



Studi Ekperimental *Machining Environment* Terhadap Konsumsi Daya dan Suhu Pada Pemmesinan *Milling* Aluminium Alloy 6061

Ahmad Imam Rifa^{1,*}, Zainuri Anwar¹, Muhammad Irfan Dzaky¹, Aril Triansyah², Nakola Saputra²

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Sumatera Selatan, Indonesia

²Program Studi D-III Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Sumatera Selatan, Indonesia

Kata kunci

Aluminium 6061
CNC Milling
Green Machining
Mach-3
MQL

ABSTRAK

Proses pemmesinan *milling* aluminium 6061 memerlukan optimasi parameter pemotongan dan teknik pendinginan untuk meningkatkan efisiensi energi serta kualitas hasil pemmesinan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan *spindel* 1.500 – 2.500 rpm serta *machining environment* (*dry*, *flood*, dan *minimum quantity lubrication*) terhadap suhu pemmesinan, konsumsi daya serta morfologi tatal (*chips*). Pengujian eksperimental dilakukan pada mesin EMCO CNC 3A menggunakan pahat *carbide end mill* 3-flute berdiameter 6 mm dengan kedalaman pemakanan dijaga konstan 0,50 mm dan laju pemakanan 250 mm/menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan *spindel* berbanding lurus dengan kenaikan suhu pemmesinan, daya potong, dan daya tanpa pemotongan. Pemilihan teknik pendinginan dan pelumasan yang tepat dapat dijadikan sebagai strategi *green machining* yang hemat energi dan ramah lingkungan dalam mewujudkan proses pemmesinan berkelanjutan.

* Corresponding author:

Ahmad Imam Rifa'i (email: imamrf@polsri.ac.id)

Diterima: 13 Agustus 2026

Disetujui: 26 September 2026

Dipublikasikan: 30 September 2026

1 Pendahuluan

Proses pemmesinan merupakan bagian yang sangat penting dalam dunia industri khususnya di bidang manufaktur. Proses pemmesinan dapat mengubah bahan dasar menjadi produk yang memiliki nilai jual yang tinggi. Seiring dengan perkembangan industri, proses pemmesinan mampu menghasilkan produk yang memiliki nilai presisi tinggi serta kualitas yang sangat baik. Salah satu proses pemmesinan yang paling populer adalah proses *milling* [1]. Proses *milling* adalah teknik pemmesinan untuk menghilangkan sebagian permukaan material secara presisi. Pemotongan material terjadi akibat kontak antara benda kerja yang dengan alat potong (*cutting tools*) yang berputar. Proses ini menghasilkan berbagai bentuk geometri, mulai dari bidang datar, alur, roda gigi, hingga komponen kompleks [2], [3]. Dalam proses pemmesinan *milling*, fluida pemotongan memiliki peranan penting yaitu sebagai pelumasan dan pendinginan pada zona pemotongan serta meningkatkan kualitas permukaan. Fluida pemotongan dengan bahan dasar mineral merupakan jenis fluida pemotongan yang paling umum digunakan dalam industri. Fluida pemotongan berperan sangat penting dalam mendukung capaian dari kinerja pemmesinan serta sebagai pendinginan pada zona pemotongan. Metode konvensional yang paling sering digunakan adalah metode *flood*. Metode *flood* adalah metode mengalirkan fluida pemotongan secara terus menerus dan dalam jumlah laju aliran volume hingga 10liter/menit [4]. Metode *flood* menimbulkan permasalahan khususnya pada pembuangan limbah pasca proses pemmesinan serta membutuhkan biaya operasional yang tinggi. Teknik terbaru dalam distribusi fluida pemotongan adalah dengan menggunakan teknik MQL. Penggunaan teknik MQL terbukti secara signifikan menurunkan suhu selama proses pemmesinan dan menyelesaikan masalah terkait pembuangan limbah cairan pendingin. Kinerja pemmesinan menggunakan teknik MQL dipengaruhi oleh jenis material, kecepatan potong, geometri mata pahat, metode aplikasi, serta

parameter pemotongan[5]. Fluida yang berbentuk butiran halus (*droplet*) akan langsung menguap ke udara ketika bersentuhan dengan zona pemotongan. Tekanan aerosol yang dihasilkan dari teknik MQL mampu menghasilkan tatal (*chip*) sisa pemotongan menjadi lebih bersih [6]. Hasil penelitian menunjukkan teknik MQL mampu menurunkan suhu pemotongan secara signifikan [7][8]. Parameter yang mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkan dari pemesinan *milling* adalah laju pemakanan, kecepatan potong serta kedalaman pemotongan. Selanjutnya, parameter pemesinan yang berpengaruh terhadap suhu pemotongan adalah kedalaman pemotongan (*deep of cut*). [9], [10]. Proses pemesinan *milling* dengan benda kerja aluminium AI6061BE dengan mata potong *endmill 2 flute* jenis *carbida non-coating* HRC40. Hasil penelitian dilaporkan bahwa parameter pemesinan *milling* yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan adalah laju pemakanan (*feed rate*) [11].

