
Analisis Kualitas Permukaan Benda Kerja Al-6061 Hasil Pemesinan dengan Mesin CNC Milling

Bukhari Kasim^{*1}, Azwar Yunus², Hamdani³, Amalia Harmin⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe; Lhokseumawe, Indonesia

⁴ Jurusan Teknik Mesin UNSAM; Langsa, Indonesia

Email: *1bukhari@pln.ac.id, 2azwar@pln.ac.id, 3hamdani@pln.ac.id, 4amaliaharmin@pln.ac.id

Abstrak

Kualitas permukaan merupakan variabel penting dalam proses pemesinan milling. Oleh karena itu, pemilihan parameter pemesinan terbaik sangat penting untuk diatur agar dapat diperoleh kualitas permukaan terbaik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan parameter pemesinan dengan menggunakan kekasaran permukaan sebagai variabel indikator kinerja. Penelitian ini dilakukan dengan membuat 9 buah benda uji kekasaran permukaan melalui proses penghadapan pada mesin milling CNC TU-3A. Setiap benda uji dibuat dengan tingkat parameter pemesinan yang berbeda-beda. Parameter pemesinan yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan spindle, feed rate, dan kedalaman potong. Nilai kekasaran permukaan yang diperoleh dari 9 benda uji dianalisis menggunakan metode taguchi, signal to noise ratio, dan ANOVA. Pendekatan Taguchi juga digunakan untuk memprediksi konfigurasi parameter pemesinan terbaik. Hasil analisis Signal-to-Noise ratio menunjukkan bahwa kualitas permukaan dipengaruhi oleh kecepatan spindle, kedalaman potong, dan laju pengumpanan. Hasil pengukuran pada 9 benda uji menunjukkan nilai kekasaran terbaik yaitu $0,275\mu\text{m}$. Sedangkan hasil analisa taguchi menunjukkan nilai kekasaran permukaan optimal dapat diperoleh pada kondisi pemesinan $0,267\mu\text{m}$ dengan parameter kecepatan spindle 1100 rpm, feed rate 85 mm/menit dan kedalaman potong 0,25 mm. Selanjutnya analisis varians (ANOVA) menghasilkan nilai kontribusi kecepatan spindle, laju pemakanan dan kedalaman potong terhadap nilai kekasaran permukaan masing-masing sebesar 51,80%, 36,88% dan 10,72%.

Kata kunci—kekasaran permukaan, CNC milling, spindle speed, feeding, depth of cut

Abstract

Surface quality is an important variable of a milling machining process. Therefore, choosing the best machining parameters is very important to arrange so that the best surface quality can be obtained. The purpose of this research is to optimize machining parameters by using surface roughness as a performance indicator variable. This research was carried out by making 9 surface roughness test specimens through a facing process on a TU-3A CNC milling machine. Each test specimen is made with a different level of machining parameters. Machining parameters used in this research are spindle speed, feed rate, and depth of cut. Surface roughness values obtained from 9 test specimens were analyzed using the taguchi method, Signal-to-Noise ratio, and ANOVA. The Taguchi approach is also used to predict the best machining parameter configurations. The results of the Signal-to-Noise ratio analysis show that the surface quality is affected by spindle speed, depth of cut and feed rate, respectively. The results of measurements on 9 test specimens showed the best roughness values were $0.275\mu\text{m}$. While the results of the taguchi analysis show that the optimal surface roughness value can be obtained at $0.267\mu\text{m}$ for machining conditions with the parameters spindle speed 1100 rpm, feed rate 85 mm/min and depth of cut 0.25 mm. Furthermore, analysis of variance (ANOVA)

yielded contribution values from spindle speed, feed rate and depth of cut to the surface roughness values of 51.80%, 36.88% and 10.72%, respectively.

