

Data-Driven Analysis of Machining Parameters Affecting Surface Roughness (Ra) in CNC Turning of Al6061 Using OLS Method

Dimas Ardiansyah Halim^{1*}, Arbye, S¹, Rio Evandi¹, Tosa Susilo¹, and Joko Suparno²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Tidar, INDONESIA

²Department of Mechanical Engineering, Akademi Teknik Wacana Manunggal Semarang, INDONESIA

Corresponding author: dahalim@untidar.ac.id

Received November 12th 2026; Revised April 24th 2026; Accepted May 21th 2026

Abstract

This study aims to analyze the effect of machining parameters on surface roughness (Ra) in the CNC turning process of Aluminum 6061 using the Ordinary Least Squares (OLS) approach. The investigated parameters include cutting speed (v), feed rate (f), nose radius (r), and spindle speed (n). The experimental design was developed using a Central Composite Design (CCD) with five coded levels (+2, +1, 0, -1, -2). The machining process was carried out on a CNC GSK 980TDi lathe using CCMT inserts with nose radii of 0.2 mm, 0.4 mm, and 0.8 mm, while the surface roughness was measured using a Mahr Marsurf M300 tester with an accuracy of 0.076 μm . Experimental data were analyzed using the OLS method to determine the most dominant parameters affecting Ra. The results show a coefficient of determination (R^2) of 0.932 and an adjusted R^2 of 0.868, indicating that the regression model provides an excellent level of fit. The nose radius (r) and spindle speed (n) were found to be the most significant factors influencing surface roughness, exhibiting opposite effects. This data-driven approach demonstrates the effectiveness of the OLS method in identifying critical machining parameters in CNC turning processes.

Keywords: Surface Roughness; CNC Turning; Aluminum 6061; Ordinary Least Squares (OLS)

Analisis Berbasis Data Parameter Pemesinan terhadap Kekasaran Permukaan (R_a) pada Proses Bubut CNC Al6061 dengan Metode OLS

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan (R_a) pada proses pembubutan CNC material Aluminium 6061 menggunakan pendekatan *Ordinary Least Squares* (OLS). Parameter yang dikaji meliputi kecepatan potong (v), kecepatan pemakanan (f), *nose radius* (r), dan kecepatan putaran *spindle* (n). Desain percobaan menggunakan *Central Composite Design* (CCD) dengan lima level kodifikasi (+2, +1, 0, -1, -2). Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin CNC GSK 980TDi dengan *insert* pahat CCMT *nose radius* 0,2 mm, 0,4 mm, dan 0,8 mm, sedangkan pengujian kekasaran permukaan dilakukan dengan alat *Mahr Marsurf M300* berketelitian 0,076 μm . Data hasil eksperimen dianalisis menggunakan metode OLS untuk menentukan parameter yang paling dominan memengaruhi nilai R_a . Hasil analisis menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,932 dan *Adjusted R²* sebesar 0,868, menandakan model regresi memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik. Parameter *nose radius* (r) dan *spindle speed* (n) diketahui sebagai faktor paling signifikan terhadap kekasaran permukaan, dengan arah pengaruh yang berlawanan. Pendekatan berbasis data ini membuktikan efektivitas metode OLS dalam mengidentifikasi parameter kritis pada proses pembubutan CNC.

Kata Kunci: Kekasaran Permukaan; CNC *Turning*; Aluminium 6061; OLS

I. PENDAHULUAN

Kualitas permukaan merupakan salah satu indikator penting dalam menentukan performa dan ketahanan komponen hasil proses pemesinan. Salah satu parameter yang banyak digunakan untuk menilai kualitas permukaan adalah kekasaran permukaan (Dashti & Albannai, 2020). Nilai kekasaran permukaan (R_a) sangat dipengaruhi oleh kondisi pemotongan, jenis material, serta parameter pemesinan yang digunakan. Dalam proses pembubutan, kombinasi antara kecepatan potong, kecepatan pemakanan, *nose radius*, dan putaran *spindle* memiliki peran signifikan terhadap hasil akhir permukaan benda kerja. Oleh karena itu, analisis pengaruh parameter-parameter tersebut perlu dilakukan secara sistematis agar diperoleh pemahaman yang komprehensif terhadap kualitas hasil pemesinan (Firmansyah et al., 2021; Kurnia et al., 2023; Ruzova & Haddadi, 2025).