Makhesana et al. [12] melakukan analisis konsumsi daya pada proses *drilling* di berbagai kondisi pendinginan yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsumsi daya disebabkan oleh faktor gesekan yang rendah antara antarmuka benda kerja dan mata bor selama proses pemesinan *drilling*. Surakasi et al [13] melakukan proses pemesinan *milling* di mesin CNC dengan parameter pemesinan putaran *spindel* 600 – 1000 rpm, laju pemakanan 200-400 mm/min dan kedalaman pemakanan 0,2 – 0,6 mm dan benda kerja AA7075 alloy. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kinerja pemesinan yang dievaluasi dari kekasaran permukaan yang dihasilkan. Temuan penelitian memperlihatkan bahwa kedalaman pemakanan merupakan faktor pemesinan yang paling berpengaruh terhadap hasil permukaan benda kerja yang dihasilkan untuk benda kerja aluminium AA7075. Hasil permukaan yang halus dihasilkan oleh kedalaman pemakanan yang lebih rendah. Wu et al [14] telah mengevaluasi kondisi keausan pahat berdasarkan keausan sisi (*flank wear*) pada proses pemesinan *micromilling*. Hasil penelitian dilaporkan bahwa suhu pemotongan secara efektif mengurangi keausan mata pahat dibandingkan dengan pendinginan konvensional (*flood cooling*). Mohandas et al [15] menggunakan *soluble oil* sebagai fluida pemotongan pada proses *milling* material titanium alloy Ti-6Al-4V. *Soluble oil* adalah minyak yang dapat diemulsikan dan umumnya digunakan sebagai pelumas dan pendingin dalam aplikasi industri dan proses pemesinan. Minyak ini terdiri dari campuran minyak alami dan sintetis yang larut dalam air. Hasil penelitian dilaporkan bahwa parameter optimal untuk meminimalkan kekasaran permukaan adalah pada parameter pemesinan kecepatan potong 40 m/menit, laju pemakanan 0,4 mm/tooth, dan kedalaman pemotongan 0,5 mm. Rajagopal et al [16] melakukan pelapisan pada *carbide milling inserts* menggunakan pelapis Aluminium Titanium Nitrida (AlTiN), Titanium Aluminium Silikon Nitrida (TiAlSiN). Hal tersebut dilakukan untuk menghasilkan benda kerja pada mesin *milling* tanpa menggunakan fluida pemotongan. Hasil penelitian dilaporkan bahwa pelapis TiAlSiN memiliki kekuatan mekanis unggul, ketahanan termal tinggi, dan koefisien gesek rendah sehingga mampu memberikan pengendalian distorsi paling efektif. Conger et al [17] menggunakan aluminium 6061-T651 sebagai benda kerja pada proses *milling*. Penelitian dilakukan pada kecepatan laju pemakanan 200-300 m/min dengan benda kerja *aluminium alloy* 6061-T651 dan fluida pendingin berbasis minyak nabati. Penelitian dilakukan untuk mengetahui konsumsi energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan benda kerja pada industri kedirgantaraan.

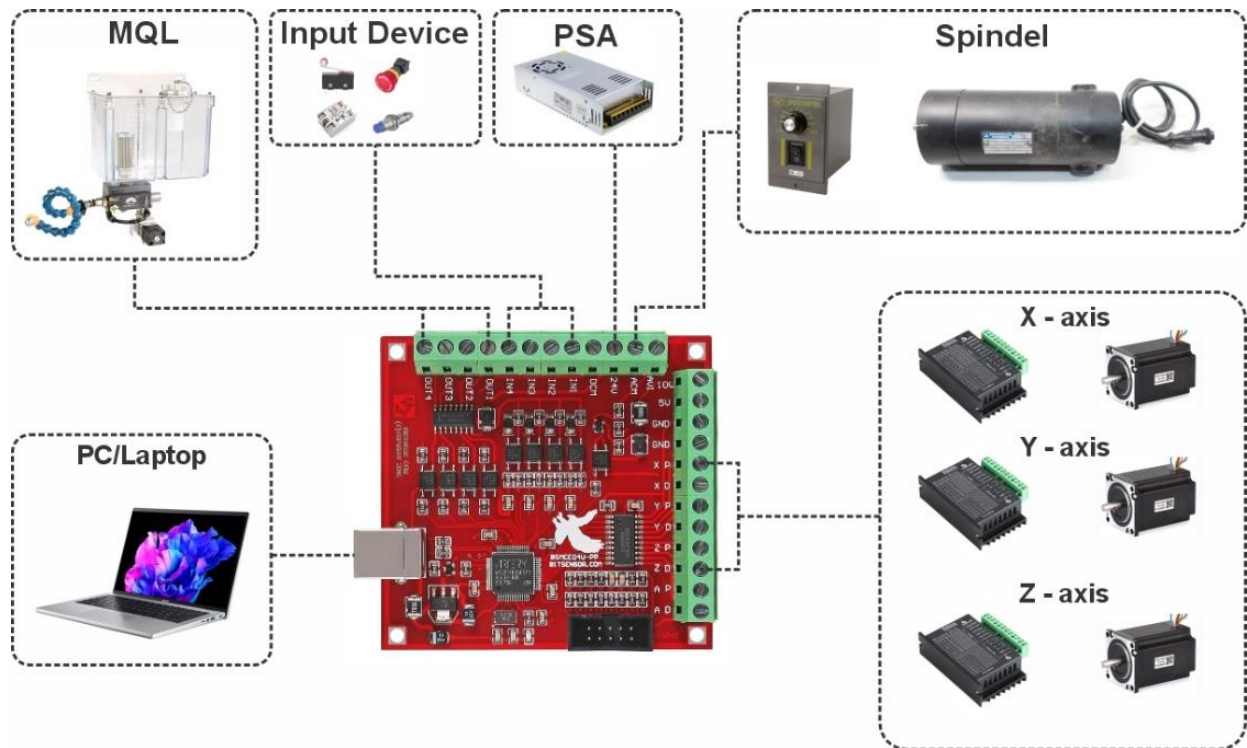
Kebaharuan dari penelitian ini adalah suhu pemotongan dan konsumsi energi listrik dianalisis dengan berbagai *machining environment* diantaranya *dry machining*, *flood cooling* dan MQL. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kecepatan putaran *spindel* terhadap konsumsi daya, suhu pemotongan serta morfologi geram pada proses *milling aluminium alloy* 6061.