Keywords— *surface roughness, CNC milling, spindle speed, feeding, depth of cut*

1. PENDAHULUAN

Saat ini mesin CNC banyak digunakan dalam industri manufaktur. Mesin CNC biasanya digunakan dalam berbagai keperluan untuk memproduksi suatu produk. Keunggulan dari mesin CNC sendiri adalah kemudahan pengoperasian dan pemrograman sesuai kebutuhan. Spesimen yang detail dan rumit dapat dengan mudah dilakukan pada mesin CNC hanya dengan menggunakan fasilitas pemrograman NC yang terdapat pada semua mesin CNC. Mesin CNC juga dapat digunakan untuk menghasilkan produk massal dengan kualitas yang sama persis dan dapat dilakukan secara efisien[1].

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia yang sangat beragam, maka industri manufaktur di Indonesia pun semakin berkembang, salah satunya adalah industri proses pemesinan. Proses pemesinan merupakan istilah umum yang digunakan untuk menggambarkan sekelompok proses yang terdiri dari penghilangan material dan modifikasi permukaan spesimen dengan berbagai macam metode pengolahan[2]. Tujuan utama industri manufaktur ini adalah menghasilkan produk berkualitas tinggi dalam waktu singkat dengan biaya produksi rendah. Untuk meningkatkan kualitas produk mesin dan mengurangi biaya mesin, perlu dilakukan pemilihan parameter pemesinan yang optimal [3].

Kualitas hasil proses pemesinan yang baik dapat dilihat, salah satunya adalah tingkat kekasaran permukaan material yang dihasilkan dari proses pemesinan tersebut. Kekasaran permukaan suatu komponen mekanis dapat mempengaruhi kinerja terkait aspek fungsional produk[4]. Beberapa komponen memerlukan tingkat kehalusan permukaan yang tinggi untuk mencegah terjadinya gesekan antar komponen, misalnya pada komponen mekanis elemen mesin memerlukan kehalusan yang tinggi untuk mencegah terjadinya gesekan antar komponen mesin, hal ini sangat penting karena akan mempengaruhi kinerja mesin.

Pemesinan setiap komponen mekanis dapat dilakukan dengan menggunakan teknik yang berbeda-beda dengan hasil yang tidak jauh berbeda, namun setiap teknik tidak mempunyai efisiensi yang sama[5]. Pemilihan teknik pengolahan tergantung pada tujuan yang ingin dicapai. Berdasarkan tujuan pemesinan, terdapat kombinasi parameter yang berbeda, seperti spindle speed, feed rate, dan depth-of-cut untuk memperoleh hasil kualitas permukaan yang berbeda. Ketiga parameter ini berkontribusi terhadap kualitas permukaan produk yang dihasilkan dari proses pemesinan. Besarnya kontribusi masing-masing parameter tersebut tidaklah sama. Untuk mengetahui besarnya kontribusi masing-masing parameter tersebut, maka perlu dilakukan penelitian. Pada penelitian ini parameter pemesinan seperti spindle speed, feed rate dan depth-of-cut akan dianalisis untuk melihat pengaruhnya terhadap kualitas permukaan produk yang dihasilkan.

Kontribusi parameter pemesinan terhadap proses pemesinan paduan aluminium masing-masing adalah spindle speed, feed rate, dan depth-of-cut. Penelitian dilakukan dengan menggunakan alat potong HSS End Mill dengan 2 ujung potong dan tanpa menggunakan cairan pendingin. Metode Taguchi yang dikombinasikan dengan desain eksperimental diterapkan untuk mendapatkan karakteristik respon tingkat kekasaran permukaan yang optimal [6]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi pemesinan material aluminium alloy Al6061 yang optimum sehingga diperoleh tingkat kekasaran permukaan yang optimum pada Al6061 untuk proses milling dengan HSS End Mill.

