

Pengaruh Variasi Kedalaman Potong terhadap Konsumsi Daya pada Mesin Drilling – Milling Material Baja dan Aluminium

Agus Topo Subekti^{1*}, Sufiyanto¹, Jumardi¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Jambi

*Corresponding author, e-mail: agustoposubekti2@gmail.com

ABSTRACT

In modern manufacturing, energy efficiency and high productivity are key indicators of production performance. Drilling–milling machines, which integrate drilling and milling operations, are widely used in small workshops and educational laboratories to produce precision components. One of the cutting parameters that strongly influences power consumption is the depth of cut, because it determines the magnitude of cutting load, cutting force, and process stability. This study analyzes the effect of depth-of-cut variation on power consumption during drilling and milling processes using a conventional drilling–milling machine at the Mechanical Engineering Laboratory of STITEKNAS Jambi. Experiments were conducted using a 4 mm HSS drill bit and a 4 mm HSS end mill at a spindle speed of 201 rpm with five depth-of-cut levels ranging from 1 to 5 mm. At each depth level, the actual electrical power before and under load was measured using a wattmeter and compared with theoretical power estimated from calculated cutting force and cutting speed. The measured no-load power was 198.4 W, and power consumption increased with increasing depth of cut. In drilling, the average loaded power increased from 199.3 W (1 mm) to 208.1 W (5 mm) (approximately 4.4%), with a maximum power of 209.2 W. In milling, power increased from 204.4 W (1 mm) to 212.4 W (5 mm) (approximately 3.9%), while the theoretical power ranged from 204.84 to 229.1 W. A depth of cut of 1–2 mm provided the best compromise between energy efficiency and process stability, as the measured power remained relatively close to the theoretical estimates and the machine operated without noticeable vibration or excessive loading.

Keyword: drilling, milling, depth of cut, power consumption, machining energy efficiency

ABSTRAK

Dalam manufaktur modern, efisiensi energi dan produktivitas merupakan indikator penting keberhasilan proses produksi. Mesin drilling–milling yang menggabungkan operasi drilling dan milling banyak digunakan di bengkel kecil serta laboratorium pendidikan untuk menghasilkan komponen presisi. Parameter pemotongan yang dominan memengaruhi konsumsi daya adalah kedalaman potong, karena menentukan beban pemotongan, gaya potong, dan kestabilan proses. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi kedalaman potong terhadap konsumsi daya pada proses drilling dan milling menggunakan mesin drilling–milling konvensional di Laboratorium Teknik Mesin STITEKNAS Jambi. Pengujian menggunakan mata bor HSS Ø4 mm dan end mill HSS Ø4 mm pada putaran spindle 201 rpm dengan variasi kedalaman potong 1–5 mm. Daya aktual sebelum dan sesudah pembebanan diukur menggunakan wattmeter dan dibandingkan dengan daya teoritis berdasarkan perhitungan gaya potong dan kecepatan potong. Daya tanpa beban sebesar 198,4 W dan meningkat seiring kenaikan kedalaman potong. Pada drilling, daya rata-rata berbeban naik dari 199,3 W (1 mm) menjadi 208,1 W (5 mm) (≈4,4%) dengan maksimum 209,2 W. Pada milling, daya meningkat dari 204,4 W (1 mm) menjadi 212,4 W (5 mm) (≈3,9%), sedangkan daya teoritis berada pada rentang 204,84–229,1 W. Kedalaman potong 1–2 mm memberikan kompromi terbaik antara efisiensi energi dan kestabilan proses.

Kata kunci: drilling, milling, kedalaman potong, konsumsi daya, efisiensi energi

PENDAHULUAN

Dalam manufaktur modern, efisiensi energi dan produktivitas merupakan indikator penting keberhasilan

proses produksi karena berimplikasi langsung pada biaya operasi, kapasitas, dan daya saing. Operasi pemesinan drilling dan milling merupakan proses dasar untuk menghasilkan komponen presisi pada berbagai sektor

industri. Di bengkel skala kecil, UMKM, dan laboratorium pendidikan, mesin drilling–milling konvensional banyak digunakan karena mampu mengakomodasi operasi drilling dan milling dalam satu platform kerja dengan biaya investasi dan pemeliharaan yang relatif terjangkau. Meski demikian, pemilihan parameter pemotongan pada mesin konvensional sering dilakukan berdasarkan kebiasaan operator, sehingga berpotensi menimbulkan pemborosan energi, beban berlebih pada spindle, dan penurunan kualitas hasil. Oleh karena itu, penentuan parameter tidak boleh hanya mengejar laju produksi, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi energi dan stabilitas proses [1].

