



ANALISIS UMUR PAHAT *END MILL SOLID CARBIDE* PADA CNC *MILLING SIEMENS* DENGAN VARIASI PUTARAN SPINDLE DAN KEDALAMAN POTONG MATERIAL ST 70 DALAM PENGONDISIAN *DRY CUTTING* DI PT. X

Riswanda Ma'ruf Ardiansyah¹, Moh. Nor Ali Aziz², I Made Kastiawan³, Moh Mufti⁴

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya,
Indonesia

email:

ardiansyahmaruf72@gmail.com

aliaziz@untag-sby.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan teknologi komputer saat ini mengalami kemajuan sangat pesat dengan mengaplikasikannya ke dalam alat-alat mesin perkakas, yang mana hasil dari perpaduan antara teknologi komputer dan teknologi mekanik inilah yang selanjutnya disebut dengan *Computer Numerical Control* (CNC). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis umur pahat *end mill* berbahan *solid carbide* pada proses pemesinan CNC *Milling Siemens* terhadap material ST 70 dalam kondisi pemotongan kering (*dry cutting*). Penelitian menunjukkan bahwa nilai VB untuk kedalaman pemakanan 3 mm dengan putaran spindle 955 Rpm, 1194 Rpm, dan 1433 Rpm berturut-turut adalah 1,320 mm, 1,350 mm, dan 1,546 mm dengan umur pahat yang diperoleh sebesar 0,530 menit, 0,424 menit, dan 0,303 menit. Berdasarkan hasil tersebut, maka putaran spindle yang lebih rendah menghasilkan umur pahat yang lebih panjang, serta kedalaman potong yang terlalu besar meningkatkan beban pemotongan dan temperatur, sehingga mempercepat laju keausan pahat.

Kata kunci: *CNC* , *End Mill Solid Carbide*, *Umur Pahat*, *Dry Cutting*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komputer telah berlangsung dengan sangat cepat. Komputer telah diterapkan pada mesin perkakas, seperti mesin bubut, mesin frais (*milling*), mesin skrap, dan mesin bor (*drilling*). Hasil dari kombinasi teknologi komputer dan teknologi mekanik ilmiah ini dikenal sebagai *Computer Numerical Control* (CNC). Secara umum, konstruksi dan sistem kerja CNC dirancang untuk mensinkronkan kinerja antara komputer dan sistem mekaniknya. Proses kerja mesin CNC memiliki keunggulan dibandingkan mesin konvensional biasa, termasuk ketelitian ukuran (*accrue*), presisi (*precision*), efisiensi kerja, dan kapasitas produksi [1].

Kualitas hasil pemesinan mesin CNC *milling* sangat dipengaruhi oleh parameter pemesinan yang diterapkan, seperti kecepatan pemotongan (*cutting speed*), laju pemakanan (*federate*), kedalaman potongan (*depth of cut*), jenis bahan, karakteristik pisau pemotong, dan penggunaan pendingin. Penggunaan pisau pemotong yang tepat dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses pemesinan, terutama dalam mengoptimalkan waktu dan biaya produksi [2]. Kemudian, dalam hal kedalaman pemotongan, peningkatan kedalaman pemotongan akan menghasilkan gaya tekan yang lebih besar dan meningkatkan gesekan pada permukaan pemotong, serpihan, dan benda kerja. Jika proses pemesinan (*milling*) berlangsung

cukup lama hingga bentuk pada permukaan benda kerja terbentuk sepenuhnya, keausan pada mata pahat pemotong juga akan terjadi [3].

Baja ST 70 termasuk dalam kategori baja karbon sedang dengan kandungan karbon antara 0,25% hingga 0,6%. Kandungan ini membuat baja ST 70 lebih keras dan kuat dibandingkan baja dengan kandungan karbon rendah, namun tetap memiliki tingkat fleksibilitas tertentu. Jumlah karbon sedang memberikan ketahanan aus yang baik, sehingga ideal untuk bagian yang bergerak. Baja ST 70 cocok untuk komponen yang memerlukan kekuatan tinggi, terutama yang mengalami beban mekanis secara terus-menerus. Namun, baja ST 70 rentan terhadap korosi jika tidak dilapisi dengan benar. Selain itu, karena sifat baja ST 70 yang lebih keras, diperlukan teknik khusus untuk proses fabrikasi seperti pembentukan atau pengelasan [4].

