

The Effect of CNC Milling Process Parameters and the Use of Cooling Media on Surface Roughness, Machining Time and Energy Consumption

Pengaruh Parameter Proses Permesinan CNC Milling dan Penggunaan Media Pendingin terhadap Kekasaran Permukaan, Waktu Pemesinan dan Konsumsi Energi

Dryan Oliver Murdyanto¹⁾, Mulyadi²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email coresponding author: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. *This study aims to analyze the effect of CNC milling process parameters and the use of cooling media on surface roughness, machining time, and energy consumption of aluminum A6061 material with dimensions of 100 mm in length, 40 mm in width, and 30 mm in thickness. The investigated parameters include depth of cut, feed rate, spindle speed, and cooling conditions consisting of dry machining and liquid coolant using Emulcut M49. The research method employs a quantitative approach with a Taguchi experimental design using an L9 Orthogonal Array, which allows the evaluation of three factors (variables), each at three levels, through 9 trials and a total of 27 experiments. The machining process was carried out using a VMC-640 CNC milling machine with a cutting depth of 5 mm, employing a 12 mm diameter HSS end mill with four flutes. Surface roughness was measured using a Mitutoyo SJ-210 surface roughness tester, machining time was measured and recorded using a stopwatch, and energy consumption was determined by measuring the electric current and voltage in each phase (R, S, and T) using a clamp meter. The results indicate that variations in process parameters and cooling conditions have a significant effect on surface quality, machining time efficiency, and energy consumption. The optimal combination of parameters is able to improve process efficiency and support more sustainable machining practices*

Keywords - CNC milling, machining parameters, energy consumption, surface roughness

Abstrak. *Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses pemesinan CNC milling dan penggunaan media pendingin terhadap kekasaran permukaan, waktu pemesinan, dan konsumsi energi pada material aluminium A6061 dengan panjang 100 mm, lebar 40 mm dan tebal 30 mm. Parameter yang diteliti meliputi depth of cut, feed rate, spindle speed, serta kondisi pendinginan berupa dry machining dan pendingin cair menggunakan Emulcut m49. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan eksperimen Taguchi Orthogonal Array L9 yang memungkinkan menguji tiga faktor (variabel) dengan masing-masing tiga level (tingkat) dengan 9 kali percobaan dan 27 percobaan. Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin CNC Milling VMC-640 dengan kedalaman pemotongan 5 mm menggunakan pahat endmill HSS berdiameter 12 mm 4 flute. Kekasaran permukaan diukur menggunakan Mitutoyo SJ210, waktu pemesinan diukur dan dicatat menggunakan Stopwatch, dan konsumsi energi diukur dari besar arus dan tegangan listrik pada setiap fasa (R, S, dan T) menggunakan alat ukur listrik tang ampere. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter proses dan kondisi pendinginan berpengaruh signifikan terhadap kualitas permukaan, efisiensi waktu pemesinan, dan konsumsi energi. Kombinasi parameter optimal mampu meningkatkan efisiensi proses dan mendukung pemesinan yang lebih berkelanjutan*

Kata Kunci - CNC milling, parameter pemesinan, konsumsi energi, kekasaran permukaan

I. PENDAHULUAN

Pada era industri 4.0, efisiensi serta keberlanjutan menjadi aspek fundamental yang semakin diprioritaskan dalam sistem manufaktur modern. Salah satu teknologi yang berkontribusi signifikan dalam mewujudkan tujuan tersebut adalah mesin CNC (*Computer Numerical Control*), khususnya CNC milling, yang mampu menghasilkan proses pemesinan dengan akurasi tinggi, pengendalian kecepatan produksi yang optimal, serta kemampuan membentuk geometri komponen yang kompleks secara fleksibel [1]. Parameter proses seperti *depth of cut*, *feed rate*, dan *spindle speed* merupakan faktor utama dalam operasi pemotongan pada CNC milling. Setiap parameter memiliki pengaruh langsung terhadap kekasaran permukaan (*surface roughness*), waktu pemesinan, dan energi yang dikonsumsi [2]. Pengaturan yang tidak optimal tidak hanya berdampak pada mutu produk, tetapi juga meningkatkan biaya produksi akibat waktu kerja yang lebih lama dan penggunaan energi yang lebih besar [3]. *Depth of cut* memengaruhi volume material yang dipotong dalam satu lintasan, *feed rate* menentukan seberapa cepat pahat bergerak sedangkan *spindle speed* menentukan kecepatan rotasi alat potong [4]. Ketiga parameter ini tidak berdiri sendiri, melainkan saling

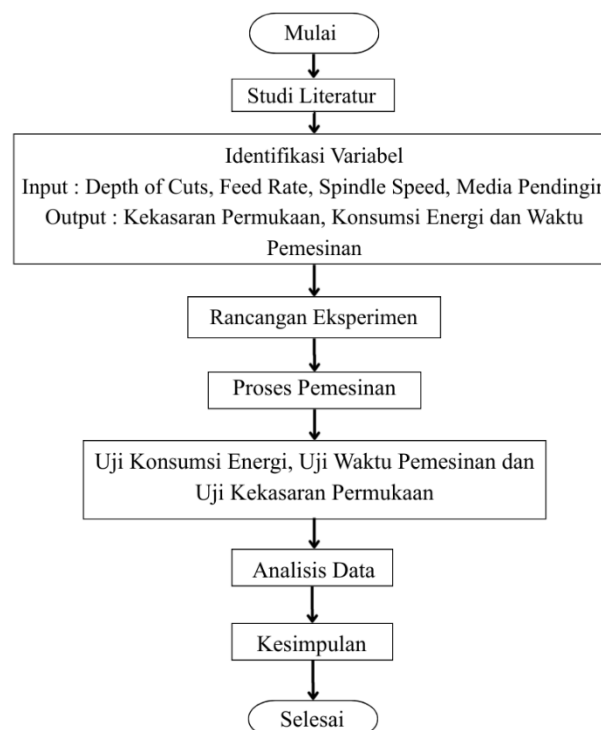
Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