Di antara parameter pemotongan, kedalaman potong (*depth of cut*) berperan dominan karena merepresentasikan tebal material yang disayat pada satu lintasan, sehingga memengaruhi volume dan laju pembuangan material. Peningkatan kedalaman potong memperbesar luas penampang geram dan pada akhirnya meningkatkan gaya pemotongan serta temperatur zona potong akibat deformasi plastis dan gesekan pada antarmuka pahat–benda kerja [2]. Secara mekanistik, kenaikan gaya pemotongan meningkatkan kebutuhan torsi spindle, sehingga daya listrik yang diserap sistem penggerak cenderung naik untuk mempertahankan putaran dan kestabilan proses. Dalam kerangka teori pemotongan, daya pemotongan berbanding lurus dengan hasil kali gaya potong dan kecepatan potong; karena itu, perubahan gaya akibat variasi *depth of cut* akan tercermin pada perubahan konsumsi daya [2].

Konsumsi daya pemesinan tidak hanya berdimensi teknis, tetapi juga ekonomi dan lingkungan. Daya yang lebih tinggi berarti biaya listrik lebih besar dan dapat menurunkan efisiensi biaya per unit, khususnya pada operasi berulang dan durasi kerja panjang. Dari perspektif manufaktur berkelanjutan, pengurangan konsumsi energi proses berkontribusi pada penurunan jejak karbon [3]. Pada fasilitas berskala kecil dan laboratorium pendidikan, isu ini semakin relevan karena keterbatasan kapasitas listrik serta kebutuhan praktik yang aman dan stabil; karena itu diperlukan panduan parameter yang sederhana namun berbasis data untuk mencegah beban berlebih dan getaran selama proses drilling dan milling.

Sejumlah studi telah membahas pemodelan dan optimasi konsumsi energi pada proses pemesinan, namun banyak yang berfokus pada mesin CNC atau mesin produksi berdaya besar dan seringkali hanya pada satu jenis proses tertentu. Kajian berbasis pengukuran langsung pada mesin drilling–milling konvensional yang umum di UMKM dan laboratorium masih relatif terbatas, khususnya untuk membandingkan respons konsumsi daya antara proses drilling dan milling serta mengaitkan daya terukur dengan estimasi teoritis pada kondisi operasi nyata. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa hubungan kedalaman potong dan konsumsi daya tidak selalu linear; pada rentang tertentu kedalaman potong dapat meningkatkan produktivitas karena material removal rate meningkat, tetapi setelah melewati batas stabilitas proses konsumsi daya dapat meningkat tajam dan diikuti getaran, keausan alat yang lebih cepat, serta penurunan kualitas permukaan [4]. *Trade-off* ini menegaskan perlunya penentuan titik operasi yang menyeimbangkan efisiensi energi, stabilitas pemotongan, dan mutu hasil.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis secara komparatif pengaruh variasi kedalaman potong 1–5 mm terhadap konsumsi daya listrik pada proses drilling dan milling menggunakan mesin drilling–milling konvensional pada putaran spindle 201 rpm. Eksperimen dilakukan dengan pahat HSS Ø4 mm, dengan material uji berupa pelat baja untuk proses drilling dan balok aluminium untuk proses milling, sementara parameter lain (misalnya feed rate, jenis pahat, dan kondisi pemotongan) dikendalikan agar efek kedalaman potong dapat diisolasi. Daya listrik aktual diukur menggunakan wattmeter pada kondisi tanpa beban dan saat pembebanan, kemudian dibandingkan dengan daya teoritis berdasarkan perhitungan gaya potong dan kecepatan potong. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar rekomendasi kedalaman potong yang efisien dan stabil untuk aplikasi praktik laboratorium serta operasi bengkel/UMKM.