Material Aluminium 6061 banyak digunakan pada industri otomotif, permesinan, dan pesawat terbang karena memiliki sifat ringan, tahan korosi, serta mudah dikerjakan. Kombinasi sifat tersebut menjadikan material ini banyak digunakan pada industri otomotif, perkapalan, dan permesinan presisi (Abellán-nebot et al., 2024; Putra & Adil, 2020). Untuk mendapatkan kualitas permukaan yang baik pada material ini, diperlukan pemilihan parameter pemesinan yang tepat. Taraman (1974) dan Kulshreshtha (2013) melaporkan bahwa peningkatan *cutting speed* dapat meningkatkan nilai R_a , sedangkan *feed rate* dan *depth of cut* yang lebih kecil cenderung menghasilkan permukaan yang lebih halus. Sebaliknya, Doniavi (2007) serta Dinesh et al. (2016) menemukan bahwa peningkatan *cutting speed* dalam rentang tertentu justru menurunkan kekasaran permukaan akibat pengurangan gaya potong. Beberapa penelitian lainnya, seperti Singh & Rao (2007) dan Setyono et al. (2022), menegaskan bahwa *feed rate* merupakan faktor paling dominan dalam menentukan nilai R_a , sementara *depth of cut* umumnya menunjukkan pengaruh yang lebih kecil. Do Duc et al. (2020) dan Mohruni et al. (2018) yang menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dan *Central Composite Design* (CCD) melaporkan bahwa interaksi antara *feed rate* dan *cutting speed* memberikan pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan aluminium. Firdaus dan Susanti (2021) menggunakan analisis regresi untuk menentukan parameter dominan pada

proses pembubutan CNC, sedangkan Suparno et al. (2024) menyoroti bahwa penggunaan pahat dan pendingin yang tepat berkontribusi terhadap penurunan nilai Ra. Namun demikian, penelitian yang secara khusus membahas hubungan antar parameter pada mesin CNC tipe GSK 980TDi dengan material Al6061 pada pembuatan purwarupa *Pillbox* masih terbatas.

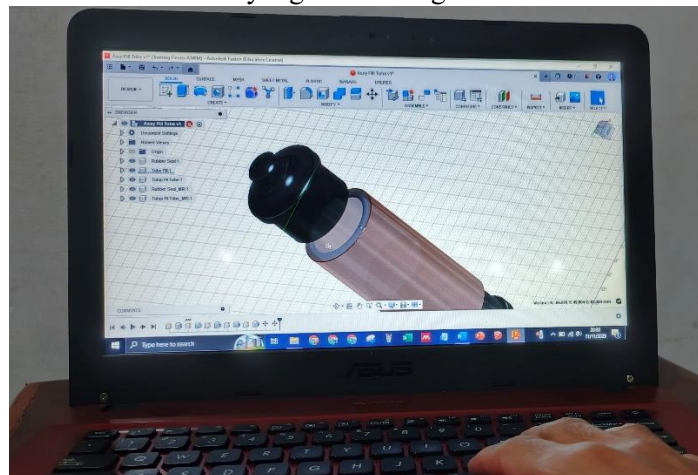
Identifikasi parameter dominan terhadap kekasaran permukaan diperlukan agar proses pembubutan dapat dioptimalkan secara efisien. Salah satu metode analisis yang sederhana namun efektif untuk mengukur pengaruh setiap variabel adalah *Ordinary Least Squares* (OLS) (Lai et al., 2024; Sukkam, 2024; Trinh, 2025). Metode OLS mampu menjelaskan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat melalui analisis regresi linier berganda, sehingga dapat diketahui arah dan besarnya pengaruh setiap parameter pemesinan terhadap nilai Ra. Dengan pendekatan ini, analisis berbasis data menjadi alat yang relevan untuk mengkaji perilaku sistem pemesinan secara kuantitatif. (Danh & Cuong, 2023; El-Axir et al., 2017)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan hasil pembubutan CNC material Al6061 menggunakan pendekatan *Ordinary Least Squares* (OLS). Parameter yang dikaji meliputi kecepatan potong (v), kecepatan pemakanan (f), *nose radius* (r), dan putaran *spindle* (n), yang ditentukan berdasarkan rancangan percobaan *Central Composite Design* (CCD) dengan nilai kodifikasi. Analisis dilakukan untuk menentukan parameter yang paling dominan dalam memengaruhi kekasaran permukaan pada mesin CNC GSK 980TDi.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan proses manufaktur presisi, khususnya dalam penentuan parameter optimal pada proses pembubutan material Al6061. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pemanfaatan metode statistik OLS sebagai pendekatan berbasis data untuk evaluasi performa mesin CNC di lingkungan pendidikan vokasi maupun industri kecil-menengah.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan eksperimental yang tersusun secara sistematis agar dapat direplikasi oleh peneliti lain. Tahap pertama dimulai dengan pembuatan desain purwarupa benda kerja berupa *pillbox* menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Student Edition. Desain tersebut digunakan untuk menentukan bentuk, dimensi, dan area pemesinan yang akan diuji ditunjukkan pada gambar 1. Selanjutnya dilakukan proses pemrograman *Computer Aided Manufacturing* (CAM) pada perangkat lunak yang sama untuk menghasilkan jalur pahat (*toolpath*) dengan strategi pemotongan 2D *adaptive clearing* sebagai proses *roughing* dan 2D *contour* sebagai proses *finishing*. Hasil pemrograman kemudian diekspor dalam bentuk G-code yang sesuai dengan sistem kontrol mesin CNC GSK 980TDi.