2. METODE PENELITIAN

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif kuantitatif. Pendekatan metode Taguchi digunakan untuk mengkaji data yang diperoleh dari hasil uji kekasaran permukaan, dimana hasilnya berupa data kuantitatif. Analisis desain Taguchi dipilih dengan syarat semakin kecil semakin baik. Benda uji pada penelitian ini berjumlah 9 buah. Setiap benda uji dibuat melalui proses pemesinan dengan tingkat spindle speed, feed rate dan depth-of-cut yang berbeda-beda. Nilai kekasaran yang digunakan merupakan rata-rata dari tiga kali pengukuran untuk setiap benda uji.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium Al-6061. Aluminium 6061 merupakan paduan penguatan presipitasi yang menggabungkan magnesium dan silikon sebagai elemen paduan utamanya. Komposisi nominal aluminium tipe 6061 adalah 97,9% Al, 0,6% Si, 1,0% Mg, 0,2% Cr dan 0,28% Cu. Massa jenis paduan aluminium 6061 adalah 2,7 g/cm³ (0,0975 lb/in³). Material ini mempunyai sifat mekanik yang baik, ringan, tahan lama dan mempunyai tingkat ketahanan korosi yang tinggi. Rincian sifat mekanik bahan tersebut ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Sifat mekanik Aluminium alloy Al-6061

Mechanical Properties	Metric	English
Ultimate Tensile Strength	310 Mpa	45000 psi
Tensile Yield Strength	276 Mpa	40000 psi
Shear Strength	207 Mpa	30000 psi
Fatigue Strength	96.5 Mpa	14000 psi
Modulus of Elasticity	68.9 Mpa	10000 psi
Shear Modulus	26 Gpa	3770 ksi

Sembilan spesimen paduan aluminium Al-6061 digunakan dalam penelitian ini. Setiap spesimen akan dikerjakan untuk proses faceting menggunakan mesin milling CNC TU-3A dengan parameter pemesinan yang berbeda-beda untuk setiap spesimen. Alat potong yang digunakan pada penelitian ini adalah HSS End Mill dengan diameter 10mm dan 2 buah mata potong.

Mesin yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis CNC Milling TU-3A. Mesin CNC TU-3A diproduksi oleh EMCO Industrial Training – EMCO MAIER GmbH pada tahun 1982. Saat ini, mesin CNC TU-3A telah mengalami proses pergantian dari pengontrol EMCO tipe pengontrol Mach-3 seperti terlihat pada gambar 1. Mesin CNC TU-3A 3A digunakan untuk melakukan proses pelapisan material Al6061 yang hasilnya nantinya akan diukur nilai kekasaran permukaannya.



Gambar 1. CNC TU-3A Milling Machine

Pengukuran/pengujian kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat uji kekasaran permukaan mitutoyo tipe SJ-310 seperti terlihat pada Gambar 2. Setiap variasi

percobaan dilakukan dengan mengukur kekasaran permukaan sebanyak tiga kali ulangan untuk meminimalisir parameter gangguan yang mungkin terjadi selama pemesinan. proses. Jarak antara garis pengukuran pertama dengan garis pengukuran berikutnya adalah 10mm dengan titik uji kedua berada pada garis tengah benda uji. Goresan setiap pengukuran adalah 8mm.