memengaruhi dalam proses pemotongan, sehingga pengaturan yang kurang tepat dapat menyebabkan waktu pemesinan yang lebih lama dan konsumsi energi yang tidak efisien [5]. Parameter-parameter ini berperan penting dalam menentukan kualitas permukaan, waktu pemesinan, dan konsumsi energi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengaturan yang tepat dari parameter ini dapat mengoptimalkan efisiensi proses [6]. penggunaan media pendingin juga menjadi faktor yang tidak kalah penting. Media pendingin berfungsi untuk mengurangi suhu dan gesekan serta memperpanjang umur alat potong selama proses pemesinan, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi kekasaran benda kerja, waktu pemesinan dan konsumsi energi pada mesin CNC Milling [7]. Meskipun banyak penelitian telah dilakukan mengenai pengaruh parameter proses terhadap hasil pemesinan, masih terdapat kesenjangan antara harapan dan kenyataan. Banyak praktisi industri yang masih mengalami kesulitan dalam menentukan kombinasi parameter yang optimal untuk mencapai efisiensi maksimum [8]. Selain itu, penggunaan media pendingin sering kali diabaikan dalam analisis, meskipun dapat memberikan dampak signifikan terhadap performa pemesinan. Hal ini menciptakan tantangan nyata bagi industri untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya operasional [9]. Dalam konteks penelitian ini, terdapat celah yang perlu diisi. Sebagian besar studi sebelumnya lebih fokus pada satu atau dua parameter tanpa mempertimbangkan interaksi antara semua parameter yang relevan, termasuk penggunaan media pendingin[10].

II. METODE

Penelitian ini akan menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk menganalisis pengaruh variasi parameter proses permesinan CNC milling dan penggunaan media pendingin terhadap kekasaran permukaan, waktu pemesinan, dan konsumsi energi listrik. Penelitian ini menggunakan Metode Taguchi Orthogonal Array L9 sebagai pendekatan statistik dalam menyusun desain eksperimen yang efisien namun tetap valid secara ilmiah[11]. Waktu pelaksanaan penelitian meliputi tahap persiapan dan pengambilan data. Objek penelitian ini adalah proses pemesinan CNC milling pada material Aluminium A6061 menggunakan mesin CNC Milling tipe VMC 640. Penelitian difokuskan pada pengaruh parameter pemotongan dan penggunaan media pendingin terhadap kualitas dan efisiensi proses pemesinan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Variabel terikat pada penelitian ini meliputi Uji Konsumsi Energi, Waktu Pemesinan Pada Mesin CNC Milling Dengan Parameter Tertentu dan Uji Kekasaran Permukaan diukur pada titik – titik tertentu. Pembuatan desain spesimen dan variasi parameter penelitian menggunakan *software Mastercam X5*, kemudian dikonversi ke dalam *G-code* dan dijalankan pada mesin CNC milling.

Tabel 1. Parameter Penelitian

Spesimen	Parameter			Pendingin
	<i>Depth of cut</i> (mm)	<i>Feed rate</i> (mm/menit)	<i>Spindle speed</i> (RPM)	
1	0.2	800	1800	<i>Dry</i>
2	0.2	1100	2500	<i>Dry</i>
3	0.2	1800	3000	<i>Coolant</i>
4	0.5	800	1800	<i>Coolant</i>
5	0.5	1100	2500	<i>Dry</i>
6	0.5	1800	3000	<i>Dry</i>
7	0.8	800	1800	<i>Coolant</i>
8	0.8	1100	2500	<i>Coolant</i>
9	0.8	1800	3000	<i>Coolant</i>

Dry machining adalah proses pemesinan seperti *milling*, *turning*, atau *drilling* yang dilakukan tanpa menggunakan cairan pendingin atau pelumas (*coolant*). Selama proses ini, pemotongan material hanya mengandalkan udara sekitar untuk membuang panas dan geram (*chip*). Untuk *Coolant* pada penelitian ini menggunakan Emulcut M49, dimana *coolant* dari seri Emulcut merupakan *coolant* berbasis emulsi yang memberikan *balancing* antara pendinginan dan pelumasan dalam proses pemotongan logam di mesin CNC.

Pengukuran konsumsi energi listrik pada mesin CNC milling tipe VMC 640 dilakukan untuk mengetahui besarnya energi yang digunakan selama proses pemesinan berlangsung. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengukuran Tegangan dan arus listrik menggunakan tang ampere tiga fasa (*three-phase clamp meter*) yang dipasang pada panel suplai listrik mesin CNC Milling.