Gambar 1 Desain Purwarupa Pillbox

Tahap kedua adalah penentuan variabel pemesinan berdasarkan rancangan *Central Composite Design* (CCD) dengan lima level kodifikasi, yaitu -2 , -1 , 0 , $+1$, dan $+2$. Empat parameter utama yang dijadikan variabel bebas meliputi kecepatan potong (v , m/min), kecepatan pemakanan (f , mm/rev), *nose radius* (r , mm), dan kecepatan putaran *spindle* (n , rpm). Nilai aktual tiap level ditetapkan berdasarkan batas aman kerja mesin dan karakteristik material Aluminium 6061, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1. Total 30 kombinasi percobaan dihasilkan dari rancangan CCD ini, yang masing-masing mewakili satu sampel benda kerja untuk diuji secara individual.

Tabel 1. Nilai Kodifikasi CCD

<i>Variables</i>	Unit	Simbol	Kode	-2	-1	0	1	2
<i>Cutting Speed</i>	m/min	v	X1	50	90	150	200	300
<i>Feed rate</i>	mm/rev	f	X2	0,1	0,25	0,4	0,75	1
<i>Spindle speed</i>	RPM	n	X3	700	1200	2000	2600	3900
<i>Nose radius</i>	mm	r	X4	-	0,2	-	0,4	0,8

Tahap ketiga adalah proses *setting* mesin dan pelaksanaan pembubutan. Mesin yang digunakan adalah CNC GSK 980TDi dengan *tool holder* tipe SCLCR dan pahat sisip (*insert*) tipe CCMT berdiameter *nose radius* 0,2 mm, 0,4 mm, dan 0,8 mm sesuai rancangan percobaan. Material benda kerja berupa batang silinder A16061 berdiameter 32 mm dan panjang 60 mm. Setiap sampel dibubut dalam kondisi pemotongan kering (tanpa *coolant*) untuk menjaga konsistensi termal proses. Sebelum pemesinan, dilakukan *tool setting*, *work offset*, dan pemeriksaan sistem pahat untuk memastikan posisi awal sesuai dengan koordinat nol mesin. Proses pembubutan dilakukan secara berurutan sesuai urutan kombinasi parameter yang telah ditentukan dalam rancangan CCD ditunjukkan pada gambar 2.

