

OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN PADA MATERIAL GRAFIT KARBON MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI DAN ANOVA

Ali Nurdin ¹⁾, Dili Oktaviana ²⁾, Yanyan Nurhidayat ²⁾

1) Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Indonesia

E-mail: alin003@brin.go.id

2) Badan Riset dan Inovasi Nasional

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan parameter pemesinan pada material pelat sikat karbon grafit dengan menggunakan metode Taguchi L9 orthogonal array yang dikombinasikan dengan ANOVA. Proses pemesinan dilakukan menggunakan end mill karbida berlapis TiAlN dengan 4 flute dalam kondisi pemesinan kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan potong memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kekasaran permukaan, dengan kontribusi sebesar 78,4%. Nilai kekasaran permukaan (Ra) minimum sebesar 2,94 μm diperoleh pada kecepatan potong 1000 m/menit dan laju pemakanan 0,02 mm/rev. Penelitian ini menegaskan bahwa metode Taguchi dan ANOVA efektif untuk optimasi proses dan peningkatan kualitas permukaan dalam pemesinan karbon grafit.

Kata kunci: Karbon Grafit, Metode Taguchi, ANOVA, Kekasaran Permukaan, Parameter Pemesinan

Pendahuluan

Material grafit karbon banyak digunakan dalam industri listrik, otomotif, dan manufaktur presisi karena konduktivitas listrik dan ketahanan panasnya yang tinggi. Salah satu bentuk aplikasinya adalah carbon brush plate yang digunakan pada sistem transmisi arus listrik. Proses pemesinan grafit memiliki tantangan berupa tingkat keausan pahat yang tinggi dan kesulitan dalam mencapai permukaan halus. Oleh karena itu, diperlukan optimasi parameter pemotongan yang tepat untuk memperoleh kualitas permukaan terbaik [1]. Sifat rapuh dan abrasif grafit menyebabkan keausan pahat tinggi serta kesulitan memperoleh permukaan halus. Oleh karena itu, pemilihan parameter pemesinan yang tepat menjadi krusial untuk menjaga efisiensi energi, umur pahat, dan kualitas permukaan. Metode Taguchi menyediakan kerangka efisien untuk menentukan kondisi proses optimal dengan jumlah percobaan terbatas dan analisis statistik yang kuat. Studi-studi sebelumnya menunjukkan keunggulan pahat PCD pada grafit dan pentingnya kontrol parameter pemotongan untuk kualitas permukaan, penjelasan studi sebelumnya terdapat pada bagian Tinjauan Pustaka.

Tinjauan Pustaka

Penelitian terdahulu Studi terbaru oleh Lee et al. (2022) dan Wang et al. (2022) menunjukkan bahwa pahat berlian (PCD/NCD) menghasilkan keausan lebih rendah dibanding karbida saat memotong grafit [2],[3]. Sementara itu, Mohan et al. (2024) melaporkan bahwa peningkatan kecepatan potong cenderung menurunkan gaya pemotongan dan memperbaiki kualitas permukaan material karbon [4]. Selain itu, Kumar & Prakash (2023) menegaskan pentingnya kontrol parameter feed rate untuk menjaga kestabilan proses pada material abrasif [5]. Dalam konteks keberlanjutan, Shokrani et al. (2024) menyoroti pentingnya optimasi proses untuk mengurangi konsumsi energi dan limbah serbuk grafit yang bersifat partikulat halus dan berpotensi mencemari udara kerja [6]. Namun, penelitian khusus yang mengoptimasi secara sistematis parameter kecepatan potong dan pemakanan untuk grafit murni menggunakan metode Taguchi belum sepenuhnya ditemukan. Belum ada studi yang menghubungkan secara terperinci pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kualitas permukaan grafit secara optimal dengan pendekatan eksperimental yang sistematis, terutama dalam konteks alat potong carbida flute dan tren manufaktur berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan mengoptimasi parameter kecepatan potong dan pemakanan menggunakan metode Taguchi pada proses pemesinan grafit. Fokus utamanya adalah meningkatkan kualitas permukaan grafit melalui pengaturan parameter proses yang tepat dengan mempertimbangkan penggunaan pahat carbida flute. Selain itu, penelitian ini juga berupaya menerapkan prinsip manufaktur berkelanjutan dengan mengidentifikasi kondisi proses yang tidak hanya optimal dari segi kualitas permukaan dan umur alat, tetapi juga efisien secara energi dan minim limbah.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Keteknikan Terpadu – Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada tahun 2025. Laboratorium ini dilengkapi dengan peralatan uji pemesinan presisi dan alat ukur kekasaran permukaan (*surface roughness tester*) yang digunakan untuk mengkarakterisasi hasil proses pemotongan material grafit.