**Gambar 2.** Uji Konsumsi Energi dan Waktu Pemesinan

Tang ampere tiga fasa digunakan untuk mengukur tegangan dan arus listrik pada masing-masing fasa (R, S, dan T). Pengambilan data arus dan tegangan dilakukan saat mesin CNC menjalankan program pemotongan (*cutting*), khususnya pada proses *milling pocket*[12]. Nilai yang terbaca dicatat dan diambil nilai rata-rata selama waktu pemesinan, Perhitungan daya listrik total mesin CNC dilakukan menggunakan persamaan daya tiga fasa.

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \dots\dots\dots(1)$$

P = Daya Pada Mesin CNC Milling

V = Tegangan Listrik

I = Arus Listrik

$\cos\phi$ = Faktor Daya

Konsumsi energi listrik selama proses pemesinan dihitung dengan mengalikan daya listrik total dengan waktu pemesinan yang telah dicatat dan diukur menggunakan *stopwatch* sehingga diperoleh energi listrik dalam satuan *kilowatt-hour* (kWh).

$$E = P \times t \dots\dots\dots(2)$$

E = Energi Listrik

P = Daya Listrik

t = Waktu Pemesinan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan alat ukur Mitutoyo SJ 210. Pengujian dilakukan pada 3 titik pengukuran di area dasar pocket dengan arah pengukuran sejajar terhadap arah gerak pemakanan pahat. Parameter kekasaran permukaan yang diamati adalah nilai R_a (*Roughness average*). Pengujian kekasaran permukaan dilakukan pada area dasar (*bottom surface*) hasil pemotongan pocket, karena area tersebut secara langsung dipengaruhi oleh gerakan pemakanan pahat endmill selama proses pemesinan. Sebelum pengukuran dilakukan, permukaan benda kerja dibersihkan dari sisa *coolant*, serpihan (*chip*), dan kotoran lain.

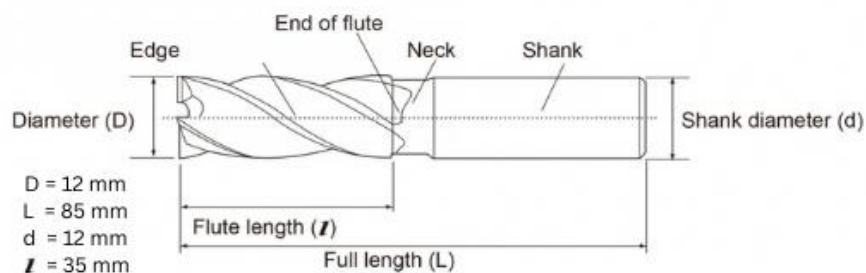


Gambar 3. Uji Kekasaran Permukaan

Pada penelitian ini menggunakan material aluminium 6061 dengan panjang 100 mm, lebar 40 mm, dan tinggi 30 mm, tabel 2 menunjukkan karakteristik material sebagai bahan uji:

Tabel 2. Karakteristik material

Spesimen	Densitas Material	Kekuatan Tarik	Kekerasan
Aluminium 6061	2,7 g/cm ³	290 MPa	95 HB



Gambar 4. Tool Endmill HSS

Tool pemotong yang digunakan dalam proses pemesinan adalah pahat jenis endmill berbahan *High Speed Steel* (HSS) dengan diameter 12 mm dan jumlah mata potong (*flute*) sebanyak 4 buah. Geometri pahat endmill yang digunakan memiliki sudut heliks (*helix angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*) yang memungkinkan proses pemotongan berjalan stabil serta membantu pengeluaran geram selama proses milling. endmill HSS M2A1 memiliki kekerasan dan kekuatan mekanik yang cukup tinggi serta ketangguhan yang baik, sehingga mampu menahan beban potong dan mengurangi risiko keausan maupun kerusakan pahat selama proses CNC milling. Modulus elastisitas yang tinggi memberikan kekakuan yang baik dan membantu menjaga kestabilan pemotongan, sedangkan ketahanan panas hingga sekitar 600 °C menjadikannya sesuai untuk pemesinan dengan kecepatan spindle menengah. Karakteristik mekanik pada tool ini ditunjukkan pada tabel:

Tabel 3. Sifat Mekanik Endmill M2A1

Material Pahat	Kekerasan	Kekuatan Tarik	Kekuatan Tekan	Modulus Elastisitas
HSS M2A1	65 HRC	1900 MPa	3000 MPa	210 GPa

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian konsumsi energi dan waktu pemesinan

Berdasarkan pengujian yang dilakukan menggunakan tang ampere, berikut adalah tabel hasil dari setiap fasa penggunaan konsumsi energi pada mesin cnc milling tipe vmc 640:

Tabel 4. Hasil uji konsumsi energi dan waktu pemesinan

Spesimen	Parameter			Konsumsi energi (kWh)	Waktu (menit)	Pendingin
	<i>Depth of cut</i> (mm)	<i>Feed rate</i> (mm/menit)	<i>Spindle speed</i> (RPM)			
1	0.2	800	1800	0,80	23.25	<i>Dry</i>
2	0.2	1100	2500	0,66	19.23	<i>Dry</i>
3	0.2	1800	3000	0,52	15.15	<i>Coolant</i>
4	0.5	800	1800	0,32	09.33	<i>Coolant</i>
5	0.5	1100	2500	0,26	07.55	<i>Dry</i>
6	0.5	1800	3000	0,21	06.16	<i>Dry</i>
7	0.8	800	1800	0,22	06.45	<i>Coolant</i>
8	0.8	1100	2500	0,18	05.38	<i>Coolant</i>
9	0.8	1800	3000	0,15	04.27	<i>Coolant</i>