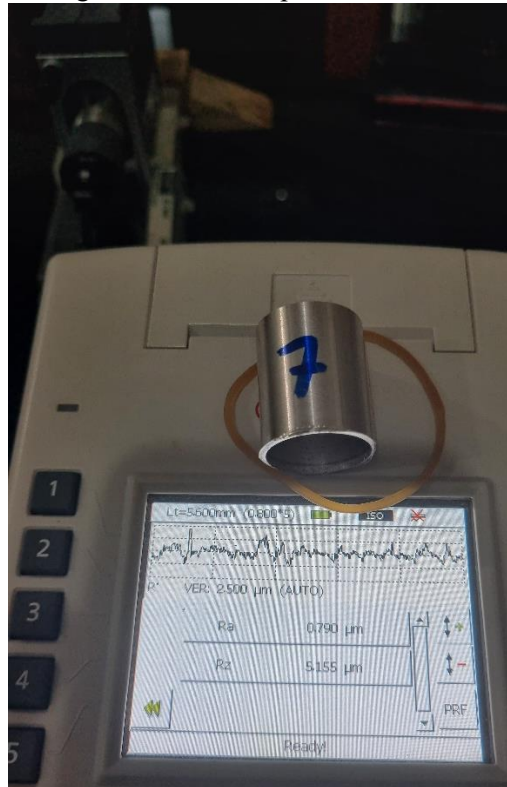


Gambar 2 Pengerjaan dengan GSK 9800TDi

Tahap keempat adalah pengambilan data kekasaran permukaan hasil pembubutan. Pengujian dilakukan menggunakan alat Mahr Marsurf M300 dengan ketelitian $0,076 \mu\text{m}$. Setiap sampel diukur pada tiga titik sepanjang lintasan potong dengan panjang evaluasi 4 mm, kemudian dihitung rata-ratanya sebagai nilai kekasaran permukaan (R_a). Arah pengukuran *probe* dijaga sejajar dengan arah gerak pahat ditunjukkan pada gambar 3.

Tahap kelima adalah pengolahan data menggunakan pendekatan statistik *Ordinary Least Squares* (OLS). Analisis dilakukan dengan perangkat lunak Python melalui pustaka *statsmodels* untuk mendapatkan hubungan matematis antara variabel pemesinan dan kekasaran permukaan. Model regresi OLS digunakan untuk mengestimasi koefisien parameter dan menentukan pengaruh linear maupun kuadratik dari setiap variabel. Nilai *t-statistic* dan *p-value* digunakan untuk menilai signifikansi pengaruh masing-masing parameter, sedangkan nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Adjusted R²* digunakan untuk menilai kesesuaian model dengan data eksperimen.

Tahap terakhir adalah analisis hasil untuk menentukan parameter yang paling dominan terhadap kekasaran permukaan. Nilai koefisien hasil regresi divisualisasikan menggunakan *lollipop* plot untuk menunjukkan besar dan arah pengaruh setiap variabel terhadap Ra. Parameter dengan nilai *p-value* < 0,05 dianggap berpengaruh signifikan, sedangkan tanda koefisien positif atau negatif menunjukkan arah pengaruh terhadap nilai kekasaran permukaan. Hasil analisis ini digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai kombinasi parameter yang menghasilkan permukaan terbaik sekaligus memvalidasi efektivitas metode OLS dalam menganalisis data eksperimental berbasis desain CCD.



Gambar 3 Pengujian Kekasaran Permukaan

III. HASIL PENELITIAN

Penelitian ini menghasilkan data kekasaran permukaan (Ra) pada material Aluminium 6061 hasil proses pembubutan menggunakan mesin CNC GSK 980TDi berdasarkan kombinasi parameter pemesinan yang ditentukan melalui rancangan *Central Composite Design* (CCD). Empat variabel utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kecepatan potong (*v*), kecepatan pemakanan (*f*), *nose radius* (*r*), dan kecepatan putaran *spindle* (*n*). Total sebanyak 30 sampel benda kerja telah diproses dan diuji untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan rata-rata.