METODE

Metode Alat dan Bahan

Objek utama penelitian adalah mesin drilling–milling sebagai mesin perkakas yang menjalankan proses

drilling dan milling. Untuk mendukung pengujian, digunakan mata bor HSS berdiameter 4 mm pada proses drilling dan pahat end mill HSS berdiameter 4 mm pada proses milling. Pengukuran konsumsi daya listrik mesin dilakukan menggunakan wattmeter yang dipasang pada sumber daya mesin sehingga mampu membaca daya saat kondisi tanpa beban (*idle*) dan saat proses pemotongan berlangsung (*loaded*). Verifikasi dimensi kedalaman pemotongan dilakukan dengan vernier caliper agar kedalaman aktual sesuai dengan perlakuan yang direncanakan. Gaya potong tidak diukur secara langsung menggunakan alat ukur dinamis (*dynamometer*); sebagai gantinya, gaya potong untuk keperluan estimasi daya teoritis dihitung berdasarkan persamaan pemotongan dan parameter proses yang digunakan.

Bahan uji disiapkan sesuai jenis proses yang diuji. Pada proses drilling digunakan pelat baja sebagai spesimen, sedangkan pada proses milling digunakan spesimen aluminium berbentuk balok. Pemilihan dua material ini dilakukan untuk merepresentasikan dua kelas beban kerja yang umum pada bengkel/laboratorium, yaitu beban relatif berat (baja) dan beban relatif ringan (aluminium). Analisis hubungan kedalaman potong terhadap konsumsi daya dilakukan secara terpisah untuk setiap proses, sehingga perbandingan drilling dan milling tidak diinterpretasikan sebagai perbandingan pada material yang identik (apple-to-apple), melainkan sebagai representasi kondisi operasional yang berbeda. Keterbatasan ini dinyatakan untuk mencegah bias interpretasi.

Desain Penelitian, Variabel, dan Kendali

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-eksperimental dengan memvariasikan satu parameter utama, yaitu kedalaman potong (*depth of cut*), untuk melihat dampaknya terhadap konsumsi daya listrik mesin drilling–milling. Kedalaman potong divariasikan pada lima level perlakuan, yakni 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm. Variabel terikat yang diamati adalah daya listrik aktual mesin selama proses pemotongan. Agar pengaruh yang diamati benar-benar berasal dari variasi kedalaman potong, parameter lain dikendalikan, terutama putaran spindle yang ditetapkan konstan pada 201 rpm, penggunaan diameter

pahat 4 mm, serta metode pemasangan pahat dan benda kerja yang dibuat seragam pada setiap perlakuan.

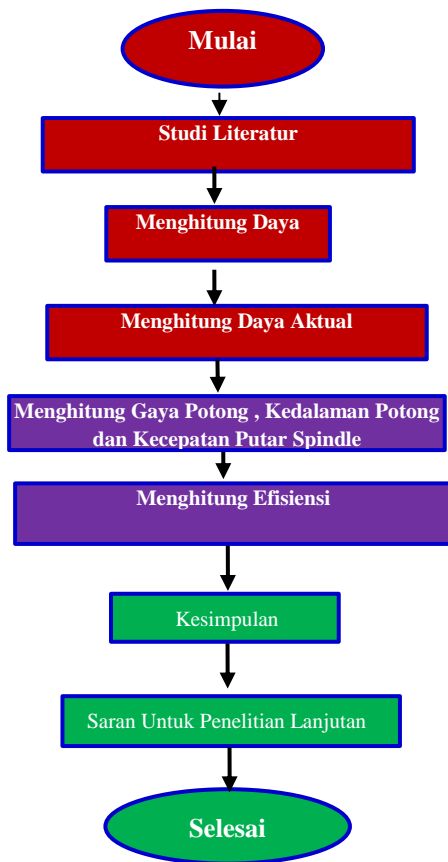
Prosedur Pengujian dan Teknik Pengambilan Data

Pada pengujian drilling, spesimen pelat baja dipersiapkan dan proses pengeboran dilakukan pada kedalaman potong 1–5 mm. Untuk menjaga reliabilitas hasil, setiap level kedalaman potong dilakukan pengulangan minimal dua kali. Pada setiap pengulangan, daya listrik dicatat menggunakan wattmeter pada kondisi tanpa beban dan saat pembebanan. Kedalaman aktual hasil drilling diverifikasi menggunakan vernier caliper untuk memastikan perlakuan sesuai rancangan. Gaya pemotongan atau gaya yang merepresentasikan beban proses dicatat menggunakan neraca pegas dengan titik ukur dan arah pembacaan yang dibuat tetap antar perlakuan agar data dapat dibandingkan. Setelah seluruh level kedalaman selesai, data daya aktual selanjutnya disiapkan untuk dibandingkan dengan estimasi daya teoritis.