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Aziz et al., [5] pengaruh kecepatan spindle pada metode pemotongan kering (*dry cutting*) terhadap kekasaran permukaan baja ST 60 dan masa pakai mata pahat DCMT 070204 menunjukkan bahwa umur pahat tertinggi terjadi pada kecepatan putar 500 Rpm dengan nilai 0,725 menit dan umur pahat terendah terjadi pada kecepatan putar 1200 Rpm dengan nilai 0,182 menit. Namun, proses *dry cutting* juga memiliki kelemahan, yaitu dapat menyebabkan temperatur yang sangat tinggi pada benda kerja dan mata pahat, sehingga menimbulkan kekasaran permukaan dan mempercepat keausan pada mata pahat.

Sementara itu, hasil pengujian yang dilakukan oleh Ivan Andir et al., [6] pada pemesinan kering baja AISI 4140 dengan kekerasan 25-32 HRC menggunakan *end mill* HSS Cobalt M42 dapat dirangkum sebagai berikut: Pada kecepatan pemotongan (v) = 755 m/menit, dengan $f = 0,5$ mm/putaran dan $a = 0,5$, nilai rata-rata hc yang diperoleh adalah 0,71 mm. Pada kecepatan pemotongan (v) = 274 m/menit, nilai hc terbaik mencapai 0,69 mm setelah waktu pemotongan 30 menit. Studi ini menunjukkan bahwa ketebalan serpihan pada setiap kondisi pemotongan tergolong rendah atau kurang baik, karena tidak mendekati nilai f (mm/putaran) yang diharapkan, yaitu sebesar 0,5 mm pada pemotongan minimum.

Berdasarkan latar belakang diatas, penelitian ini bertujuan untuk memahami pengaruh variasi kecepatan putaran spindle dan kedalaman pemotongan terhadap keausan umur pahat *solid carbide* menggunakan material ST 70 dengan metode *dry cutting*. Dengan mempelajari variasi ini, kita dapat menentukan variasi putaran spindle dan kedalaman potong dalam pengondisian *dry cutting*, kombinasi parameter terbaik untuk memaksimalkan efisiensi umur pahat dalam proses pemesinan CNC *milling* pada tipe mesin *siemens*.

TINJAUAN PUSTAKA

Mesin Frais (*Milling*) Konvensional

Mesin frais (*milling*) adalah mesin yang digunakan untuk meratakan permukaan, membuat alur, membuat roda gigi, dan memperbesar lubang. Prinsip kerja mesin frais melibatkan pahat atau pisau silinder yang bergerak secara mendatar, tegak lurus, atau berputar dengan kecepatan lambat. Mesin frais hadir dalam berbagai model, seperti mesin frais tegak, universal, industri, datar, dan portal. Ukuran mesin frais ditentukan oleh kapasitas panjang langkah meja dalam arah mendatar, melintang, dan ketinggian gerakan lutut, dan biasanya dikombinasikan dengan daya motor yang dimilikinya [7].

Mesin CNC *Milling*

Mesin CNC frais (*milling*) adalah jenis mesin CNC yang dioperasikan dengan program komputer, karena fungsinya sebagai pusat kendali mesin. Program ini mengontrol pergerakan sumbu X dan Y pada meja mesin serta spindle, yang berfungsi sebagai rumah pemotong. Sistem komputer pada mesin frais CNC memungkinkan operasi otomatis dengan mengatur

pergerakan sesuai instruksi. Setiap tahap pemotongan dan pengeboran material objek kerja dilakukan berdasarkan perintah yang telah diprogram sebelumnya [8].

CNC Milling Siemens

CNC *Milling Siemens* adalah mesin frais otomatis yang dikendalikan oleh sistem numerik berbasis komputer *siemens*, seperti sinumerik 828D atau 840D. Mesin ini berfungsi untuk memotong atau membentuk benda kerja dengan presisi tinggi berdasarkan program yang dimasukkan ke dalam kontrol numerik, menggunakan G-code atau bahasa pemrograman lainnya.

Parameter Pengoperasian Mesin *Milling*

Parameter pemotongan dalam proses frais mencakup informasi dasar seperti perhitungan, rumus, dan tabel-tabel yang berkaitan dengan teknologi pemotongan. Parameter ini sangat penting agar produksi berjalan sesuai rencana. Beberapa parameter yang harus diperhatikan antara lain kecepatan potong, kecepatan putar spindle, kedalaman pemakanan, gerak makan pergigi, kecepatan pembentukan geram, dan waktu pemesinan.