Nilai kekasaran permukaan diperoleh dari pengukuran menggunakan alat Mahr Marsurf M300 pada tiga titik permukaan untuk setiap sampel, dengan hasil rata-rata yang dinyatakan dalam mikrometer (μm). Data hasil eksperimen menunjukkan bahwa nilai Ra yang diperoleh berada pada rentang 0,449 μm hingga 3,906 μm , tergantung pada kombinasi parameter pemesinan. Nilai terendah diperoleh pada kondisi kecepatan potong tinggi dengan *nose radius* besar dan *feed rate* rendah, sedangkan nilai tertinggi terjadi pada kondisi *feed rate* tinggi dengan *nose radius* kecil. Data hasil pengukuran rata-rata untuk kombinasi percobaan ditunjukkan pada Tabel 2. Data lengkap dari seluruh kombinasi parameter selanjutnya digunakan sebagai input dalam analisis regresi *Ordinary Least Squares* (OLS) untuk menentukan parameter yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan.

Hasil estimasi koefisien regresi dan uji signifikansi parameter ditampilkan pada Tabel 3. Parameter dianggap signifikan apabila memiliki nilai $p\text{-value} < 0,05$.

Tabel 2. Data hasil eksperimen kekasaran permukaan (R_a) material Al6061

No	X1	X2	X3	X4	Ra
1	-1	-1	-1	-1	1.104
2	-1	-1	-1	-1	1.102
3	1	1	1	1	1.047
4	1	1	1	1	0.61
5	0	0	0	-1	0.944
6	0	0	0	2	0.827
7	1	-1	-1	-1	0.79
...
30	-2	0	0	1	0.856

IV. PEMBAHASAN

Analisis regresi OLS menghasilkan model hubungan matematis antara parameter pemesinan dan nilai kekasaran permukaan (R_a). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa model memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,932 dan $Adjusted R^2$ sebesar 0,868, yang berarti 93,2% variasi nilai R_a dapat dijelaskan oleh parameter yang diuji. Nilai $F\text{-statistic}$ sebesar 14,60 dengan $p\text{-value} < 0,001$ menunjukkan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan pada tingkat kepercayaan 95%.

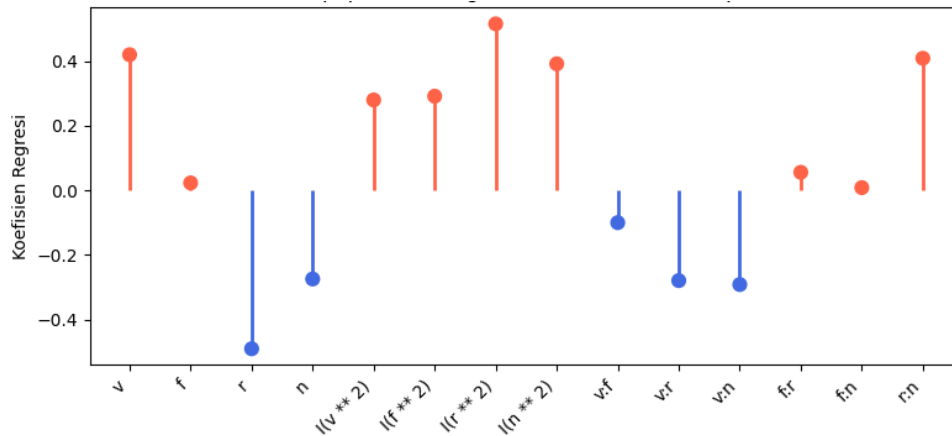
Tabel 3. Hasil estimasi koefisien regresi dan uji signifikansi model OLS

Parameter	Koefisien (β)	t-statistic	p-value	Keterangan
Intercept	-0,2536	-0,783	0,446	Tidak signifikan
v	+0,4201	6,248	0,000	Signifikan
f	+0,0203	0,302	0,768	Tidak signifikan
r	-0,4903	-7,121	0,000	Signifikan
n	+0,2742	4,923	0,000	Signifikan
v^2	+0,2808	3,192	0,005	Signifikan
f^2	+0,2917	3,088	0,007	Signifikan
r^2	+0,5157	6,247	0,000	Signifikan
n^2	+0,3919	4,027	0,001	Signifikan
$v \times f$	-0,0996	-1,268	0,222	Tidak signifikan
$v \times r$	-0,2749	-3,142	0,006	Signifikan
$v \times n$	-0,2793	-3,142	0,008	Signifikan
$f \times r$	+0,0569	0,821	0,424	Tidak signifikan
$f \times n$	+0,0031	0,047	0,964	Tidak signifikan
$r \times n$	+0,4091	7,306	0,000	Signifikan