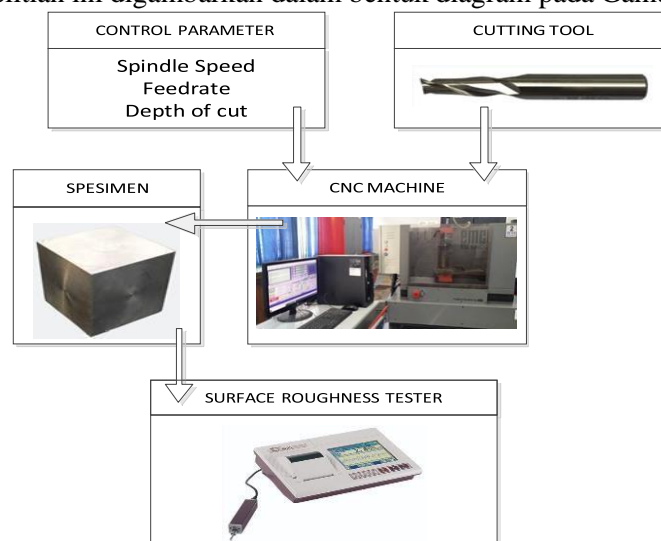
Gambar 2. Surface roughness tester

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel yang terdapat pada mesin milling CNC yang kemudian digunakan untuk melihat pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan suatu benda. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi variabel yang akan diamati yaitu spindle speed, laju pemakanan dan depth-of-cut. Kemudian variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Dalam penelitian ini variabel terikat yang diteliti adalah kekasaran permukaan. Dengan menggunakan referensi katalog kondisi pemotongan rekomendasi, nilai level parameter dirancang seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Level parameter pemesinan

Parameter Pemesinan	Level Parameter		
	1	2	3
<i>Spindle Speed (rpm)</i>	600	900	1100
<i>Feed rate (mm/min)</i>	55	70	85
<i>Depth of Cut (mm)</i>	0.25	0.50	0.75

Langkah kerja penelitian ini digambarkan dalam bentuk diagram pada Gambar 3.



Gambar 3. Research flow

Desain penelitian dilakukan dengan menyediakan tiga parameter uji dengan tiga taraf yang berbeda untuk setiap pengujian. Rancangan pengujian ditunjukkan pada Tabel 3. Metode pengujian yang digunakan adalah rancangan faktorial dengan 3 level dan 3 faktor, sehingga jumlah variasi percobaan sebanyak 33 atau 9 variasi percobaan. Desain percobaan ditentukan dengan menggunakan metode Taguchi (Ortogonal Array L9) [7].

Tabel 3. Rancangan Parameter Pemesinan

Experimen Spesimen	Spindel Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)
Spesimen-1	600	55	0.25
Spesimen-2	600	70	0.50
Spesimen-3	600	85	0.75
Spesimen-4	900	55	0.50
Spesimen-5	900	70	0.75
Spesimen-6	900	85	0.25
Spesimen-7	1100	55	0.75
Spesimen-8	1100	70	0.25
Spesimen-9	1100	85	0.50

Karakteristik kualitas respon yang digunakan pada percobaan ini adalah semakin kecil semakin baik untuk respon kekasaran permukaan. Perhitungan nilai Signal-to-Noise ratio untuk respon kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat komputasi statistik. Signal-to-Noise ratio untuk karakteristik ini dihitung menggunakan rumus pada persamaan 1[8].

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

dimana:

η = Signal-to-Noise ratio

N = Jumlah sample

y_i = Data pengamatan

Perhitungan Signal-to-Noise ratio dilakukan untuk menganalisis pengaruh parameter pemesinan agar lebih akurat. Hasil percobaan dianalisis secara analitis dan grafis. Analisis varians ANOVA kemudian dilakukan untuk mengetahui persentase kontribusi seluruh parameter pada setiap respon individu. Kedua metode analisis di atas sangat penting untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh signifikan terhadap tingkat kekasaran permukaan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemesinan benda uji kekasaran permukaan dilakukan menggunakan mesin CNC Milling TU-3A dengan parameter pemesinan mengacu pada desain penelitian sesuai Tabel 3. Nilai kekasaran permukaan masing-masing benda uji yang ditunjukkan pada Tabel 4 merupakan rata-rata nilai kekasaran permukaan hasil dari tiga kali pengukuran untuk setiap spesimen uji.