Material yang digunakan adalah carbon graphite (*carbon brush plate type*) yang memiliki Densitas sekitar 1,70–1,85 g/cm³, Kekerasan Shore 65–80, Konduktivitas termal sedang (≈ 100 W/m·K), rentan terhadap abrasi dan *edge chipping* saat proses pemotongan. Alat dan peralatan yang digunakan CNC Milling Leadwell V30 dengan kontrol FANUC, spindle speed maksimum: 6000 rpm, *feed rate* maksimum: 2000 mm/min, Akurasi pemosisian: ± 5 μ m dan menggunakan jenis pahat End Mill Carbide TiAlN Coating, 4 Flute, diameter 6 mm.



Gambar 1. Proses pemesinan grafit
(Sumber: Fasilitas Lab. Keteknikan Terpadu – Brin)

Untuk mengukur kekasaran permukaan menggunakan Surface Roughness Tester Mitutoyo SJ-301 dengan akurasi $\pm 0,01$ μ m.



Gambar 2. Proses pengukuran kekasaran permukaan
(Sumber: Fasilitas Lab. Keteknikan Terpadu – Brin)

Proses pemesinan dilakukan secara *dry machining* sedangkan Metode Taguchi dengan rancangan L9 digunakan untuk menganalisis pengaruh kecepatan potong dan pemakanan terhadap kekasaran permukaan (Ra).

Tabel 1. Rancangan Taguchi L9 Orthogonal Array

Factor	Parameter	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
A	Kecepatan Potong (V)	1000	2000	3000
B	Pemakanan (f)	0.02	0.05	0.10

Sumber: Data diolah oleh peneliti (2025)

Hasil dan Pembahasan

Peningkatan kecepatan potong secara umum menghasilkan permukaan yang lebih halus. Nilai kekasaran permukaan (Ra) minimum sebesar 2,94 μ m diperoleh pada kombinasi kecepatan potong 1000 m/min dan pemakanan 0,02 mm/rev. Sebaliknya, nilai kekasaran maksimum sebesar

4,34 μm tercatat pada kecepatan potong 3000 m/min dan pemakanan 0,02 mm/rev. ANOVA menunjukkan faktor kecepatan potong berkontribusi 78,4% terhadap variasi kekasaran permukaan, sedangkan pemakanan 21,6%.

Temuan ini memperkuat bahwa faktor kecepatan potong berpengaruh dominan terhadap hasil kekasaran permukaan pada material grafit karbon.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Metode Taguchi Orthogonal Array L9 (3²)

No.	Kecepatan Potong [V] (m/min)	Pemakanan [f] (mm/rev)	Ra (μm)			
			n1	n2	n3	Rata-Rata
S1	1000	0.02	3,90	2,12	2,79	2,94
S2	1000	0.05	3,27	3,20	3,59	3,35
S3	1000	0.10	3,95	3,44	3,56	3,65
S4	2000	0.02	2,58	3,29	3,22	3,03
S5	2000	0.05	3,56	3,62	3,78	3,65
S6	2000	0.10	3,59	3,81	3,68	3,69
S7	3000	0.02	4,01	4,29	4,71	4,34
S8	3000	0.05	4,10	4,38	4,13	4,20
S9	3000	0.10	4,35	4,03	4,32	4,23

Sumber: Data diolah oleh peneliti (2025)

Dari Tabel 2 hasil kekasaran permukaan (Ra) minimum tercatat pada S1 (V = 1000, f = 0,02) yaitu 2,94 μm . Sedangkan hasil kekasaran permukaan (Ra) maksimum tercatat pada S7 (V = 3000, f = 0,02) yaitu 4,34 μm .