2 Metode Penelitian

2.1 Experimental Setup

Studi eksperimental dilakukan pada proses pemesinan Emco CNC *milling* 3 sumbu (3-axis) yang memiliki kecepatan *spindel* maksimum 4.000 rpm dan daya maksimal motor *spindel* sebesar 0,44 kW. Spesifikasi komponen utama mesin tersebut disajikan pada Tabel 1. Pengaturan kinerja mesin CNC mencakup kecepatan putaran *spindel*, pergerakan ketiga sumbu (X, Y, dan Z) dan teknik pendinginan. Pergerakan meja kerja dikendalikan melalui komputer dalam tiga arah linear utama, yaitu sumbu X, Y, dan Z. Sumbu X dan Y masing-masing mengontrol gerak horizontal secara lateral (kiri-kanan) dan longitudinal (depan-belakang), sedangkan

sumbu Z mengontrol gerak vertikal (atas-bawah) untuk menentukan kedalaman pemotongan. Keseluruhan sistem pengoperasian mesin CNC ini diatur oleh sistem kontrol Mach-3. Pada mesin Emco CNC 3A yang dikombinasikan dengan sistem kontrol mach-3 berhasil memotong benda kerja sesuai dengan bentuk yang diinginkan secara otomatis melalui bahasa pemrograman standar (*g-code*) yang digunakan untuk mengontrol gerakan, kecepatan, jalur pemotongan serta pengaturan teknik pendingin pada mesin CNC [18], [19]. Sistem kontrol CNC *milling* mach-3 yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Kontrol CNC Milling

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Utama CNC

Komponen	Model	Spesifikasi
Motor <i>Spindel</i>	Baumüller GNF 56 D	95VDC 5,6 A 0,44Kw
DC <i>Speed Controller</i>	TWT DC-51	220V 50 Hz
CNC Control	BSMCE04U-PP	4-Axis USB+RS232
<i>Power Supplay</i>	S-720-24	24V 20A
<i>Stepper Driver</i>	TB6600	9-42 VDC 0,5-3,5 A
Motor <i>Stepper</i>	NEMA 57	1,8 Deg 2,3NM 4,4A

Kecepatan pemotongan, laju pemakanan, dan kedalaman pemotongan dipilih sebagai parameter input untuk menjalankan program CNC, sedangkan suhu dan konsumsi daya dipilih sebagai parameter respons. Parameter pemesinan masing-masing ditentukan berdasarkan Eq. 1 dan Eq. 2.

$$\text{Cutting Speed } (V_c) = \frac{\pi \times D \times n}{1.000} \quad (1)$$

$$\text{Spindel Speed } (n) = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (2)$$

dimana:

V_c : kecepatan pemotongan

π : nilai konstanta 3,14,

D : diameter cutting tools (6mm) ,

n : putaran *spindel*.

Penentuan nilai daya air *cutting* ini sangat krusial dalam analisis energi pemesinan, besarnya $P_{no-load}$ memungkinkan pemisahan secara presisi antara energi yang dikonsumsi oleh sistem mekanis internal mesin dengan energi efektif yang benar-benar digunakan oleh pahat untuk memotong material. Konsumsi daya total mesin karena konsumsi daya total mesin (P_{total}) merupakan akumulasi daya tanpa pemotongan ($P_{no-load}$) dan daya pemotongan bersih ($P_{cutting}$), yang dirumuskan pada Eq. 3 :

$$P_{Total} = P_{no-load} + P_c \quad (3)$$

dimana:

P_{total} : konsumsi total mesin

$P_{no-load}$: akumulasi daya tanpa pemotongan

$P_{cutting}$: daya pemotongan bersih.



Gambar 2. Eksperimental Setup

Untuk menghasilkan data yang akurat, digunakan berbagai alat ukur dengan tingkat akurasi yang tinggi. Tingkat akurasi dari instrumen pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Instrumen Pengukuran

Instrumen	Model	Resolusi Pengukuran
<i>Micrometer</i> (mm)	Mitutoyo	0,1
<i>Tachometer</i> (rpm)	TL-900	0,1
<i>Thermogun</i> (°C)	ST490+	0,1
KWH Meter (W)	D52-2066	0,1

2.2 Benda Kerja, Cutting Tool dan Cutting Environment

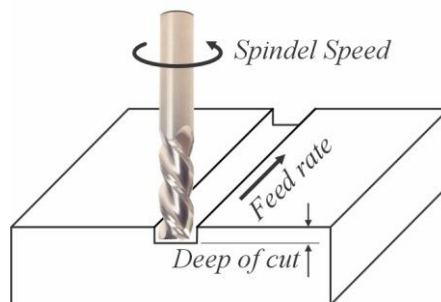
Pelat strip aluminium 6061 berukuran $100 \times 50 \times 9,5$ mm digunakan sebagai benda kerja dalam penelitian eksperimental pemesinan *milling*. Komposisi kimia aluminium 6061 disajikan pada Tabel 3. Pahat potong (*cutting tool*) yang digunakan berupa *carbide end mill* dengan diameter 6 mm. Pahat potong ini memiliki tingkat kekerasan 45 HRC, panjang *flute* 15 mm, dan jumlah *flute* sebanyak tiga buah (3-*flute*).