Tabel 4. Nilai kekasaran permukaan spesimen uji

Nomor Spesimen	Spindle Speed	Feedrate	Depth of Cut	Ra(μm)
Spesimen-1	600	55	0.25	0.484
Spesimen-2	600	70	0.50	0.506
Spesimen-3	600	85	0.75	0.537
Spesimen-4	900	55	0.50	0.418

Nomor Spesimen	Spindle Speed	Feedrate	Depth of Cut	Ra(μm)
Spesimen-5	900	70	0.75	0.442
Spesimen-6	900	85	0.25	0.298
Spesimen-7	1100	55	0.75	0.476
Spesimen-8	1100	70	0.25	0.275
Spesimen-9	1100	85	0.50	0.337

Ra = surface roughness

Analisis Signal-to-Noise ratio kemudian dilakukan dengan menggunakan metode Tabel respons rasio sinyal terhadap kebisingan digunakan untuk menganalisis dampak setiap parameter pemesinan (spindel speed, laju umpan, dan depth-of-cut) terhadap kekasaran permukaan. Tabel 4 menunjukkan respon Signal-to-Noise ratio terhadap kekasaran permukaan. Tabel ini menunjukkan Signal-to-Noise ratio pada setiap level parameter pemesinan dan bagaimana perubahannya ketika nilai parameter pemesinan diubah dari satu level ke level lainnya.

Tabel 5. Hubungan kekasaran permukaan dengan Signal-to-Noise ratio

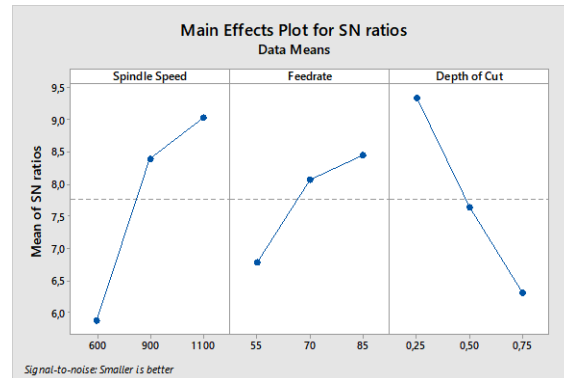
Nomor Spesimen	Ra(μm)	SNRA1
Spesimen-1	0.484	6.3031
Spesimen-2	0.506	5.9170
Spesimen-3	0.537	5.4005
Spesimen-4	0.418	7.5765
Spesimen-5	0.442	7.0916
Spesimen-6	0.298	10.5157
Spesimen-7	0.476	6.4479
Spesimen-8	0.275	11.2133
Spesimen-9	0.337	9.4474

Grafik respons Signal-to-Noise ratio menunjukkan dampak setiap parameter pemesinan dengan lebih jelas. Gambar 6 menampilkan grafik respon untuk setiap parameter pemesinan. Kemiringan garis yang menghubungkan level menunjukkan kekuatan pengaruh setiap parameter pemesinan. Besarnya Signal-to-Noise ratio pada setiap kondisi penelitian diperoleh melalui analisis menggunakan metode Taguchi (Orthogonal Array L9). Selain itu Signal-to-Noise ratio setiap kondisi desain juga dihitung. Hasil analisis setiap percobaan disajikan pada tabel 5. Nilai delta yang merupakan selisih sinyal tertinggi dan terendah terhadap nilai noise pada semua level yang berbeda juga ditampilkan. Besarnya nilai rank setiap parameter faktor bergantung pada besarnya nilai delta masing-masing faktor seperti terlihat pada tabel 6.

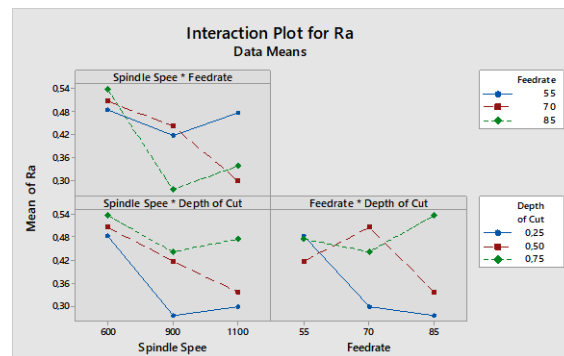
Tabel 6. Response Signal-to-Noise ratio: Smaller is better

Level	Spindle Speed	Feed rate	Depth-of-Cut
1	5,874	6,776	9,344
2	8,395	8,074	7,647
3	9,036	8,455	6,313
Delta	3,163	1,679	3,031
Rank	1	3	2

Grafik pengaruh utama pada Signal-to-Noise ratio dengan jelas menunjukkan tren respon setiap parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan dengan karakteristik semakinkecil semakin baik. Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar 5 menunjukkan interaksi seluruh parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan.