Berdasarkan hasil tersebut, parameter v (kecepatan potong), r (*nose radius*), dan n (kecepatan *spindle*) memiliki $p\text{-value}$ jauh di bawah 0,05, sehingga secara statistik berpengaruh signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan (R_a). Interaksi antara $r \times n$ juga terbukti signifikan, menunjukkan bahwa kombinasi *nose radius* dan kecepatan *spindle* memengaruhi hasil akhir kualitas permukaan.

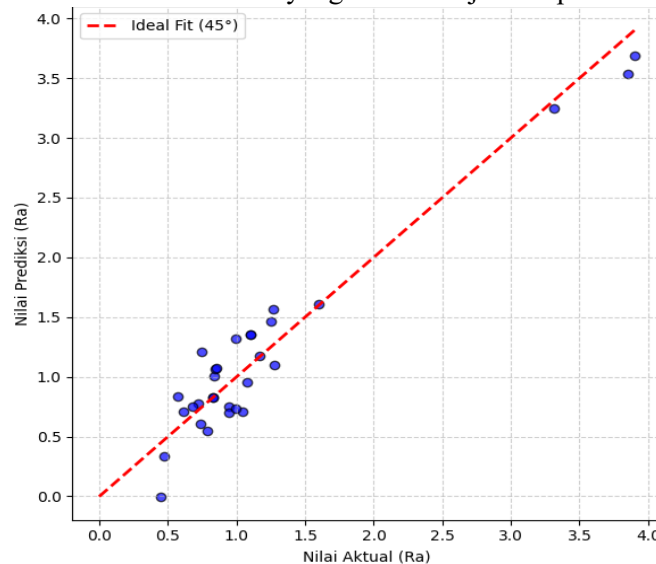
Nilai *Residual Standard Error* (RSE) yang rendah dan distribusi *residual* yang normal menunjukkan bahwa model regresi OLS layak digunakan sebagai representasi hubungan antara parameter pemesinan dan nilai R_a .

Untuk memperjelas hasil pengujian hipotesis dan menunjukkan arah pengaruh parameter terhadap nilai kekasaran permukaan, hasil regresi divisualisasikan dalam bentuk grafik koefisien seperti pada Gambar 4. Parameter dengan nilai koefisien positif menunjukkan peningkatan nilai Ra, sedangkan koefisien negatif menunjukkan penurunan kekasaran permukaan.



Gambar 4. Plot koefisien model OLS terhadap parameter pemesinan

Selain itu, validitas model ditunjukkan melalui perbandingan antara nilai kekasaran permukaan hasil prediksi model dengan nilai aktual hasil eksperimen. Sebagian besar titik data berada di sekitar garis diagonal, yang menandakan kesesuaian model yang baik ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan nilai Ra hasil prediksi model dengan nilai Ra aktual

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Singh dan Rao (2007) yang menyatakan bahwa *feed rate* dan *nose radius* merupakan faktor dominan dalam menentukan kekasaran permukaan hasil pembubutan. Firdaus dan Susanti (2021) juga melaporkan bahwa peningkatan *nose radius* secara signifikan menurunkan nilai Ra pada material aluminium, karena peningkatan luas kontak pahat terhadap benda kerja mengurangi getaran mikro. Sementara itu, Do Duc et al. (2020) dan Mohruni et al. (2018) menunjukkan bahwa interaksi antara *feed rate* dan *cutting speed* memberikan pengaruh yang signifikan, namun hasil penelitian ini menegaskan bahwa pada material Al6061, pengaruh *spindle speed* lebih dominan dibandingkan *feed rate* dalam menentukan kekasaran akhir.