Dengan menggunakan hasil data dari Tang ampere, dilakukan perhitungan konsumsi energi menggunakan Persamaan 1 dan 2 sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi$$

$$E = P \times t$$

$$P = \sqrt{3} \times 242,07 \times 5,741 \times 0,85$$

$$P = 2046,01 \text{ W}$$

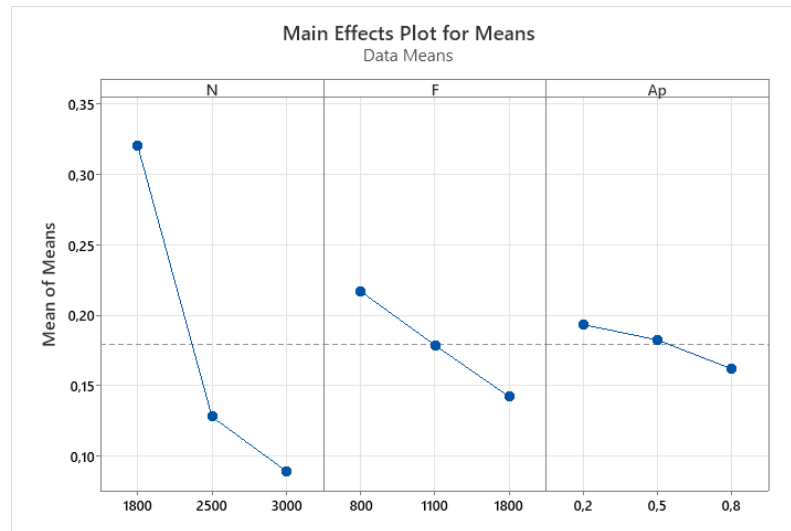
$$P = 2,046 \text{ kW}$$

$$E = 2,046 \text{ kW} \times 0,3875 \text{ Jam}$$

$$E = 0,80 \text{ kWh}$$

Berdasarkan data pada tabel, terlihat bahwa pada *depth of cut* 0,2 mm, peningkatan *feed rate* dan *spindle speed* dari 800 mm/menit dengan 1800 RPM menjadi 1800 mm/menit dengan 3000 RPM menyebabkan penurunan konsumsi energi dari 0,79 kWh menjadi 0,51 kWh serta penurunan waktu pemesinan dari 23,25 menit menjadi 15,15 menit. Pada variasi ini, perbedaan kondisi pendinginan (*dry* dan *coolant*) menunjukkan bahwa penggunaan *coolant*

cenderung menghasilkan konsumsi energi dan waktu pemesinan yang lebih rendah dibandingkan *dry machining* pada parameter yang lebih tinggi. Pada *depth of cut* 0,5 mm, konsumsi energi dan waktu pemesinan kembali menurun seiring dengan peningkatan *feed rate* dan *spindle speed*. Nilai konsumsi energi berkurang dari 0,32 kWh menjadi 0,21 kWh, sementara waktu pemesinan menurun dari 9,33 menit menjadi 6,16 menit. Pada *depth of cut* 0,8 mm, diperoleh nilai konsumsi energi dan waktu pemesinan paling rendah. Pada kombinasi parameter tertinggi (*feed rate* 1800 mm/menit dan *spindle speed* 3000 RPM) dengan pendinginan *coolant*, konsumsi energi tercatat sebesar 0,14 kWh dengan waktu pemesinan 4,27 menit.



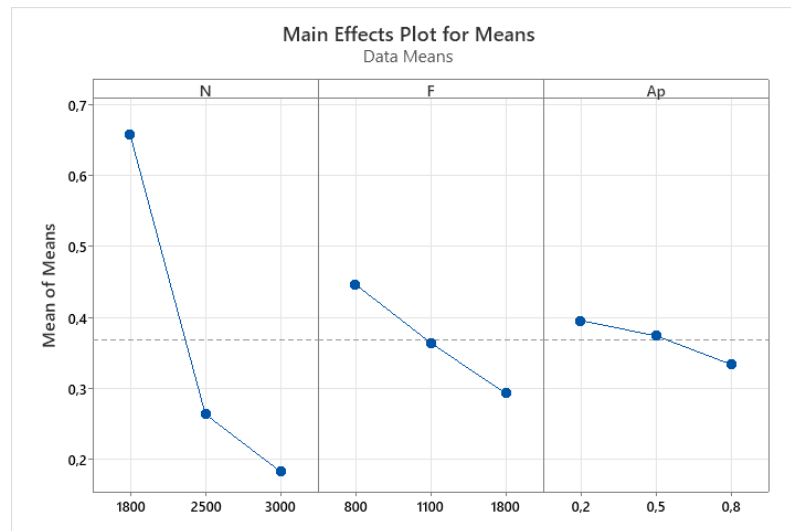
Gambar 5. Grafik uji waktu pemesinan

Grafik *Main Effects Plot* menunjukkan bahwa waktu pemesinan dipengaruhi oleh *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*, dengan pengaruh paling dominan berasal dari *spindle speed*. Peningkatan *spindle speed* dari 1800 ke 3000 rpm menurunkan rata-rata waktu pemesinan secara signifikan dari sekitar 0,32 jam menjadi $\pm 0,09$ jam, sedangkan kenaikan *feed rate* dari 800 ke 1800 mm/menit menurunkan waktu pemesinan dari sekitar 0,22 jam menjadi $\pm 0,14$ jam dengan pengaruh sedang. Sementara itu, peningkatan *depth of cut* dari 0,2 ke 0,8 mm hanya menurunkan waktu pemesinan secara relatif kecil dari sekitar 0,20 jam menjadi $\pm 0,16$ jam, sehingga pengaruhnya paling rendah. Secara keseluruhan, kombinasi *spindle speed* tinggi, *feed rate* tinggi, dan *depth of cut* lebih besar cenderung menghasilkan waktu pemesinan yang lebih singkat dan proses yang lebih efisien.