Gambar 4. Grafik efek utama untuk *Signal-to-Noise ratio*



Gambar 5. Grafik interaksi parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan

Analisis varians (ANOVA) dilakukan untuk mengetahui kontribusi setiap parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan material Aluminium Al6061 hasil proses milling. Analisis dilakukan dengan nilai *confidence level* 95% dan nilai *significance level* 0,05. Hasil analisis ANOVA terhadap kekasaran permukaan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 7. ANOVA Kekasaran permukaan

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<i>Spindle Speed</i>	2	0,0371	51,80%	0,0371	0,0185	86,07	0,011
<i>Feed rate</i>	2	0,0077	10,72%	0,0077	0,0036	17,81	0,053
<i>Depth of Cut</i>	2	0,0264	36,88%	0,0264	0,0132	61,28	0,016
<i>Error</i>	2	0,0004	0,60%	0,0004	0,0002		
Total	8	0,0716	100,00%				

Akhirnya diturunkan model matematis untuk kriteria kekasaran permukaan optimum pada proses milling Aluminium Al6061. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan parameter-parameter yang berperan terhadap kekasaran permukaan yaitu spindle speed, feed rate, dan depth of cut dengan notasi v , f , dan t berturut-turut, serta dengan bantuan hasil uji kekasaran permukaan material Al6061. Tabel Anova untuk regresi linier ditunjukkan pada tabel 8.

Tabel 8. Regresi Linear ANOVA

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.7157	0.0762	9.39	0.000
Spindle Speed	-0.00029	0.000049	-5.93	0.002
Feedrate	-0.00254	0.000821	-3.09	0.027
Depth of Cut	0.2656	0.0492	5.39	0.003

Merujuk pada Tabel 6, parameter pemesinan dengan nilai delta tertinggi adalah yang paling efektif dan berpengaruh signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan benda uji hasil proses pemesinan milling. Berdasarkan urutannya terlihat bahwa spindle speed merupakan parameter pemesinan terpenting yang mempunyai pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan, disusul depth-of-cut dan laju pemakanan.

Hal serupa juga diperoleh dari hasil analisis varians (ANOVA) seperti terlihat pada tabel 7. Spindel speed merupakan parameter pemesinan yang paling besar pengaruhnya terhadap nilai kekasaran permukaan dengan kontribusi sebesar 51,80% diikuti depth-of-cut. dan feed rate dengan kontribusi masing-masing 36,88% dan 10,72%.

Dalam analisis Taguchi, rasio sinyal terhadap kebisingan dirancang untuk memilih nilai faktor tingkat tertinggi untuk mengoptimalkan fitur kualitas permukaan. Kualitas permukaan akan semakin baik ketika nilai kekasaran permukaan semakin kecil, hanya saja nilai Signal-to- Noise ratio dirancang agar selalu berubah ke karakteristik kualitas yang lebih baik ketika nilainya semakin besar.

Level optimum untuk setiap parameter pemesinan diperoleh dengan memisahkan setiap parameter berdasarkan Signal-to-Noise ratio pada berbagai level. Parameter dengan level terbaik ditunjukkan pada tabel 6 dan gambar 7 dimana spindle speed level 3 (1100 rpm), feed rate level 3 (85 mm/menit), dan depth-of-cut level 1 (0,25 mm). Pada kondisi tersebut nilai kekasaran permukaan yang dihasilkan sesuai dengan hasil prediksi metode Taguchi yaitu 0,267 μ m dengan signal to noise rasio sebesar 11,297.