Tabel 3. Komposisi Benda Kerja

Komposisi	Al	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	Zn
Weight (%)	98,77	0,03	0,33	0,19	0,31	0,30	0,06

Geometri *cutting tool* yang digunakan adalah *endmill 3-flute* dengan diameter 6mm yang dirancang khusus untuk proses *milling* material benda kerja aluminium 6061. Proses pemesinan dilakukan melalui pengaturan kecepatan putaran *spindel*, kedalaman pemakanan, serta laju pemakanan *end mill*. Kecepatan *spindel*

diatur pada variasi 1.500, 2.000, 2.500 rpm, sedangkan kedalaman pemakanan dan laju pemakanan dijaga konstan, masing-masing sebesar 0,50 mm dan 250 mm/menit. Parameter pemotongan tersebut disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Parameter Pemotongan

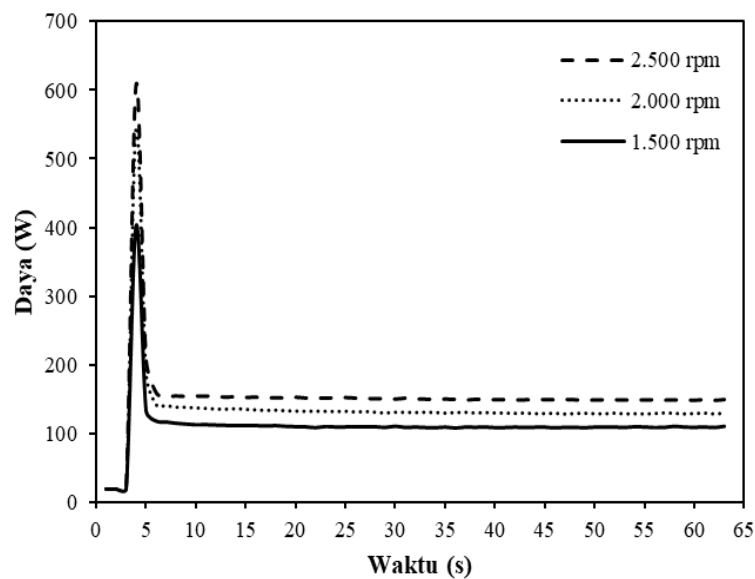
Machining environment (kondisi pemesinan) adalah kondisi atau media pelumasan dan pendinginan yang diterapkan pada zona potong antara *cutting tools* dan benda kerja selama proses pemesinan berlangsung. *Machining environment* terdiri dari pemesinan kering (*dry*), *flood*, dan MQL dengan parameter pemesinan yang sama. Fluida pendinginan menggunakan soluble cutting oil dengan perbandingan campuran antara *aquadest* dengan *soluble cutting oil* adalah 1:20. Debit aliran fluida pemotongan pada kondisi *flood* dijaga konstan pada laju aliran 80 liter/jam. Selanjutnya, untuk kondisi MQL diperoleh berdasarkan pencampuran antara fluida pemotongan dengan udara bertekanan 29 Psi didalam *mixing chamber*. Katup fluida pada *mixing chamber* dibuka sebanyak 15° dari kondisi tertutup untuk menghasilkan laju aliran 40 ml/jam. Setiap percobaan *milling* dilakukan dengan 3 kecepatan *spindel* dan 3 kondisi pemesinan. Pengambilan data dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali untuk mendapatkan hasil yang akurat. Parameter respons diukur untuk setiap 3 baris *milling*, dan nilai rata-rata digunakan untuk perbandingan. Parameter instrumen pemesinan *milling* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Instrumen Pemesinan *Milling*

Instrumen	
<i>Machining Environment</i>	<i>Dry, Flood, MQL</i>
<i>Spindel Speed</i> (rpm)	1.500, 2.000, 2.500
<i>Feed rate</i> (mm/min)	300
<i>Depth of Cut</i> (mm)	0,50

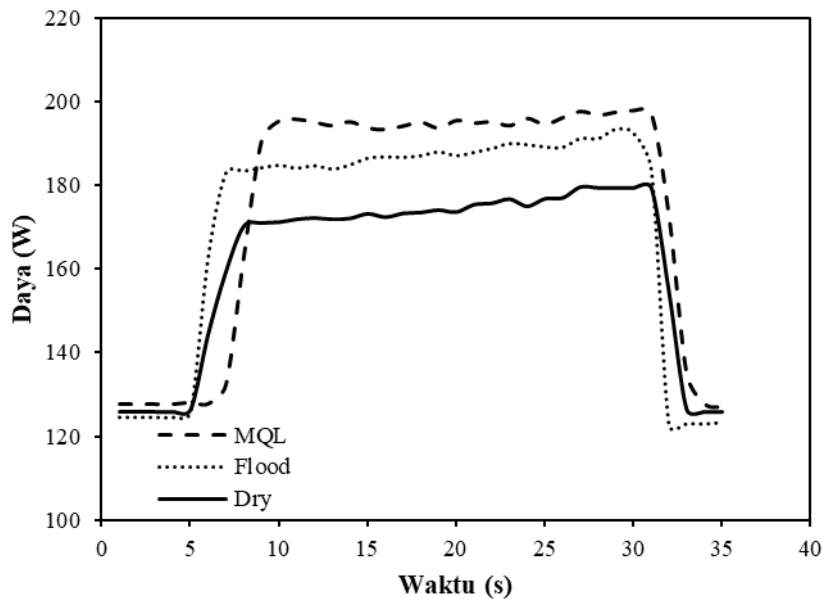
3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Konsumsi Daya Pemesinan dan Korelasinya dengan Konfigurasi Sistem Pendingin