Perbedaan hasil ini dapat dijelaskan dari sifat termal material aluminium yang memiliki konduktivitas panas tinggi, sehingga perubahan kecepatan pemotongan memiliki pengaruh lebih besar terhadap

peningkatan temperatur dan pembentukan zona geser pada permukaan benda kerja. Oleh karena itu, kendali parameter *spindle speed* dan pemilihan *nose radius* yang tepat menjadi faktor kunci dalam menjaga kualitas permukaan pembubutan CNC berbasis aluminium.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting bagi proses optimasi parameter pembubutan CNC di lingkungan industri kecil-menengah. Pendekatan *Ordinary Least Squares* (OLS) terbukti dapat digunakan sebagai metode *data-driven* sederhana untuk menentukan parameter dominan. Dengan mengacu pada model ini, operator mesin dapat memperkirakan kualitas permukaan hanya berdasarkan kombinasi empat parameter pemesinan utama.

Kondisi pemotongan yang direkomendasikan untuk menghasilkan permukaan dengan kekasaran rendah pada material Al6061 adalah kecepatan potong tinggi ($v > 250$ m/min), *feed rate* rendah ($f < 0,10$ mm/rev), *nose radius* besar ($r \geq 0,8$ mm), dan kecepatan putaran *spindle* sedang hingga tinggi ($n = 1200$ – 1400 rpm). Kondisi tersebut menghasilkan nilai Ra di bawah $1 \mu\text{m}$ yang memenuhi standar kualitas permukaan pada industri manufaktur presisi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa parameter yang paling berpengaruh terhadap kekasaran permukaan adalah *nose radius* (r) dan kecepatan putaran *spindle* (n). Peningkatan *nose radius* terbukti menurunkan nilai kekasaran permukaan karena memperluas area kontak pahat dan menurunkan tekanan spesifik pemotongan. Sebaliknya, peningkatan kecepatan putaran *spindle* cenderung meningkatkan nilai Ra akibat naiknya temperatur pemotongan dan kemungkinan terbentuknya *built-up edge* pada ujung pahat. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa interaksi antara $r \times n$ memberikan pengaruh signifikan, yang mengindikasikan bahwa pemilihan kombinasi kedua parameter tersebut perlu diperhatikan secara bersamaan untuk memperoleh hasil permukaan terbaik.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh operator mesin dan praktisi manufaktur di lingkungan industri kecil-menengah (IKM) maupun lembaga pendidikan vokasi sebagai acuan dalam menentukan kombinasi parameter pemesinan yang efisien untuk material aluminium. Kondisi pemotongan yang direkomendasikan untuk menghasilkan permukaan dengan kekasaran rendah adalah kecepatan potong tinggi ($v > 250$ m/min), kecepatan pemakanan rendah ($f < 0,10$ mm/rev), *nose radius* besar ($r \geq 0,8$ mm), dan kecepatan putaran *spindle* sedang hingga tinggi ($n = 1200$ – 1400 rpm).

Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk memperluas kajian dengan membandingkan hasil model OLS dengan pendekatan lain seperti *Ridge Regression*, *Lasso Regression*, atau *Response Surface Methodology* (RSM) untuk memperoleh model prediksi yang lebih komprehensif. Selain itu, pengujian dapat diperluas pada material lain dan dengan mempertimbangkan efek penggunaan coolant atau variasi jenis pahat untuk mengkaji lebih dalam interaksi antara parameter termal dan mekanis pada proses pembubutan CNC. Dengan demikian, hasil penelitian lanjutan diharapkan dapat memberikan kontribusi lebih luas dalam pengembangan sistem optimasi berbasis data (*data-driven optimization*) pada proses manufaktur modern.

VI. REFERENSI

- Abellán-nebot, J. V., Pastor, C. V., & Siller, H. R. (2024). A Review of the Factors Influencing Surface Roughness in Machining and Their Impact on Sustainability. *Sustainability*, *16*, 1–31.
- Danh, B. T., & Cuong, N. Van. (2023). Surface Roughness Modeling of Hard Turning 080A67 Steel. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *13*(3), 10659–10663.
- Dashti, M., & Albannai, A. (2020). A Review on Surface Roughness (Ra) Ranges for Some Finishing

