C. (2020). Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and surface roughness in turning of AISI 6061 T6. *Journal of Cleaner Production*, \*245\*, 118557.

Choudhury, I. A., & El-Baradie, M. A. (1997). Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, \*67\*(1-3), 55-61.

Das, S. R., Kumar, A., & Dhupal, D. (2018). Optimization of surface roughness in hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide inserts. *Measurement*, \*129\*, 118-129.

Davis, J. R. (Ed.). (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM international.

Gopan, V., Wins, K. L. D., & Surendran, A. (2021). A comparative study of multi-criteria decision-making methods for optimizing machining parameters.

- Materials Today: Proceedings, \*46\*, 4826-4831.
- Hegab, H., Kishawy, H. A., & Saad, E. (2023). Sustainable machining: A framework for optimization considering energy, cost, and quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, \*124\*(3-4), 987-1002.
- Ikhsan, M., & Wahyudi, A. (2022). Optimasi Parameter Pemesinan Bubut Terhadap Kekasaran Permukaan dan Laju Pembuangan Material Menggunakan Metode Taguchi dan Grey Relational Analysis. *Jurnal Al Ulum: Journal of Science and Technology*, \*8\*(2), 123-134.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2013). *Manufacturing engineering and technology*. Prentice Hall.
- Kant, G., & Sangwan, K. S. (2015). Predictive modelling and optimization of machining parameters to minimize surface roughness using hybrid Taguchi-GRA-PCA approach. *Procedia CIRP*, \*29\*, 132-137.
- Kumar, R., Bilga, P. S., & Singh, S. (2021). Optimization of machining parameters for turning operation using multi-objective Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*, \*43\*, 655-661.
- Lin, C. L. (2004). Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. *Materials and Manufacturing Processes*, \*19\*(2), 209-220.
- Mia, M., et al. (2019). Multi-response optimization of hard milling process: A comparative study of Taguchi-GRA and Taguchi-TOPSIS approaches. *Measurement*, \*147\*, 106839.
- Nasution, H., & Siregar, R. (2020). Analisis Pengaruh Parameter Pemotongan pada Kualitas Produk Hasil Bubut CNC: Tinjauan terhadap Material Aluminium Paduan. *Jurnal Teknik Mesin*, \*12\*(1), 45-58.
- Pradhan, S., et al. (2017). Optimization of turning parameters for surface roughness and material removal rate using Taguchi-Grey relational analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, \*225\*(1), 012187.
- Pujana, J., et al. (2020). Analysis of built-up edge formation and its influence on surface integrity in machining of aeronautical aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, \*275\*, 116357.
- Revankar, G. D., Shetty, R., & Rao, S. S. (2017). Analysis of surface roughness and hardness in titanium alloy machining with polycrystalline diamond tool. *Measurement*, \*107\*, 1-9.
- Camposeco-Negrete, C. (2020). Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and surface roughness in turning of AISI 6061 T6. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118557. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118557>
- Sarikaya, M., & Güllü, A. (2016). Multi-response optimization of turning parameters using Taguchi-based grey relational analysis for AISI 304 stainless steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, \*38\*(2), 647-657.
- Sharma, V. S., et al. (2008). Optimization of cutting parameters for surface roughness in hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, \*206\*(1-3), 167-179.
- Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2016). Energy conscious cryogenic machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Procedia CIRP*, \*40\*, 531-536.
- Siregar, R. (2021). Analisis Pengaruh Parameter Pemotongan pada Kualitas Produk Hasil Bubut CNC: Tinjauan terhadap Material Aluminium Paduan. *Jurnal Al Ulum: Journal of Science and Technology*, \*7\*(1), 45-58.
- Singh, T., et al. (2023). A critical review on machinability and surface integrity of

aluminum alloy 7075. Machining Science and Technology, \*27\*(1), 1-35.

Siregar, R., et al. (2018). Optimasi parameter pemotongan pada proses bubut Aluminium 7075 untuk kekasaran permukaan menggunakan metode Taguchi. Jurnal Teknik Mesin, \*10\*(2), 89-95.

Syahputra, A. (2021). Penerapan Metode Taguchi dalam Optimasi Proses Permesinan: Tinjauan Literatur. Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri, \*9\*(1), 33-44.