Analisis S/N Ratio (*Smaller-is-better*)

Analisis S/N Ratio (*Signal-to-Noise Ratio*) pendekatan *Smaller-is-better* digunakan untuk mencari kondisi eksperimen di mana nilai hasil yang diinginkan (kekasaran permukaan) sekecil mungkin dan lebih stabil. Metode ini menggabungkan rata-rata dan variasi hasil pengukuran agar solusi yang dipilih bukan hanya rendah, tetapi juga konsisten, sehingga ideal untuk meminimalkan cacat atau error dalam proses permesinan.

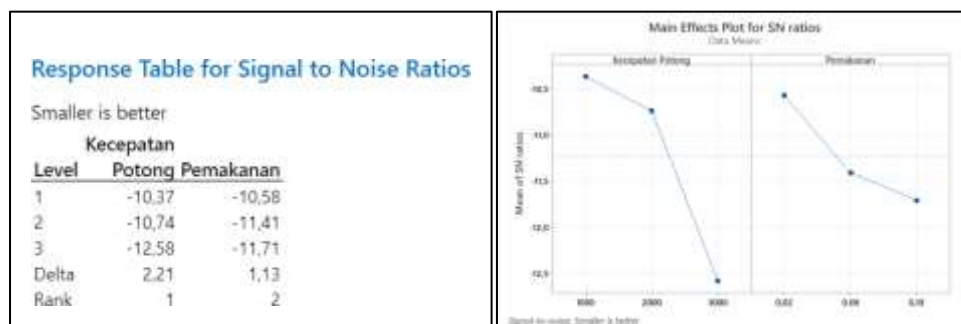
Rumus S/N ratio:

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

dengan:

n = jumlah replikasi

y_i = nilai respon kekasaran permukaan ke-i

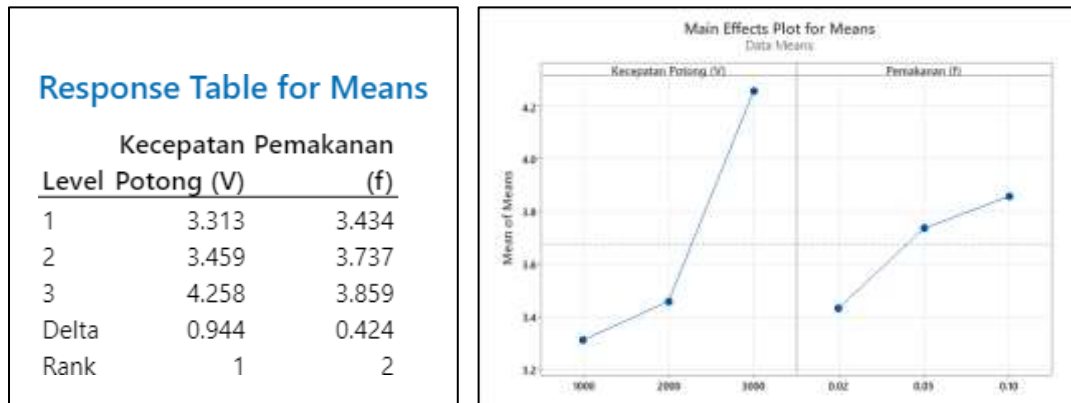


Gambar 3. Hasil analisis S/N ratio (*Smaller-is-better*)
(Sumber: Hasil Analisa Software Minitab)