- Processes. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 11(4), 623–629.
- Dinesh, S., Godwin, A. A., Rajaguru, K., & Vijayan, V. (2016). Investigation and Prediction of Material Removal Rate and Surface Roughness in CNC Turning of EN24 Alloy Steel. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 6(8), 849–863. <https://doi.org/10.5958/2249-7315.2016.00547.4>
- Do Duc, T., Nguyen Ba, N., Nguyen Van, C., Nguyen Nhu, T., & Hoang Tien, D. (2020). Surface roughness prediction in cnc hole turning of 3x13 steel using support vector machine algorithm. *Tribology in Industry*, 42(4), 597–607. <https://doi.org/10.24874/ti.940.08.20.11>
- Doniavi, A., Eskandarzade, M., & Tahmasebian, M. (2007). Empirical Modeling of Surface Roughness in Turning Process of 1060 Steel Using Factorial Design Methodology. *Journal of Applied Sciences*, 7(17), 2509–2513. <https://doi.org/10.3923/jas.2007.2509.2513>
- El-Axir, M. H., Elkhabeery, M. M., & Okasha, M. M. (2017). Modeling and Parameter Optimization for Surface Roughness and Residual Stress in Dry Turning Process. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(5), 2047–2055. <https://doi.org/10.48084/etasr.1560>
- Firdaus, F. N., & Susanti, N. A. (2021). Pengaruh Kecepatan Putar dan Penyayatan Endmill Cutter Type HSS terhadap tingkat Kekasaran Alumunium pada Mesin CNC. *JPTM*, 10(02), 103–110.
- Firmansyah, H. I., Pranoto, B., Wicaksono, H., & Fakhruddin, M. (2021). Surface Roughness and Fiber Angular Orientation Analysis Toward Laminated Composite Crack Propagation. *Mekanika : Majalah Ilmiah Mekanika*, 20(March), 44–57.
- Kulshreshtha, M. (2013). Analysis of the Effect of Machining Parameters on Surface Roughness of EN 36 Nickel Steel. *International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST)*, 2(8), 1–7. <https://doi.org/10.15693/ijaist/2013.v2i8.9-15>
- Kurnia, G., Tauviqirrahman, M., Kurdi, O., & Setyana, B. (2023). Analysis of the effect of surface roughness on journal bearing performance considering cavitation. *Borobudur International Symposium on Science and Technology*, 020041, 020041-1-020041–020046.
- Lai, Y., Lin, W., & Lin, Y. (2024). Development of Surface Roughness Prediction and Monitoring System in Milling Process. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(1), 12797–12805.
- Mohruni, A. S., Yanis, M., & Kurniawan, E. (2018). Development of Surface Roughness Prediction Model for Hard Turning on AISI D2 Steel Using Cubic Boron Nitride Insert. *Jurnal Teknologi*, 80(1), 173–178. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.10492>
- Putra, I. E., & Adil, R. (2020). Pengaruh Kecepatan Asutan dan Kedalaman Potong Terhadap Kekasaran Permukaan Aluminium pada Bubut CNC TU-2A. *Momentum*, 18(1), 1–8.
- Ruzova, T. A., & Haddadi, B. (2025). Surface roughness and its measurement methods - Analytical review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 19(November 2024), 100441. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100441>
- Setyono, G., Riyadi, S., Muharom, Riyanto, O. A. W., & Pratama, S. (2022). Effect of Cutting Parameter Toward The Surface Roughness Applied In Turning Tool Steel Material. *Infotekmesin*, 13(2), 233–238. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v13i2.1533>
- Singh, D., & Rao, P. V. (2007). A Surface Roughness Prediction Model for Hard Turning Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 1115–1124. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0429-2>
- Sukkam, C. (2024). A Surface Roughness Prediction Model for SKT4 Steel Milling. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 15499–15504.
- Suparno, J., Wijaya, A. B., Halim, D. A., & Ramadhan, A. R. (2024). Hose and Dust Collector Bracket Design with 3D Printer Material PETG Filament for CNC Router. *Vokasi Mekanika (Vomek)*, 6(3), 341–347.
- Taraman, K., & Lambert, B. (1974). A Surface Roughness Model for a Turning Operation. *International Journal of Production Research*, 12(6), 691–703. <https://doi.org/10.1080/00207547408919586>
- Trinh, V. (2025). Minimum Surface Roughness Prediction of Grinding SKD11 Steel with the Response Surface Methodology. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(2), 21469–21474.