Gambar 4. Konsumsi daya milling tanpa pemotongan

Gambar 4 merupakan hasil pengukuran daya dasar atau daya tanpa pemotongan yang dilakukan pada variasi kecepatan putaran spindel 1.500, 2.000, dan 2.500 rpm tanpa adanya interaksi antara pahat dan benda kerja. Secara umum, pola perubahan daya listrik untuk ketiga variasi kecepatan putaran *spindel* menunjukkan karakteristik yang konsisten, yang terbagi menjadi dua fase utama, yaitu fase transisi awal (*transient starting phase*) dan fase kondisi tunak (*steady-state phase*). Program pemesinan CNC secara keseluruhan akan berjalan secara otomatis berdasarkan perintah pada panel kontrol melalui tombol *cycle start*. Daya sistem kontrol CNC sebelum *cycle start* adalah 19W. Selanjutnya, pada saat *cycle start* dimulai terjadi lonjakan daya secara drastis (*inrush power peak*) pada seluruh variasi kecepatan. Semakin tinggi putaran *spindel*, nilai daya puncak listrik sesaat mesin CNC semakin meningkat. Lonjakan tertinggi untuk putaran spindel 1.500, 2.000 dan 2.500 rpm masing-masing adalah 390, 480 dan 610W. Lonjakan daya yang signifikan pada fase awal ini disebabkan oleh kebutuhan torsi awal dan arus listrik awal motor untuk mengatasi inersia mekanis sistem dari kondisi diam hingga mencapai kecepatan operasionalnya. Setelah melewati fase lonjakan arus awal yaitu rentang waktu 3 detik awal, daya listrik mengalami penurunan tajam dan mencapai kondisi tunak hingga akhir pengujian. Pada kondisi tunak, rata-rata konsumsi daya menunjukkan tren berbanding lurus dengan besarnya kecepatan putar. Sistem yang beroperasi pada kecepatan 2.500 rpm membutuhkan daya stabil tertinggi sebesar 150,5W, sedangkan pada kecepatan 2.000 rpm dan 1.500 rpm masing-masing membutuhkan daya sebesar 131,4W dan 109,9W. Peningkatan konsumsi daya tunak seiring dengan bertambahnya RPM mengindikasikan adanya peningkatan beban kerja mekanis, gesekan dinamik pada bantalan (*bearing*), serta hambatan aerodinamis pada kecepatan tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan putar memberikan pengaruh signifikan baik terhadap konsumsi daya puncak awal maupun daya operasional kontinu. Menurut penelitian yang dilaporkan oleh [12] tegangan listrik berpengaruh terhadap kecepatan putaran *spindel* sedangkan arus listrik yang mengalir pada lilitan motor *spindel* berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan.