Tabel 5. Hasil ANOVA Waktu Pemesinan

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	0,091671	89,13%	0,091671	0,045836	71,46	0,014
F	2	0,008386	8,15%	0,008386	0,004193	6,54	0,133
Ap	2	0,001512	1,47%	0,001512	0,000756	1,18	0,459
Error	2	0,001283	1,25%	0,001283	0,000641		
Total	8	0,102852	100,00%				

Berdasarkan Tabel 5 Hasil ANOVA Waktu Pemesinan, faktor *spindle speed* (N) memberikan pengaruh paling dominan dan signifikan terhadap waktu pemesinan, dengan kontribusi sebesar 89,13%, nilai $F = 71,46$, dan $P\text{-value} = 0,014 (< 0,05)$, yang menunjukkan bahwa perubahan kecepatan spindle berpengaruh nyata terhadap penurunan waktu pemesinan. Faktor *feed rate* (F) memiliki kontribusi sebesar 8,15% dengan $P\text{-value} = 0,133 (> 0,05)$ sehingga pengaruhnya tidak signifikan secara statistik, meskipun tetap menunjukkan kecenderungan memengaruhi waktu proses. Sementara itu, *depth of cut* (Ap) hanya menyumbang 1,47% dengan $P\text{-value} = 0,459$, menandakan pengaruhnya paling kecil dan tidak signifikan. Nilai error sebesar 1,25% menunjukkan bahwa variasi data relatif kecil.



Gambar 6. Grafik uji konsumsi energi

Pada faktor *spindle speed* (N) terlihat penurunan konsumsi energi yang sangat signifikan seiring peningkatan kecepatan dari 1800 ke 3000 rpm, dengan nilai rata-rata turun dari sekitar 0,66 menjadi $\pm 0,18$ kWh, yang mengindikasikan bahwa waktu pemesinan yang lebih singkat pada kecepatan tinggi berkontribusi langsung terhadap penurunan energi total. Faktor *feed rate* (F) juga menunjukkan tren menurun, di mana kenaikan *feed rate* dari 800 ke 1800 mm/menit menurunkan konsumsi energi dari sekitar 0,45 menjadi $\pm 0,30$ kWh, meskipun pengaruhnya tidak setajam *spindle speed*. Sementara itu, *depth of cut* (Ap) memperlihatkan penurunan konsumsi energi yang relatif kecil dari sekitar 0,40 kWh pada 0,2 mm menjadi $\pm 0,34$ kWh pada 0,8 mm, sehingga pengaruhnya paling rendah dibandingkan dua parameter lainnya. Secara keseluruhan, grafik ini mengindikasikan bahwa *spindle speed* merupakan faktor paling dominan dalam menurunkan konsumsi energi, diikuti oleh *feed rate*, sedangkan *depth of cut* memberikan pengaruh minor, dengan kombinasi *spindle speed* dan *feed rate* tinggi menghasilkan konsumsi energi yang lebih efisien.

Tabel 6. Hasil ANOVA Konsumsi Energi

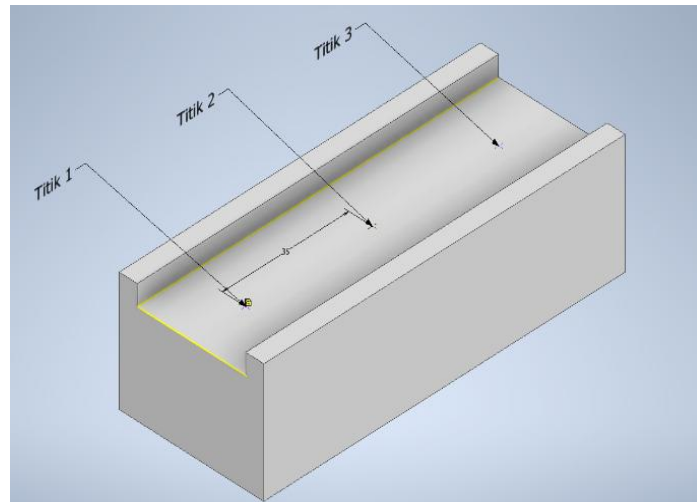
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	0,386348	89,12%	0,386348	0,193174	66,36	0,015
F	2	0,035451	8,18%	0,035451	0,017726	6,09	0,141
Ap	2	0,005872	1,35%	0,005872	0,002936	1,01	0,498
Error	2	0,005822	1,34%	0,005822	0,002911		
Total	8	0,433494	100,00%				

Berdasarkan Tabel 6 Hasil ANOVA Konsumsi Energi, faktor *spindle speed* (N) merupakan variabel yang paling dominan dan berpengaruh signifikan terhadap konsumsi energi, dengan kontribusi sebesar 89,12%, nilai $F = 66,36$, dan $P\text{-value} = 0,015$ ($< 0,05$), yang menunjukkan bahwa variasi kecepatan spindle secara nyata memengaruhi besarnya energi yang dikonsumsi selama proses pemesinan. Faktor *feed rate* (F) memberikan kontribusi sebesar 8,18% dengan $P\text{-value} = 0,141$ ($> 0,05$), sehingga secara statistik belum menunjukkan pengaruh signifikan, meskipun masih berperan dalam perubahan konsumsi energi. Sementara itu, *depth of cut* (Ap) hanya menyumbang 1,35% dengan $P\text{-value} = 0,498$, menandakan pengaruhnya paling kecil dan tidak signifikan. Nilai error sebesar 1,34% menunjukkan bahwa variasi data relatif rendah.