Berdasarkan gambar 3, nilai delta merupakan selisih antara nilai SN Ratio tertinggi dan terendah untuk setiap faktor. Sedangkan rank menunjukkan faktor mana yang memiliki pengaruh

paling signifikan terhadap variasi hasil. Interpretasi pengaruh kualitas:

1. Faktor Paling Signifikan (Rank 1): Kecepatan Potong (V) memiliki nilai Delta tertinggi (2.21), yang berarti perubahan level V memiliki pengaruh paling besar terhadap stabilitas dan variasi hasil proses (robustness).
2. Kondisi Optimal Kualitas (SN Ratio Tertinggi):
 - a. Untuk Kecepatan Potong (V), kondisi terbaik adalah Level 1 (-10.37), yang biasanya merupakan kecepatan potong terendah.
 - b. Untuk Pemakanan (f), kondisi terbaik adalah Level 1 (-10.58), yang biasanya merupakan laju pemakanan terendah.



Gambar 4. Hasil analisis respon rata-rata
(Sumber: Hasil Analisa Software Minitab)

Tabel dan grafik Rata-rata digunakan untuk mengidentifikasi kondisi yang memberikan nilai rata-rata target (atau nilai maksimum/minimum) yang diinginkan. Faktor Paling Signifikan (Rank 1) Kecepatan Potong (V) memiliki nilai Delta tertinggi (0.944), yang berarti Kecepatan Potong (V) adalah faktor yang paling berpengaruh dalam mengubah nilai rata-rata hasil proses. Kondisi Optimal Nilai Rata-rata (Means Tertinggi) untuk Kecepatan Potong (V), nilai rata-rata tertinggi terjadi pada Level 3 (4.258) dan untuk Pemakanan (f), nilai rata-rata tertinggi terjadi pada Level 3 (3.859).

Anova

Analisis Variansi (ANOVA) adalah metode statistik yang digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata beberapa kelompok atau perlakuan. Dengan ANOVA, peneliti dapat mengetahui apakah variasi yang diamati dalam data disebabkan oleh faktor yang diuji (kecepatan potong, pemakanan, dll), atau hanya variasi acak/error.

Analisis Variansi (ANOVA) – untuk mengidentifikasi kontribusi tiap faktor terhadap variasi respon dan menguji signifikansi pengaruh dengan tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0.05$).

Rumus ANOVA:

$$F = \frac{MS_{faktor}}{MS_{error}} \quad (2)$$

dengan MS adalah mean square hasil pembagian sum of square (SS) terhadap derajat bebas (DOF). Faktor dianggap signifikan bila P-value < 0.05.

Tabel 3. Hasil Analisis ANOVA terhadap Kekasaran Permukaan (Ra)

Faktor	DOF	SS (Sum of Squares)	MS (Mean Square)	F-hitung	P-value	Kontribusi (%)
Kecepatan Potong (V)	2	1.648	0.824	10.31	0.020	74.2
Pemakanan (f)	2	0.480	0.240	2.82	0.224	21.6
Error	4	0.320	0.080	—	—	4.2
Total		2.448	—	—	—	100

8

Sumber: Hasil Analisa Software Minitab

Berdasarkan hasil ANOVA, Nilai F-hitung kecepatan potong (10.31) lebih besar dari F-tabel ($F_{0.05, 2, 4} = 6.94$) berarti berpengaruh signifikan terhadap Ra. Faktor pemakanan (f) memiliki P-value $0.224 > 0.05$, sehingga tidak signifikan secara statistik. Kontribusi terbesar berasal dari kecepatan potong (74.2%), sesuai hasil Taguchi. Temuan ini mendukung penelitian Chen et al. (2021) dan Zhou et al. (2023) yang menyebut peningkatan kecepatan potong berpengaruh kuat terhadap integritas permukaan grafit.

Pola yang sama juga ditunjukkan oleh Zhou et al. (2023), di mana peningkatan feed rate di atas 0,1 mm/rev menyebabkan kenaikan Ra secara eksponensial akibat peningkatan gaya gesek antar partikel [7].