Gambar 5. Hubungan antara teknik pendinginan terhadap konsumsi daya

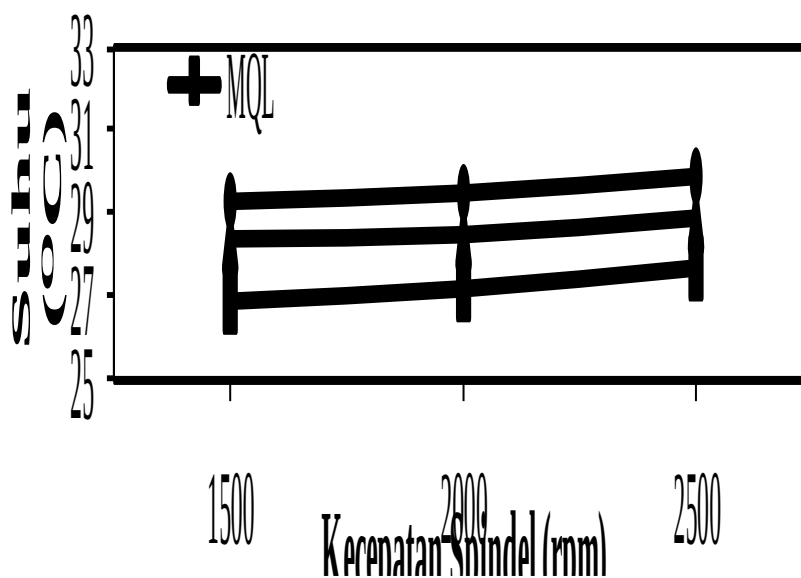
Gambar 5 merupakan hasil pengukuran konsumsi daya mesin pada variasi kecepatan *spindel* serta *machining environment* yang berbeda. Konsumsi daya terdiri atas tiga fase utama yaitu fase *idle* awal, fase pemotongan dan fase *idle*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada fase *idle* sebelum dan sesudah pemotongan dimulai, konsumsi daya awal berada pada tingkat yang stabil di kisaran 125W untuk ketiga variabel. Konsumsi daya mengalami kenaikan secara signifikan saat pahat mulai berkontak dan memotong benda kerja. Nilai konsumsi daya pemotongan untuk kondisi pemesinan kering adalah 195W sedangkan untuk pemesinan dengan penambahan teknik pendinginan *flood* dan MQL masing-masing adalah 175,1W dan 187,6W. . Nilai konsumsi daya pemotongan untuk kondisi pemesinan kering adalah 165W sedangkan untuk pemesinan dengan penambahan teknik pendinginan *flood* dan MQL masing-masing adalah 175,1W dan 187,6W. Perbedaan konsumsi daya antar teknik pendinginan sangat dipengaruhi oleh mekanisme tribologi yang terjadi pada zona pemotongan (*cutting zone*) [17]. Konsumsi daya pada kondisi pemesinan kering disebabkan oleh ketiadaan media pelumas pada antarmuka pahat-geram, sehingga menghasilkan koefisien gesekan yang tinggi dan gaya pemotongan yang lebih besar. Akibatnya, motor *spindel* mesin membutuhkan daya listrik ekstra untuk mengatasi tahanan gesek tersebut. Sebaliknya, metode *dry* terbukti paling efisien dalam mereduksi konsumsi daya karena tidak membutuhkan peralatan tambahan dalam proses pemesinan yang dilakukan. Pengaruh hasil pencampuran antara fluida pemotongan dan udara membuat fluida pemotongan membentuk *droplet* berskala mikro pada teknik MQL membentuk lapisan film pelumas yang efektif dalam mengurangi gesekan mekanis. Meskipun metode *flood* menyiramkan fluida pemotongan dalam jumlah besar, penetrasi pelumasan ke zona pemotongan kurang efektif jika dibandingkan dengan teknik MQL. Faktor lain yang berpengaruh terhadap teknik *flood* adalah hambatan viskositas fluida yang dapat menambah beban sekunder pada sistem pemotongan. Hasil yang sama juga dilaporkan oleh Conger [17] yang menyatakan bahwa pemesinan kering menghasilkan gaya pemotongan yang tinggi pada kondisi pemesinan kering secara signifikan meningkatkan daya potong dan jumlah energi yang dikonsumsi, serta meningkatkan emisi karbon yang dihasilkan dari konsumsi listrik.

3.2 Pengaruh Kecepatan Spindel dan Metode Pendinginan terhadap Suhu Pemesinan

Pengaruh variasi kecepatan *spindel* 1.500, 2.000, dan 2.500 rpm serta metode pendinginan *dry*, *flood*, dan MQL terhadap suhu pemesinan ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil penelitian eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan *spindel* berbanding lurus dengan kenaikan suhu pemesinan pada seluruh kondisi pendinginan. Pada pemesinan kering (*dry*), suhu yang dihasilkan merupakan yang tertinggi dibandingkan metode

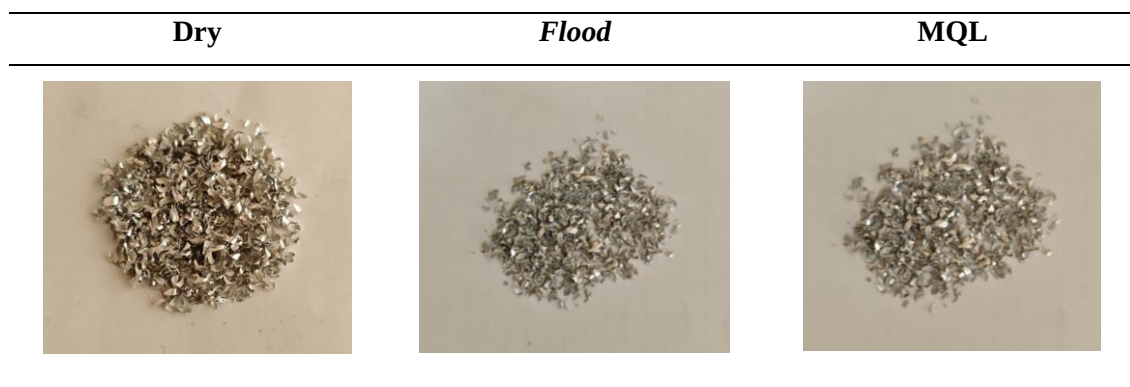
lainnya, yaitu meningkat dari 29,3°C pada kecepatan 1.500 rpm menjadi 29,5°C pada 2.000 rpm, dan mencapai puncaknya sebesar 29,9°C pada 2.500 rpm. Penggunaan metode pendinginan basah (*flood*) mampu menurunkan suhu pemotongan menjadi masing-masing 28,4°C, 28,6°C, dan 28,9°C pada rentang kecepatan spindle yang sama. Sementara itu, penerapan *minimum quantity lubrication* (MQL) untuk kecepatan spindle 1.500, 2.000, dan 2.50 rpm menghasilkan performa pendinginan paling optimal masing-masing 26,9°C, 27,2°C, 27,7°C.