Nilai kekasaran permukaan hasil diprediksi dengan metode Taguchi lebih baik dibandingkan nilai kekasaran permukaan terbaik yang diperoleh dari pengukuran langsung 9 benda uji yaitu 0,275 μ m untuk kondisi pemesinan dengan spindle speed 1100rpm, laju pemakanan 70mm/menit dan kecepatan potong. sebesar 0,25mm.

4. KESIMPULAN

Hubungan antara parameter pemesinan (spindel speed, feed rate, dan depth-of-cut) dengan kekasaran permukaan dievaluasi pada berbagai tingkat menggunakan metode Desain Eksperimen. Hasil analisis Signal-to-Noise ratio menunjukkan bahwa spindle speed merupakan parameter pemesinan yang sangat signifikan yang mempengaruhi kualitas permukaan diikuti oleh depth-of-cut dan feed rate. Kombinasi metode Taguchi dengan desain eksperimen dilakukan untuk memperoleh karakteristik respon yang optimal. Respon optimal untuk kualitas permukaan terbaik didapat pada kondisi spindle speed 1100 rpm (level 3), depth-of-cut 0,25 mm(level 1) dan feed rate 85 mm/min (level 3). Hasil analisis varians (ANOVA) menunjukkan bahwa spindle speed memberikan kontribusi sebesar 51,80%, depth-of-cut 36,88% dan laju pemakanan 10,72% terhadap kualitas permukaan benda kerja.

5. SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik maka disarankan untuk penelitian selanjutnya agar memasukkan parameter media pendingin sebagai variabel bebas penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Unit P3M Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah memberi dukungan financial terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Bukhari, Y. Azwar, I. Yusuf, Darmein, and Mawardi, "Optimization of CNC machining parameters to improve surface roughness quality of the AL6061 material using the Taguchi method," vol. 21, no. 4, pp. 408–413, 2023.
 - [2] S. N. Grigoriev, S. V. Fedorov, and K. Hamdy, "Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cGrigoriev, S. N., Fedorov, S. V., & Hamdy, K. (2019). Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a ,” *Manuf. Rev.*, vol. 6, p. 19, 2019.
 - [3] T. H. Bhuiyan and I. Ahmed, "Optimization of Cutting Parameters in Turning Process,” *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 7, no. 1, pp. 233–239, 2014, doi: 10.4271/2014-01-9097.
 - [4] M. P. Londhe, / Chilwant, and K. N. Mumbai, "Optimization of Cutting Parameters in Milling Operation To Improve Surface Finish of EN 31,” *Int. J. Eng. Sci. Manag. Res.*, vol. 3, no. 9, pp. 1–9, 2016, doi: 10.5281/zenodo.61609.
 - [5] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, and D. Figueiredo, "Optimization of cutting parameters to minimize the surface roughness in the end milling process using the Taguchi method,” *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 30–35, 2017, doi: 10.3311/PPme.9114.
 - [6] S. Sulaiman, M. S. Alajmi, W. Norizawati, and W. Isahak, "Dry Milling Machining : Optimization of Cutting Parameters Affecting Surface Roughness of Aluminum 6061 using the Taguchi Method,” vol. 13, no. September 2021, pp. 58–68, 2022, doi: 10.14716/ijtech.v13i1.4208.
 - [7] D. C. A. S. U. Montgomery, *D esign and Analysis of Experiments Ninth Edition*. 2017. [Online]. Available: www.wiley.com/go/permissions.%0Ahttps://lcn.loc.gov/2017002355
 - [8] J. E. Ribeiro, M. B. César, and H. Lopes, "Optimization of machining parameters to improve the surface quality,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 355–362, 2017, doi: 10.1016/j.prostr.2017.07.182.
-