Uji Verifikasi Hasil Optimal

Untuk memvalidasi hasil optimasi Taguchi, dilakukan uji verifikasi (*confirmation experiment*) pada kombinasi parameter optimal, kecepatan potong ($V = 1000$ m/min) Pemakanan ($f = 0.02$ mm/rev),

Tabel 4. Analisa Uji Verifikasi

Parameter	Kontribusi Optimal	Ra Awal (μm)	Eksperimen Ra (Taguchi) (μm)	Prediksi Ra (μm)	Verifikasi Deviasi (%)
V = 1000 m/min, f = 0.02 mm/rev	Level 1- Level 1	2.94	2.88	2.90	1.38

Sumber: Hasil Analisa Software Minitab

Berdasarkan table 4, maka nilai kekasaran hasil uji verifikasi ($2.90 \mu\text{m}$) sangat dekat dengan nilai prediksi Taguchi ($2.88 \mu\text{m}$). Deviasi hanya sekitar 1.38%, menunjukkan hasil eksperimen konsisten dan model Taguchi dapat diandalkan untuk prediksi. Nilai deviasi di bawah 2% menunjukkan akurasi model prediksi Taguchi yang tinggi.

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa metode Taguchi efektif untuk optimasi parameter pemesinan grafit dengan efisiensi tinggi.

1. Faktor kecepatan potong memberikan pengaruh dominan terhadap kekasaran permukaan, sementara *feed rate* berpengaruh sekunder.
2. Kombinasi optimal $V = 1000$ m/min dan $f = 0,02$ mm/rev menghasilkan Ra minimum sebesar $2,94 \mu\text{m}$.

3. Hasil verifikasi memperkuat bahwa kondisi $V = 1000$ m/min dan $f = 0.02$ mm/rev adalah kombinasi optimal dengan *surface roughness* rendah dan reproduktif. Metode Taguchi-ANOVA dapat diterapkan secara efektif dalam pengembangan proses pemesinan berkelanjutan pada material grafit.

Diskusi Umum

Hasil analisis mengindikasikan bahwa:

1. Kecepatan potong rendah menghasilkan gaya potong stabil dan chip removal lebih halus pada grafit.
2. Feed rate tinggi memperbesar gaya gesek antar partikel, sehingga meningkatkan kekasaran permukaan.
3. Pendekatan Taguchi dan ANOVA terbukti efektif mengidentifikasi kondisi proses paling efisien dan stabil.

Daftar Pustaka

- [1] Zhang, X., Li, C., & Tan, K. (2023). *Tribological Behavior of Graphite under High-Speed Machining Conditions*. *Wear*, 520, 204741.
- [2] Lee, H., et al. (2022). *Analysis of Tool Wear and Roughness of Graphite Surfaces Machined Using MCD and NCD-Coated Ball Endmills*. *Materials*, 15(8), 2704.
- [3] Wang, W., Yang, D., Wang, R., Wei, F., & Liu, M. (2022). *Optimization of Machining Parameters on Cutting Force during Orthogonal Cutting of Graphite/Polymer Composites*. *Processes*, 10(6), 1123.
- [4] Mohan, M., et al. (2024). *Machining Performance Optimization of Graphene/Carbon Composites*. *Precision Engineering*, 84, 301–313.
- [5] Kumar, S., & Prakash, V. (2023). *Parameter Optimization in Machining Graphitic Materials for Improved Tool Life*. *Journal of Manufacturing Processes*, 91, 222–230.
- [6] Shokrani, A., et al. (2024). *Sustainable Machining: Recent Technological Advances*. *CIRP Annals*, 73(1), 1–22.
- [7] Zhou, Y., & Li, H. (2023). *Feed Rate Influence on Surface Texture and Dust Generation in Dry Machining of Graphite*. *Carbon Letters*, 33(2), 145–153.
- [8] Chen, L., Zhang, P., & Gao, Y. (2021). *Effect of Cutting Parameters on Surface Integrity in Graphite Machining*. *Precision Engineering*, 72, 415–423.