Peningkatan suhu seiring bertambahnya kecepatan *spindel* disebabkan oleh peningkatan frekuensi pemotongan, deformasi material, dan friksi pada kecepatan *spindel* yang lebih tinggi (*tool-workpiece interface*) per satuan waktu. Efektivitas MQL dalam menekan suhu pemotongan terjadi karena partikel *droplet* fluida potong yang teratomisasi dalam aliran udara bertekanan mampu menembus area pemotongan (*cutting zone*) yang sempit secara lebih efisien dan menghasilkan produk yang lebih bersih dibandingkan metode *flood*. Hal ini membendung pembentukan lapisan uap (*vapor blanket*) dan menurunkan koefisien gesek secara signifikan, sehingga pembentukan panas akibat gesekan dapat diminimalkan sejak awal proses pemotongan. Du et al [20] melaporkan bahwa kinerja pemotongan kering memiliki suhu pemotongan yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknik MQL. Hubungan antara parameter pemotongan terhadap suhu dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan antara parameter pemotongan terhadap suhu

3.3 Chip morphology



Gambar 7. Morphology total di bawah lingkungan *milling* yang berbeda.

Gambar 7 karakteristik morfologi geram yang dihasilkan akibat variasi kecepatan *spindel* dan kondisi pendinginan dari proses *milling* aluminium 6061 dengan kecepatan putaran *spindel* yang sama yaitu 2000 rpm. Morfologi geram memberikan gambaran mengenai fenomena deformasi plastis, kondisi tribologi pada antarmuka pahat-geram, serta efektivitas metode pendinginan. Analisis morfologi pada penelitian ini bersifat kualitatif berdasarkan pengamatan visual terhadap aspek bentuk, panjang, dan keseragaman pemutusan tatal dari ketiga metode pendinginan. Pada kondisi pemesinan kering, tatal tampak lebih tidak seragam dan cenderung membentuk gulungan yang lebih panjang. Tingginya temperatur dan gesekan pada area pemotongan tanpa pendingin menyebabkan material mengalami deformasi plastik secara berkelanjutan sebelum akhirnya terputus. Selanjutnya, pada kondisi pemesinan flood, tatal menunjukkan karakteristik terputus-putus, pendek, dan sangat seragam. Fluida pendingin yang terdistribusi dengan debit yang tinggi memberikan efek kejutan termal yang efektif, menekan suhu secara drastis sehingga tatal menjadi lebih rapuh dan mudah patah. Morfologi tatal berada pada menggunakan Teknik MQL secara optimal yang mendekati Teknik pendinginan *flood*. Pengkabutan pelumas mikro berhasil mengurangi gesekan pada antarmuka pahat dan tatal, menghasilkan serpihan tatal yang relatif pendek dan teratur. Penerapan teknik *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) tatal yang paling konsisten dan terkontrol, yang ditandai oleh bentuk gulungan seragam dengan ukuran yang proporsional. Penetrasi tekanan udara dan *droplet* fluida pemotongan pada teknik MQL mampu menjangkau hingga ke daerah geser sekunder (*secondary shear zone*) dan berhasil mengurangi panjang kontak geram-pahat (*chip-tool contact length*) dan secara signifikan mereduksi koefisien gesek. Analisis morfologi tatal ini mengindikasikan bahwa teknik MQL mampu memberikan kombinasi kinerja yang optimal antara fungsi pelumasan dan pendinginan secara bersamaan. Penerapan teknik MQL juga berpengaruh terhadap penurunan gaya pemotongan, meningkatkan kualitas integritas permukaan benda kerja, serta perpanjangan umur pahat (*tool life*) [14].

4 Kesimpulan

Studi ekperimental *machining environment* terhadap konsumsi daya dan suhu pada pemesinan *milling* aluminium *alloy* 6061 telah dilaksanakan. Hasil Penelitian ini dapat disimpulkan bahwa peningkatan kecepatan *spindel* dari 1.500, 2.000 dan 2.500 rpm secara konsisten meningkatkan suhu pemesinan, konsumsi daya listrik yang digunakan. Metode MQL secara konsisten menghasilkan temperatur terendah, diikuti oleh *flood*, dan *dry* sebagai yang tertinggi. Pengurangan gaya pemotongan, penghematan energi, serta eliminasi limbah pemotong berlebih pada MQL membuktikan bahwa teknologi ini memenuhi prinsip *green machining*. Oleh karena itu, pada konfigurasi eksperimen yang diuji, MQL menunjukkan potensi sebagai alternatif pendinginan yang mendukung pendekatan pemesinan lebih berkelanjutan, terutama dari sisi minimisasi penggunaan fluida pemotongan dan suhu pemotongan.

5 Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Politeknik Negeri Sriwijaya melalui skema Penelitian Dasar – Kerdosma sesuai dengan nomor kontrak 5337/PL6.2.1/LT/2026 tanggal 26 Mei 2026. Peneliti juga menyampaikan terimakasih kepada P3M dan Lab. *Maintenance and Repair* Jurusan Teknik Mesin Polsri yang telah mendukung kegiatan penelitian ini.