Pada pengujian milling, spesimen aluminium balok digunakan dan proses pemotongan dilakukan dengan pahat end mill 4 mm pada kedalaman potong 1–5 mm. Untuk meningkatkan kestabilan data, setiap level kedalaman potong dilakukan tiga kali pengulangan. Prinsip pencatatan daya tetap sama, yakni mencatat daya tanpa beban dan daya berbeban menggunakan wattmeter. Data pendukung berupa verifikasi kedalaman pemotongan dan pengamatan kestabilan proses dicatat bersamaan, sehingga interpretasi “efisiensi daya” tidak hanya berdasarkan angka daya, tetapi juga mempertimbangkan apakah proses berjalan stabil atau menunjukkan gejala ketidakstabilan.

Alur Penelitian

Berikut ini adalah alur penelitian yang akan dilakukan:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Teknik Analisis Data

Analisis data diarahkan untuk menjelaskan pola pengaruh variasi kedalaman potong terhadap konsumsi daya, menilai besarnya kenaikan daya ketika kedalaman potong meningkat, serta menentukan kedalaman potong yang paling efisien tanpa mengorbankan kestabilan proses. Komponen daya akibat pemotongan dihitung sebagai selisih daya berbeban dan daya tanpa beban pada setiap pengulangan.

$$\Delta P = P_{\text{load}} - P_{\text{idle}}$$

Estimasi daya pemesian teoritis dihitung menggunakan hubungan daya pemotongan.

$$N_c = F_c \times v_c$$

Rasio efisiensi berbasis daya didefinisikan untuk membandingkan komponen daya terukur terhadap daya teoritis.

$$\eta = (\Delta P / N_c) \times 100\%$$

Pada setiap level kedalaman potong, data diringkas menggunakan statistik deskriptif (rata-rata dan simpangan baku) untuk menunjukkan kecenderungan perubahan daya dari 1 mm hingga 5 mm pada drilling maupun milling.

Estimasi daya teoritis (N_c) dihitung dengan terlebih dahulu menentukan gaya potong (F_c) secara teoritis menggunakan persamaan pemotongan yang diadopsi dari literatur, berdasarkan parameter proses (misalnya kedalaman potong, diameter pahat, dan kondisi pemotongan). Pendekatan ini dipilih karena gaya potong bersifat dinamis dan tidak diukur dengan dynamometer pada penelitian ini; oleh sebab itu, perbandingan utama yang digunakan adalah antara komponen daya terukur (ΔP) dan estimasi daya teoritis (N_c) secara konsisten pada setiap variasi kedalaman potong.

Untuk memperkuat kesimpulan, hubungan antara kedalaman potong dan komponen daya pemesian (ΔP) dimodelkan menggunakan regresi sederhana. Model awal yang digunakan adalah regresi linear untuk menguji kecenderungan korelasi positif; apabila residu menunjukkan pola non-linear, model dapat diperluas menggunakan regresi polinomial orde-2. Kualitas model dilaporkan menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan parameter kemiringan (slope) sebagai indikator sensitivitas daya terhadap perubahan kedalaman potong. Penentuan kedalaman potong paling efisien ditetapkan berdasarkan level yang menghasilkan ΔP paling rendah atau laju kenaikan daya yang paling terkendali, dengan tetap mempertimbangkan catatan kestabilan proses selama pemotongan.