Kecepatan Potong (*Cutting Speed*)

Kecepatan potong (Cs) adalah kemampuan alat pemotong untuk memotong material dengan aman dan menghasilkan geram dalam satuan panjang per waktu (meter per menit atau kaki per menit). Dalam gerakan putar seperti pada mesin frais, kecepatan pemotongan dihitung dengan mengalikan keliling benda kerja dengan jumlah putaran (n), atau:

$$Cs = \pi \cdot d \cdot n \text{ (meter/menit)} \quad (1)$$

Kecepatan Putaran Mesin (Rpm)

Kecepatan putaran mesin merujuk pada kemampuan mesin untuk melakukan pemotongan dalam satu menit. Kecepatan pemotongan untuk setiap jenis material telah ditetapkan sesuai dengan standar. Komponen yang dapat disesuaikan dalam proses pemotongan adalah kecepatan mesin atau benda kerja. Oleh karena itu, rumus untuk menghitung kecepatan adalah:

$$n = \frac{Cs}{\pi \cdot d} \text{ Rpm} \quad (2)$$

Kecepatan Pemakanan (F)

Kecepatan pemakanan untuk proses pengasaran biasanya diatur tinggi karena tidak memprioritaskan permukaan yang halus. Sebaliknya pada proses *finishing*, kecepatan pemakanan diturunkan untuk memperoleh kualitas kahalus yang baik dan hasil lebih halus. Rumus yang dipakai untuk mencari kecepatan pemakanan adalah:

$$F = f \cdot n \quad (3)$$

Material Benda Kerja

Baja ST 70 merupakan jenis baja dengan kandungan karbon tinggi yang memiliki kekuatan tarik sekitar 700 MPa. Baja ini tergolong dalam baja struktural dan banyak dimanfaatkan dalam bidang konstruksi serta industri manufaktur yang memerlukan material.

Pahat *End Mill Solid Carbide*

Pahat *end mill* merupakan alat potong yang digunakan pada mesin *milling* untuk membentuk permukaan atau kontur sebuah benda kerja. *End mill* dari *carbide solid* sangat populer untuk pemesinan kecepatan tinggi dan presisi tinggi. Spesifikasi yang digunakan untuk pahat insert ISO P10 pahat TTX–ISO P10 adalah jenis pahat karbida kategori *hard grade*

berdasarkan standar ISO 513, yang dirancang khusus pemesinan material baja seperti baja karbon, baja campuran, dan baja perkakas. Pahat P10 memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi, tapi ketangguhannya rendah, jadi lebih cocok dipakai untuk *finishing* dan semi-*finishing* dengan kedalaman potong ringan hingga sedang dan kebutuhan kualitas permukaan yang tinggi.

Umur Keausan Pahat

Umur keausan pahat dalam pemesinan CNC *milling* berdasarkan pada periode atau waktu kerja di mana sebuah alat potong (pahat) bisa bertahan sebelum mengalami tingkat keausan tertentu yang memengaruhi kinerjanya. Kausan alat pahat adalah perubahan fisik pada permukaan alat akibat interaksi antara alat, benda kerja, dan serpihan material yang terbentuk selama proses pemotongan. Kausan ini bisa mempengaruhi kualitas, akurasi, dan efisiensi proses *machining*.

Tabel 1. Batas keausan maksimum [9]

| Jenis pahat | Keausan (VB = mm) | Jenis pahat | Keausan (VB = mm) |
|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| TFF | 0.2 | TR | 0.3-0.4 |
| TTX | 0.3-0.4 | THF | 0.4 |
| TTS | 0.4-0.5 | AT 10 | 0.5 |
| TTR | 0.6 | AT 15/THM | 0.6 |
| TG/TN | 0.3-0.4 | TG/TN | 0.6 |

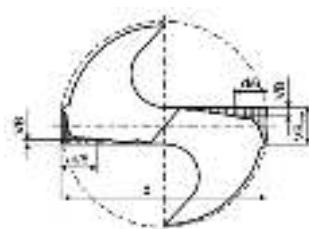
Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa nilai eksponen dan konstanta dalam rumus umur alat pahat Taylor dapat bervariasi, tergantung pada kualitas alat dan jenis benda kerja. Secara umum, pabrikan alat menyediakan data umur alat (data pemesinan) sesuai dengan jenis alat yang mereka produksi dan jenis penggunaannya. Data ini sesuai dengan rumus Taylor, yang berbentuk:

$$vT^n = C \times f^{-p} \times a^{-q} \quad (4)$$

Dengan demikian, bahwa rumus pahat apabila telah diketahui nilai dari tabel tersebut diatas adalah:

$$\text{umur pahat} = \left(\frac{C \times f^{-p} \times a^{-q}}{v} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Gambar dibawah ini menunjukkan keausan tepi pahat (*flank wear*) yang digunakan untuk mengukur dan mengevaluasi kondisi keausan pahat dalam proses pengeboran.