6 Referensi

- [1] I. I. Ikhries and A. F. Al-shawabkeh, "Novel methods for optimizing CNC aluminum alloy machining parameters in polymer mold cavities," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 7, no. 4, pp. 507–519, 2024, doi: 10.1016/j.ijlmm.2024.03.002.
- [2] Z. Duan *et al.*, "Tool wear in enhanced minimum quantity lubrication assisted milling: from mechanism to application," vol. 39, 2026.
- [3] P. I. Gultom and J. T. Industri, "Pengaruh Kecepatan Potong, Kecepatan Pemakanan Dan Sudut Potong Utama Terhadap Kekasaran Permukaan Pada Proses Bubut Medium Carbon Steel," vol. 11, no. September, pp. 13–18, 2020.
- [4] A. Shukla, A. Kotwani, and D. Rajendra, "Materials Today : Proceedings Performance comparison of dry, flood and vegetable oil based minimum quantity lubrication environments during CNC milling of Aluminium," vol. 21, pp. 1483–1488, 2020.

- [5] P. Kumar, V. Dubey, D. Kumar, and A. Kumar, "Materials Today : Proceedings An investigation on performance of castor oil and Pongamia oil based cutting fluid in MQL milling of aluminium alloy 6061," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.305.
- [6] K. N. Mohandas, B. Hosamani, V. Kemminje, and V. R. Raju, "An investigation into the surface integrity and cutting force characteristics in titanium alloy end milling using soluble oil and MQL as coolants," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 17, no. September, p. 100341, 2024, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100341.
- [7] S. Fitriana, B. Kristiawan, E. Surojo, A. T. Wijayanta, T. Miyazaki, and S. K. Koyama, "Influence of minimum quantity lubrication with Al₂O₃ nanoparticles on cutting parameters in drilling process," vol. 030056, no. January 2017, 2023, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5024115>.
- [8] A. I. Rifa'i *et al.*, "Studi eksperimental perbandingan efisiensi teknik MQL dan Flood Cooling dalam proses pengeboran," *Mach. J. Teknol. Terap.*, vol. 7, no. 1, pp. 11–19, 2026, doi: <https://doi.org/10.36257/machinery.v7i1.11345>.
- [9] Y. Oktriadi, P. Manufaktur, and N. Bangka, "Analisis Pengaruh Cutting Speed , Depth of Cut dan Feed Rate CNC Milling Terhadap Kekasaran Permukaan Aluminium 6061 Menggunakan Respons Surface Methodology (RSM)," vol. 04, no. 1, 2026.
- [10] B. S. Widodo, A. R. Krisnanda, and K. A. Widi, "Analisa Pengaruh Kecepatan Putar Spindel dan Kecepatan Pemakanan terhadap Kekasaran Permukaan dan Kekerasan Baja AISI 1020 pada Mesin Bubut CNC," vol. 14, no. September, pp. 74–81, 2023.
- [11] R. A. M. Napitupulu and S. E. A. P. Angin, "Pengaruh Parameter Pemesinan Terhadap Kekasaran Permukaan AL6061BE Pada Pemesinan CNC Mini 500 Watt Menggunakan Pahat Karbida Straight Endmill," vol. 15, no. 3, pp. 1789–1797, 2025, doi: 10.21776/jrm.v15i3.1812.
- [12] M. A. Makhesana, K. M. Patel, and N. D. Ghetiya, "Evaluation of drilling and hole quality characteristics in green machining aluminium alloys : A new approach towards green machining," vol. 129, no. September, pp. 176–186, 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.08.059.
- [13] R. Surakasi, R. Ganivada, and P. Chintada, "Taguchi-based optimisation of surface roughness in nano-lubricated CNC milling of AA7075 alloy," vol. 8, no. October 2025, pp. 0–11, 2026.
- [14] C. Wu, Y. Chen, M. Yang, Y. Tang, and Y. Cheng, "Effect of minimum quality lubrication on micromilling of TiBw / TA15 composites considering tool wear," vol. 159, no. July 2025, pp. 271–285, 2026.
- [15] K. N. Mohandas, B. Hosamani, V. Kemminje, and V. R. Raju, "An investigation into the surface integrity and cutting force characteristics in titanium alloy end milling using soluble oil and MQL as coolants," vol. 17, no. September, 2024.
- [16] B. Rajagopal, N. Arunachalam, K. Babu, and V. Parthiban, "Investigation of cutting performance in dry high-speed milling of BS L168 thin-walled aluminum alloy using DLC , AlTiN and TiAlSiN coated carbide inserts with TOPSIS analysis," *Next Res.*, vol. 3, no. November 2025, p. 101108, 2026, doi: 10.1016/j.nexres.2025.101108.
- [17] D. B. Conger, Y. F. Yapan, E. Ugur, A. Uysal, and E. Altan, "Influence of singular and dual MQL nozzles on sustainable milling of Al6061-T651 in different machining environments ~ ur Emiro g," vol. 109, no. November 2023, pp. 524–536, 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.12.043.
- [18] Z. Zainuddin, H. Widianoro, D. Mulyana, and E. Al, "Rekayasa Ulang Mesin Milling CNC EMCO TU-3A Untuk Mendukung Teknologi CAM," *J. CRANKSHAFT*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2024, doi: <https://doi.org/10.24176/crankshaft.v7i1.11846>.
- [19] A. Salam, S. Rasyid, A. Alim, and A. U. Hasnan, "Pengembangan Sistem Kontrol Mesin CNC Training Unit 3 Axis," *Sinergi*, vol. 23, no. 1, pp. 129–136, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v23i1.4990>.
- [20] F. Du *et al.*, "Cutting performance and cutting fluid infiltration characteristics into tool-chip interface during MQL milling," *Measurement*, vol. 225, no. June 2023, p. 113989, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113989.