Untuk memperkuat kesimpulan, hubungan kedalaman potong dan daya dapat dimodelkan menggunakan regresi sederhana, baik linear maupun non-linear, guna menangkap kemungkinan pola yang tidak linier. Jika diperlukan untuk menunjukkan perbedaan yang bermakna antar level kedalaman potong, analisis dapat dilengkapi dengan uji beda antar perlakuan seperti ANOVA

satu arah, dengan catatan asumsi statistik dipenuhi. Penentuan kedalaman potong “paling efisien” ditetapkan berdasarkan level yang memberikan kebutuhan daya terendah atau laju kenaikan daya yang paling terkendali, dengan tetap mempertimbangkan catatan kestabilan proses selama pemotongan, sehingga rekomendasi yang dihasilkan tidak hanya hemat energi tetapi juga layak secara operasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

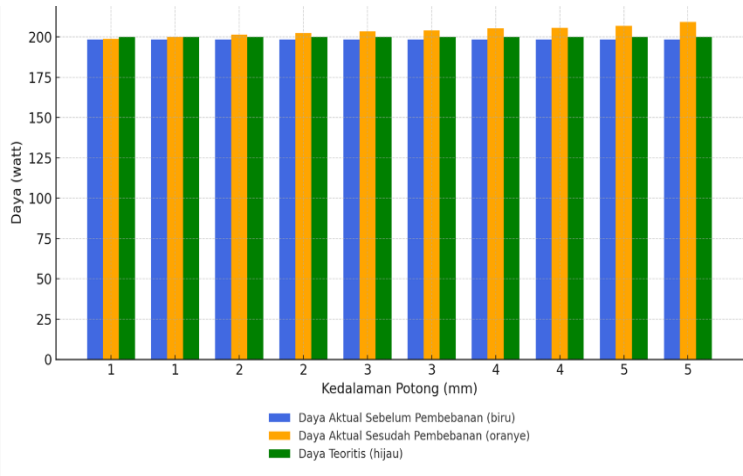
Pengujian Drilling

Pengujian drilling dilakukan pada mesin drilling–milling dengan parameter yang dijaga konstan, yaitu diameter mata bor 4 mm dan putaran spindle sekitar 201 rpm, sementara kedalaman potong divariasikan dari 1 mm sampai 5 mm. Pada kondisi tanpa pembebanan (mesin hidup tanpa pemotongan), daya aktual tercatat stabil sebesar 198,4 W pada seluruh variasi kedalaman potong, menunjukkan bahwa konsumsi daya dasar didominasi oleh kebutuhan mempertahankan putaran spindle dan rugi-rugi sistem ketika tidak ada kontak pemotongan. Ketika pemotongan dimulai, daya aktual sesudah pembebanan meningkat seiring pertambahan kedalaman potong. Pada kedalaman potong 1 mm, daya aktual sesudah pembebanan berada pada kisaran 198,7–199,9 W, sedangkan pada kedalaman potong 5 mm meningkat hingga 206,9–209,2 W. Perubahan ini mengindikasikan bahwa beban pemotongan yang meningkat akibat penambahan kedalaman potong memerlukan daya motor yang lebih besar untuk menjaga proses pemotongan tetap berlangsung dan putaran tetap stabil.

Daya teoritis yang dicantumkan pada hasil drilling berada pada kisaran 200,11–200,13 W dan relatif stabil pada seluruh variasi kedalaman potong. Stabilitas daya teoritis tersebut terjadi karena perhitungan daya teoritis drilling pada dokumen menggunakan gaya potong dan kecepatan potong yang tidak berubah signifikan antarvariasi, sehingga perubahan kedalaman potong tidak memunculkan kenaikan daya teoritis yang besar pada model yang digunakan.

Tabel 1 Data Pengujian Drilling

Putaran spindle sebelum pebebanan (n) (Rpm)	Putaran spindle setelah pembebanan (n) (Rpm)	Kedalaman potong (mm)	Pengujian ke	Diameter mata bor (mm)	Fc (N)	Daya aktual sebelum pembebanan (W)	Daya proses gudi (W)	Daya aktual sesudah pembebanan (W)	Daya teoritis (W)
201	201	1	1	4	41.4	198.4	1.73	198.7	200.13
201	201	1	2	4	41.4	198.4	1.73	199.9	200.13
201	199	2	1	4	41.4	198.4	1.724	201.3	200.12
201	199	2	2	4	41.4	198.4	1.724	202.4	200.12
201	199	3	1	4	41.4	198.4	1.724	203.5	200.12
201	199	3	2	4	41.4	198.4	1.724	204.0	200.12
201	199	4	1	4	41.4	198.4	1.724	205.4	200.12
201	199	4	2	4	41.4	198.4	1.724	205.6	200.12
201	198	5	1	4	41.4	198.4	1.715	206.9	200.11
201	198	5	2	4	41.4	198.4	1.715	209.2	200.11