B. Pengujian Kekasaran Permukaan

Uji kekasaran permukaan terdapat pada 3 titik yang berbeda ditempatkan pada bidang hasil pemesinan yang sama dan berada sepanjang arah pemakanan pahat (*feed direction*). Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada tiga titik, yaitu Titik 1 di awal lintasan pemotongan, Titik 2 di bagian tengah lintasan, dan Titik 3 di akhir lintasan pemesinan dengan jarak per titik 35 mm yang semuanya berada pada bidang hasil pemesinan dan searah dengan arah pemakanan pahat. Penempatan ketiga titik ini bertujuan untuk mengevaluasi variasi dan keseragaman kekasaran permukaan sepanjang proses pemotongan, sehingga nilai kekasaran yang diperoleh dapat mewakili kualitas

permukaan hasil CNC milling secara keseluruhan. gambar berikut menunjukkan penentuan titik pengukuran kekasaran permukaan:



Gambar 7. Titik uji kekasaran permukaan

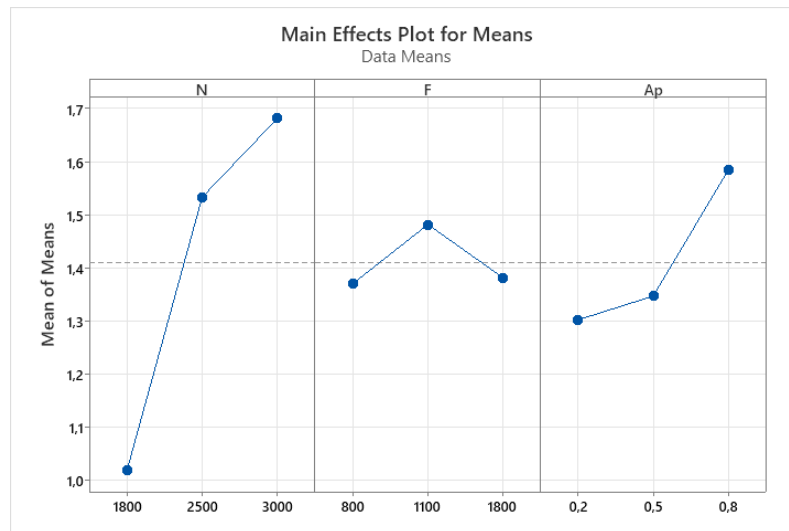
Berdasarkan pengujian kekasaran permukaan yang dilakukan menggunakan alat ukur mitutoyo SJ 210, berikut adalah tabel rekapitulasi hasil pengukuran kekasaran permukaan pada tiga titik:

Tabel 7. Hasil uji kekasaran permukaan

Spesimen	Parameter			Titik 1 (μm)	Titik 2 (μm)	Titik 3 (μm)	Pendingin
	<i>depth of cut</i> (mm)	<i>feed rate</i> (mm/menit)	<i>spindle speed</i> (RPM)				
1	0.2	800	1800	1,115	0,49	0,871	<i>Dry</i>
2	0.2	1100	2500	1,309	0,652	1,405	<i>Dry</i>
3	0.2	1800	3000	1,514	0,773	1,034	<i>Coolant</i>
4	0.5	800	1800	1,709	0,864	1,549	<i>Coolant</i>
5	0.5	1100	2500	1,885	1,56	1,754	<i>Dry</i>
6	0.5	1800	3000	1,589	1,995	0,891	<i>Dry</i>
7	0.8	800	1800	2,434	1,674	1,624	<i>Coolant</i>
8	0.8	1100	2500	1,933	1,559	1,276	<i>Coolant</i>
9	0.8	1800	3000	2,059	1,346	1,227	<i>Coolant</i>

Depth of cut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan, di mana nilai kekasaran cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya *depth of cut*. Pada *depth of cut* 0,2 mm diperoleh kekasaran permukaan paling rendah karena gaya potong dan getaran relatif kecil, sedangkan pada *depth of cut* 0,8 mm kekasaran menjadi yang tertinggi akibat meningkatnya beban pemotongan dan ketidakstabilan proses[13]. Selain itu, kondisi pendinginan juga berperan penting dalam menentukan kualitas permukaan hasil pemesinan. Penggunaan *coolant* umumnya menghasilkan permukaan yang lebih halus dan stabil dibandingkan *dry machining* karena mampu mengurangi panas, gesekan, dan keausan pahat, terutama pada *depth of cut* yang lebih besar[14]. Di samping itu, pengaturan *feed rate* dan *spindle speed* yang tepat dapat membantu menekan fluktuasi kekasaran sehingga kualitas permukaan menjadi lebih seragam.