Gambar 2. Grafik perbandingan daya berdasarkan kedalaman potong

Secara teoritis, peningkatan kedalaman potong cenderung meningkatkan luas penampang geram dan gaya pemotongan, sehingga daya pemotongan yang diperlukan juga meningkat karena daya pemotongan berhubungan dengan kerja mekanik pada zona potong (secara umum dipengaruhi oleh gaya potong dan kecepatan potong) [2]. Temuan pada pengujian drilling menunjukkan pola yang konsisten dengan teori tersebut, karena daya aktual sesudah pembebanan meningkat ketika kedalaman potong dinaikkan dari 1 mm menuju 5 mm.

Perbedaan antara daya aktual dan daya teoritis pada drilling juga dapat dijelaskan secara ilmiah. Model teoritis umumnya merepresentasikan kondisi ideal, sementara kondisi aktual mencakup rugi-rugi mekanis dan elektris seperti gesekan bearing, kerugian transmisi, fluktuasi beban sesaat, serta variasi kondisi pahat dan permukaan benda kerja [5]. Pada data drilling, daya aktual sesudah pembebanan pada kedalaman lebih besar dapat berada beberapa watt di atas daya teoritis, yang mengindikasikan kontribusi rugi-rugi dan dinamika proses pemotongan yang tidak sepenuhnya tercakup dalam perhitungan teoritis yang sederhana

Dari perspektif efisiensi energi, hasil ini juga menegaskan bahwa konsumsi energi pemesian bukan hanya “energi pemotongan”, tetapi mencakup porsi besar energi dasar (*idle/base power*) yang relatif konstan, kemudian ditambah komponen energi proses yang meningkat ketika beban pemotongan meningkat [5]. Hal ini penting untuk interpretasi: pada penelitian ini, daya dasar sekitar 198,4 W menjadi komponen dominan, sedangkan peningkatan daya karena pemotongan muncul sebagai tambahan di atas daya dasar tersebut.

Pengujian Milling

Pengujian milling dilakukan menggunakan pahat end mill diameter 4 mm dengan jumlah gigi 4 (4 *tooth*), putaran spindle sekitar 201 rpm, serta parameter pemakanan yang dihitung dari pengamatan kecepatan pemakanan meja pada dokumen. Kedalaman potong divariasikan dari 1 mm sampai 5 mm. Pada kondisi tanpa pembebanan, daya aktual tercatat stabil sebesar 198,4 W pada seluruh variasi kedalaman potong, sama seperti pada pengujian drilling

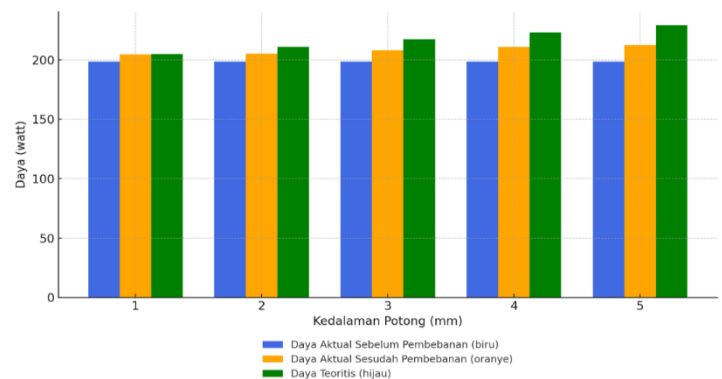
Pada kondisi berbeban, daya aktual sesudah pembebanan meningkat dari sekitar 204,4 W pada kedalaman potong 1 mm menjadi sekitar 212,4 W pada kedalaman potong 5 mm. Dengan demikian, peningkatan kedalaman potong menghasilkan kenaikan daya aktual yang terukur dan menunjukkan bahwa semakin besar volume material yang disayat, semakin besar pula kebutuhan daya untuk mempertahankan pemotongan. Berbeda dari drilling, daya teoritis milling pada dokumen meningkat cukup tajam ketika kedalaman potong dinaikkan, yakni dari sekitar

204,84 W pada 1 mm menjadi sekitar 229,1 W pada 5 mm. Kenaikan ini terjadi karena perhitungan teoritis milling

Tabel 2 Data Pengujian Milling

Putaran spindle sebelum pembebanan (n) [Rpm]	Putaran spindle setelah pembebanan (n) [Rpm]	Kedalaman potong [mm]	Kecepatan potong (v) [m/min]	Gaya potong (Fz) [N]	Gaya potong (Fy) [N]	Daya pemakanan (Nc) [W]	Daya pemakanan (Nf) [W]	Daya aktual sebelum pembebanan [W]	Daya aktual sesudah pembebanan [W]	Daya teoritis [W]
	201	1	2.52	35.7	148	6.21	0.238		204.4	204.84
	201	2	2.52	35.7	296	12.43	0.238		205.1	211.06
201	201	3	2.52	35.7	444	18.64	0.238	198.4	207.9	217.27
	198	4	2.48	35.7	592	24.46	0.238		210.8	223.09
	198	5	2.48	35.7	740	30.5	0.238		212.4	229.1

Secara konsep, milling memiliki mekanisme pemotongan yang menimbulkan gaya potong periodik dan dapat meningkatkan kebutuhan daya ketika kedalaman potong bertambah, karena *chip load* dan gaya pemotongan meningkat pada kondisi parameter lain tetap [2].



Gambar 3. Grafik perbandingan daya berdasarkan kedalaman potong

Perhitungan daya pada kedalaman potong 2 mm

- Kecepatan potong (v)

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{\pi \times D \times n}{1000} \\
 &= \frac{3.14 \times 4 \text{ mm} \times 201 \text{ rot/menit}}{1000} \\
 &= 2.52 \text{ m/menit}
 \end{aligned}$$

➤ Gaya potong (F_v)

$$\begin{aligned} F_v &= k_c \times a_p \times f \times z \\ &= 370 \text{ N/mm}^2 \times 2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm / tooth} \times 4 \\ &\quad \text{tooth} \\ &= 296 \text{ Newton} \end{aligned}$$

➤ Daya Potong (N_c)

$$\begin{aligned} N_c &= \frac{F_v \times v}{60} = \frac{296 \text{ N} \times 2.52 \text{ m / min}}{60} \\ &= 12.43 \text{ watt} \end{aligned}$$

➤ Daya Pemakanan (N_f)

$$\begin{aligned} N_f &= \frac{F_z \times v_f}{60} \\ &= \frac{35.7 \text{ N} \times 0.4 \text{ mm / min}}{60} = 0.238 \text{ watt} \end{aligned}$$

Pola kenaikan daya aktual sesudah pembebanan dari 1 mm ke 5 mm pada data milling konsisten dengan ekspektasi teoritis tersebut. Namun, hasil menunjukkan daya teoritis lebih tinggi daripada daya aktual sesudah pembebanan pada kedalaman besar. Secara metodologis, deviasi ini lazim terjadi jika koefisien gaya potong (k_c) dan asumsi keterlibatan pahat (*engagement*) pada model teoritis tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual, misalnya adanya variasi chip thickness efektif, runout pahat, perubahan kondisi pemakanan aktual, atau ketidaktepatan pemodelan gaya rata-rata selama satu siklus pemotongan [2]. Literatur optimasi energi pemesinan juga menunjukkan bahwa hasil eksperimen sering berbeda dari estimasi model sederhana sehingga diperlukan kalibrasi model berbasis data aktual mesin untuk meningkatkan akurasi prediksi konsumsi energi [5].

Nilai daya teoritis juga mengalami kenaikan dari 204,84 watt pada kedalaman potong 1 mm menjadi 229,1 watt pada kedalaman potong 5 mm. Daya teoritis ini diperoleh melalui perhitungan berdasarkan perkalian gaya potong teoritis dengan kecepatan potong dan daya pemakanan, yang menggambarkan kebutuhan daya ideal tanpa memperhitungkan kerugian mekanis di lapangan

seperti rugi gesekan, getaran mesin, kondisi permukaan benda kerja, atau ketidaksempurnaan bentuk pahat.