Grafik pada gambar 7 berikut menyajikan variasi nilai kekasaran permukaan (R_a) terhadap perubahan parameter proses CNC milling:



Gambar 8. Grafik uji kekasaran permukaan

Grafik *Main Effects Plot for Means* pada Gambar 8 (uji kekasaran permukaan) menunjukkan pengaruh *spindle speed* (N), *feed rate* (F), dan *depth of cut* (Ap) terhadap rata-rata nilai kekasaran permukaan (R_a). Pada faktor *spindle speed*, terlihat kecenderungan peningkatan kekasaran permukaan seiring kenaikan kecepatan dari 1800 ke 3000 rpm, di mana nilai rata-rata R_a meningkat dari sekitar 1,02 μm menjadi $\pm 1,68 \mu\text{m}$, mengindikasikan bahwa kecepatan spindle yang terlalu tinggi dapat memperburuk kualitas permukaan akibat peningkatan getaran dan temperatur pemotongan. Faktor *feed rate* menunjukkan pola fluktuatif, dengan nilai kekasaran meningkat pada 1100 mm/menit ($\pm 1,48 \mu\text{m}$) lalu menurun kembali pada 1800 mm/menit ($\pm 1,38 \mu\text{m}$), yang menandakan adanya kondisi *feed rate* optimum untuk menghasilkan kualitas permukaan yang lebih baik. Sementara itu, *depth of cut* memperlihatkan tren peningkatan kekasaran yang cukup jelas, di mana kenaikan Ap dari 0,2 ke 0,8 mm menyebabkan nilai R_a meningkat dari sekitar 1,30 μm menjadi $\pm 1,59 \mu\text{m}$, akibat meningkatnya beban potong dan gaya pemotongan. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa *spindle speed* dan *depth of cut* cenderung meningkatkan kekasaran permukaan, sedangkan *feed rate* memiliki pengaruh yang tidak linier, sehingga pemilihan kombinasi parameter yang tepat sangat diperlukan untuk memperoleh kualitas permukaan yang optimal.

Tabel 8. Hasil ANOVA Kekasaran Permukaan

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	0,72690	78,19%	0,72690	0,36345	16,98	0,056
F	2	0,02265	2,44%	0,02265	0,01132	0,53	0,654
Ap	2	0,13731	14,77%	0,13731	0,06866	3,21	0,238
Error	2	0,04280	4,60%	0,04280	0,02140		
Total	8	0,92966	100,00%				

faktor spindle speed (N) memberikan pengaruh paling dominan terhadap kekasaran permukaan dengan kontribusi sebesar 78,19% dan nilai $F = 16,98$, namun secara statistik pengaruhnya mendekati signifikan dengan $P\text{-value} = 0,056$, yang sedikit lebih besar dari taraf signifikansi 0,05. Faktor depth of cut (Ap) memiliki kontribusi sebesar 14,77% dengan $P\text{-value} = 0,238$, sehingga pengaruhnya tidak signifikan, tetapi tetap menunjukkan peran terhadap peningkatan kekasaran permukaan. Sementara itu, feed rate (F) hanya memberikan kontribusi sebesar 2,44% dengan $P\text{-value} = 0,654$, menandakan pengaruhnya paling kecil dan tidak signifikan. Nilai error sebesar 4,60% menunjukkan variasi data relatif rendah.

IV. SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter proses permesinan CNC milling yang meliputi *spindle speed*, *feed rate*, *depth of cut*, serta penggunaan media pendingin berpengaruh terhadap waktu pemesinan, konsumsi energi, dan kekasaran permukaan Aluminium A6061. Peningkatan *spindle speed* dan *feed rate* terbukti secara signifikan mampu menurunkan waktu pemesinan dan konsumsi energi, dengan *spindle speed* sebagai faktor paling dominan, karena mempercepat laju pemotongan sehingga durasi proses menjadi lebih singkat dan energi yang digunakan lebih efisien, sedangkan *depth of cut* memberikan pengaruh yang relatif lebih kecil terhadap kedua respon tersebut. Sebaliknya, terhadap kekasaran permukaan, peningkatan *depth of cut* dan *spindle speed* cenderung meningkatkan nilai kekasaran akibat bertambahnya gaya potong, getaran, dan temperatur pemesinan, sementara *feed rate* menunjukkan pengaruh yang tidak linier. Penggunaan media pendingin *coolant* dibandingkan *dry machining* mampu meningkatkan stabilitas proses, menurunkan panas dan gesekan, sehingga menghasilkan waktu pemesinan dan konsumsi energi yang lebih rendah serta kualitas permukaan yang lebih baik, khususnya pada kombinasi parameter tinggi, sehingga pemilihan kombinasi parameter proses dan media pendingin yang tepat menjadi kunci utama dalam mencapai efisiensi dan kualitas optimal pada proses CNC milling Aluminium A6061.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Dan juga terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua atas dukungan semangat dan doa mereka yang selalu dipanjatkan tanpa henti sehingga penulis bisa sampai dititik ini. Tak lupa mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua teman-teman seperjuangan yang telah membantu, dan memberikan dukungan. khususnya kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, saran, dan motivasi selama proses penyusunan skripsi ini. Dan yang terakhir penulis mengucapkan terima kasih kepada diri sendiri yang telah berjuang, bertahan, dan tetap melangkah di tengah kelelahan dan luka, hingga proses ini dapat diselesaikan dengan keteguhan, keikhlasan, dan harapan untuk masa depan yang lebih baik.

REFERENSI

- [1] B. Herdiana, E. B. Setiawan, Dan U. Sartoyo, "Tinjauan Komprehensif Evolusi, Aplikasi, Dan Tren Masa Depan Programmable Logic Controllers (A Comprehensive Review Of The Evolution, Applications, And Future Trends Of Programmable Logic Controllers)," *Telekontran : Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali Dan Elektronika Terapan*, Vol. 11, No. 2, Hlm. 173–193, Jul 2024, Doi: 10.34010/Telekontran.V11i2.12896.
- [2] D. Jurusan Teknik Mesin Oleh, "Optimasi Kekasaran Permukaan Proses Cnc Turning Baja Skd-11 Dengan Menggunakan Metode Taguchi Optimizing Surface Roughness Of Skd-11 Steel Lathe Using Taguchi Method Tugas Akhir Ini Disusun Untuk Memenuhi Syarat Menyelesaikan Pendidikan Diploma Iv Program Studi Teknik Mesin Dan Manufaktur," 2021.
- [3] I. Syahri Cebro Dan N. Juhan, "Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe Pengaruh Parameter Pemotongan Mesin Bubut Cnc Tu-2a Retrofit Terhadap Kekasaran Permukaan Dan Keselindrisan," 2025.
- [4] Shafly, Bukhari, Dan Saifuddin, "Optimasi Kekasaran Permukaan Material Aluminium 5052 Hasil Proses Milling Mesin Cnc Aciera Vmc50e Menggunakan Metode Taguchi," 2024.
- [5] J. C. Jiménez, M. I. Ardila, J. S. Rudas, C. A. I. M., E. J. Núñez, Dan M. A. Rodriguez, "Energy Consumption Analysis Of Machining Centers Using Bayesian Analysis And Genetic Optimization," Jul 2022, [Daring]. Tersedia Pada: [Http://Arxiv.Org/Abs/2207.05243](http://Arxiv.Org/Abs/2207.05243)
- [6] M. Aziz Dan R. Saraswati, "Optimalisasi Parameter Mesin Cnc Milling 3 Axis Terhadap Waktu Produksi Dengan Menggunakan Response Surface Methodology," *Formosa Journal Of Applied Sciences*, Vol. 1, No. 4, Hlm. 293–304, Sep 2022, Doi: 10.55927/Fjas.V1i4.1089.
- [7] U. S. Jati Dkk., "Pengaruh Variasi Pendinginan Terhadap Kekasaran Permukaan Hasil Proses Milling Pada Material Stainless Steel Aisi 304," Vol. 15, No. 02, 2024, Doi: 10.35970/Infotekmesin.V15i2.2371.
- [8] A. Widodo Dan D. Soediantono, "Benefits Of The Six Sigma Method (Dmaic) And Implementation Suggestion In The Defense Industry: A Literature Review," *International Journal Of Social And Management Studies (Ijomas)*, Vol. 3, No. 3, 2022.
- [9] Agra Nurtrihadi, Jupriyanto, Dan Dangan Waluyo, "Penerapan Artificial Intelligence (Ai) Untuk Optimasi Jadwal Produksi Di Industri Manufaktur Dalam Upaya Meningkatkan Produktivitas Kerja," *Jurnal Iso: Jurnal Ilmu Sosial, Politik Dan Humaniora*, Vol. 5, No. 1, Jan 2025, Doi: 10.53697/Iso.V5i1.2231.

- [10] S. Luxmana Irjayanti Dan Dan Rusiyanto, “Pengaruh Media Pendingin Dan Kecepatan Spindel Terhadap Tingkat Kekasaran Proses Cnc Turning Pada Aluminium Daur Ulang,” 2019.
- [11] M. Mulyadi, W. Alfiansyah, A. Akbar, R. Firdaus, Dan N. F. G. Andita, “Optimizing Machining Time For Cad / Cam Milling Programming Using The Taguchi Method,” Dalam *Journal Of Physics: Conference Series*, Iop Publishing Ltd, Des 2019. Doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044043.
- [12] S. Susastro, S. U. Handayani, I. S. Atmanto, Dan M. A. Pangestu, “Pengukuran Parameter Energi Listrik Pada Mesin Cnc Milling Pada Beberapa Tingkat Kecepatan Potong,” *Jrst (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, Vol. 6, No. 2, Hlm. 131, Nov 2022, Doi: 10.30595/Jrst.V6i2.12795.
- [13] R. A. M. Napitupulu Dan S. E. A. Perangin Angin, “Pengaruh Parameter Pemesinan Terhadap Kekasaran Permukaan Ai6061be Pada Pemesinan Cnc Mini 500 Watt Menggunakan Pahat Karbida Straight Endmill,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 15, No. 3, Hlm. 1789–1797, Des 2024, Doi: 10.21776/Jrm.V15i3.1812.
- [14] W. Aunur Rofiq Dkk., “Analisis Pengaruh Variasi Jenis Cairan Pendingin Dan Gerak Makan (Feeding) Pada Mistcooling Proses Bubut (Turning) Terhadap Kekasaran Permukaan Baja S45c,” 2022, [Daring]. Tersedia Pada: [Http://Journal2.Um.Ac.Id/Index.Php/Jtmp](http://Journal2.Um.Ac.Id/Index.Php/Jtmp)
- [15] D. Ismail Permana, “Metal: Jurnal Sistem Mekanik Metal: Jurnal Sistem Mekanik Dan Termal Optimasi Parameter Pemesinan Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Aluminium Proses Pembubutan Dengan Metode Taguchi.”

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.