Secara umum, daya teoritis cenderung lebih tinggi dibandingkan daya aktual sesudah pembebanan. Fenomena ini terjadi karena perhitungan teoritis mengasumsikan kondisi ideal, sedangkan kondisi praktik proses milling memiliki berbagai faktor penurunan efisiensi, misalnya getaran, slip, dan ketidaksempurnaan interaksi antara pahat dan benda kerja. Faktor-faktor ini membuat daya aktual sesudah pembebanan sedikit lebih rendah dibandingkan perkiraan teoritisnya.

Dengan demikian, pola hasil data memperlihatkan bahwa semakin besar kedalaman potong, semakin tinggi pula daya aktual sesudah pembebanan dan daya teoritis. Kenaikan daya ini adalah konsekuensi logis dari bertambahnya gaya potong yang terjadi ketika volume material yang disayat semakin besar. Perbedaan antara nilai daya teoritis dan daya aktual sesudah pembebanan menjadi tolok ukur untuk menilai efisiensi sistem mesin milling, sekaligus menjadi dasar evaluasi jika ingin meningkatkan kualitas proses pemotongan dan mengurangi kerugian energi pada proses produksi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan maka dapat diambil beberapa kesimpulan berikut ini:

- Pengaruh variasi kedalaman potong terhadap konsumsi daya pada proses drilling menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman potong, semakin tinggi daya aktual sesudah pembebanan yang dibutuhkan. Meskipun daya aktual sebelum pembebanan stabil di kisaran 198,4 watt, daya aktual sesudah pembebanan naik secara bertahap seiring meningkatnya kedalaman potong. Nilai daya teoritis pada proses drilling juga cenderung meningkat, menegaskan bahwa volume material yang disayat semakin besar akan meningkatkan kebutuhan gaya potong, sehingga konsumsi daya pun bertambah.
- Variasi kedalaman potong terhadap konsumsi daya pada proses milling juga memperlihatkan pola serupa, di mana daya aktual sesudah pembebanan naik dari 204,4 watt pada kedalaman potong 1 mm hingga mencapai 212,4 watt pada kedalaman potong 5 mm.

Nilai daya teoritis milling bahkan lebih tinggi lagi, meningkat dari 204,84 watt hingga 229,1 watt, menggambarkan kebutuhan daya ideal yang sebanding dengan gaya potong yang lebih besar pada kedalaman pemotongan lebih dalam. Fenomena ini memperkuat fakta bahwa semakin dalam pemotongan, semakin tinggi konsumsi daya akibat bertambahnya beban potong, gaya gesek, dan gaya dorong dalam proses pemotongan logam..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Azwinur. Analisa Perhitungan Waktu dan Biaya Produksi pada Proses Drilling. LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana. 2015.
- [2] Kalpakjian S, Schmid SR. Manufacturing Engineering and Technology. 2014.
- [3] Rajemi MF, Mativenga PT, Aramcharoen A. Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. Journal of Cleaner Production. 2010;18(10):1059–1065
- [4] Zhou L, dkk. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: literature review. Journal of Cleaner Production. 2016.
- [5] Zhao GY, dkk. Energy consumption in machining: classification, prediction, and reduction (review). Energy. 2017.
- [6] Bhushan RK, dkk. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption. Journal of Cleaner Production. 2013
- [7] Chen X, dkk. Optimization of cutting parameters with a sustainable perspective: reduction of electrical energy in milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018
- [8] Kalpakjian S, Schmid SR. Manufacturing Engineering and Technology. Bab pemotongan logam: gaya potong dan daya pemotongan.
- [9] Rajemi MF, Mativenga PT, Aramcharoen A. Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. Journal of Cleaner Production. 2010.
- [10] Bhushan RK, dkk. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption (dan kaitannya dengan parameter pemotongan). Journal of Cleaner Production. 2013
- [11] Jabri A, dkk. Optimization techniques for energy efficiency in machining operations: review. 2023.