Gambar 1. Keausan Tepi (VB) [10]

Metode *Dry Cutting*

Metode *dry cutting* dalam proses pemesinan adalah teknik pemotongan yang dilakukan tanpa menggunakan pendingin cairan atau pelumas saat proses pemotongan. Dalam metode ini, panas yang dihasilkan dari gesekan antara pemotong dan benda kerja dilepaskan secara alami melalui pahat, geram, dan aliran udara lingkungan sekitar. Tujuan dari penerapan *dry cutting* ialah mengurangi penggunaan pendingin fluida yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan, biaya tambahan, dan risiko kesehatan bagi operator. Namun, metode ini membutuhkan pemilihan material pahat dengan ketahanan panas dan aus yang baik, karena

suhu pemotongan yang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan pemesinan menggunakan pendingin. Jadi, *dry cutting* biasanya digunakan dalam kondisi pemotongan tertentu dan dengan bahan yang cocok agar kualitas permukaan dan umur alat potong tetap optimal.

Keuntungan dari menggunakan metode *dry cutting* adalah ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah cair dari pendingin cairan; ekonomis karena bisa mengurangi biaya untuk pembelian, perawatan, dan pembuangan pendingin cairan; serta berdampak positif bagi kesehatan operator karena menghindari paparan bahan kimia berbahaya dari pendingin cairan.

PROSEDUR EKSPERIMENTAL

Penelitian ini merupakan penelitian literatur dan eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi putaran spindle dan kedalaman potong terhadap umur pakai *end mill solid carbide* dalam pemesinan CNC *Milling* pada kondisi pemotongan kering (*dry cutting*). Variabel-varibel penelitian yang digunakan dalam studi ini meliputi:

1. Variabel Bebas
 - a. Putaran spindle (Rpm) : 955 Rpm, 1194 Rpm, dan 1433 Rpm
 - b. Kedalaman potong (*depth of cut*) : 3mm, 5mm, dan 7mm.
2. Variabel Terikat: Keausan pahat (VB maksimal).
3. Variabel Kontrol
 - a. Jenis material : Baja ST 70
 - b. Jenis Pahat : *Solid carbide*
 - c. Kondisi pemotongan : *Dry cutting*

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mesin CNC *Siemens*, monitor mesin CNC, stopwatch/timer, dan peralatan pelindung kerja. Sementara itu, untuk pengujian keausan, digunakan mikroskop digital/alat pengukur keausan. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi baja ST 70 dan *end mill solid carbide* berdiameter 20 mm, yang digunakan tanpa pendingin cairan.

Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data dikumpulkan melalui pengamatan langsung dan pengukuran keausan alat potong. Analisis dilakukan dengan membuat grafik yang menunjukkan hubungan antara keausan dan waktu pemotongan untuk setiap variasi parameter. Umur pahat ditentukan berdasarkan batas keausan flank (VB) maksimum sesuai dengan standar ISO (batas VB maksimum yang digunakan dalam studi ini adalah 0,4 mm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Parameter Pemotongan Pada Eksperimen

Eksperimen ini dilakukan untuk menguji umur pahat *end mill solid carbide* dalam pemesinan CNC *milling* menggunakan bahan baja ST 70, dengan variasi kecepatan spindle (955 RPM, 1194 RPM, dan 1433 RPM) dan kedalaman potong (3 mm, 5 mm, dan 7 mm) dalam kondisi *dry cutting*. Analisis data kemudian dilakukan untuk melihat hubungan antara kecepatan pemotongan, waktu pemotongan, dan tingkat keausan (VB), serta untuk menentukan parameter optimal yang memberikan umur alat terpanjang. Berikut ini adalah parameter pemotongan yang digunakan untuk pengukuran keausan pahat, antara lain:

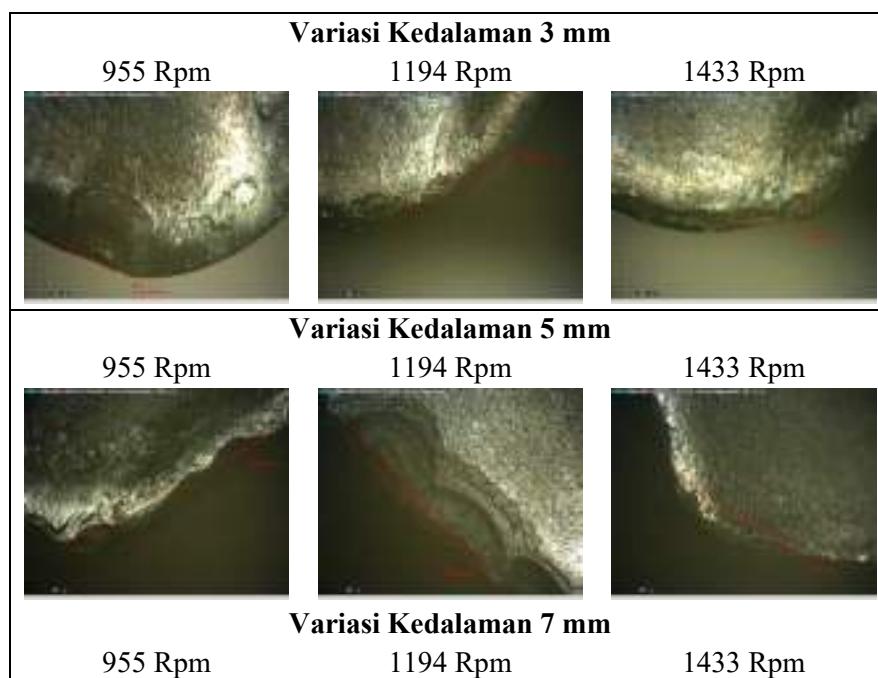
Tabel 2. Parameter pemotongan

| Parameter | Simbol | Nilai |
|----------------------------|--------|-----------------------------|
| Diameter pahat | D | 20 mm |
| Luas pemotongan | L | 5024 mm ² |
| <i>Feed per revolution</i> | F | 0.2 mm/put |
| Putaran spindle | N | 955 Rpm, 1194 Rpm, 1433 Rpm |
| Kedalaman potong | A | 3 mm, 5 mm, 7 mm |
| Material benda kerja | - | ST 70 |
| Kondisi pemotongan | - | <i>dry cutting</i> |

4.2. Data Hasil Pengukuran Keausan Pahat

Data keausan alat pahat diperoleh dengan mengukur alat pahat setelah digunakan dalam kondisi pemotongan kering (*dry cutting*), sehingga mencerminkan keausan yang terjadi selama proses pemesinan. Pengukuran ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk menganalisis bagaimana parameter pemesinan memengaruhi keausan alat pahat dan untuk mengevaluasi kinerja dan umur pakai alat pahat yang digunakan. Variasi kedalaman pemotongan yang digunakan dalam studi ini adalah 3 mm, 5 mm, dan 7 mm, sedangkan variasi kecepatan spindle adalah 955 Rpm, 1194 Rpm, dan 1433 Rpm. Kemudian, uji keausan dilakukan tiga kali untuk setiap variasi, menghasilkan 27 set data pengukuran keausan pahat (VB). Data tersebut kemudian di rata-rata untuk setiap variasi sebagai dasar analisis. Berikut adalah tabel yang menunjukkan pengukuran keausan alat untuk setiap variasi, dihitung dengan satuan yang disesuaikan. Karena kecepatan pemotongan (Cs) diberikan dalam meter per menit, sementara diameter alat atau benda kerja dalam milimeter, rumus disesuaikan menjadi:

$$n = \frac{1000 \cdot Cs}{\pi \cdot d} \text{ Rpm} \quad (6)$$





Gambar 2. Gambar Hasil Pengukuran Keausan Pahat

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran Keausan Pahat (VB)

| Kedalaman Pemakanan | N (Rpm) | VB (mm) | Rata-rata (mm) |
|---------------------|---------|---------|----------------|
| 3 mm | 955 | 0,826 | 1,320 |
| | 955 | 1,057 | |
| | 955 | 2,079 | |
| 5 mm | 1194 | 1,516 | 1,350 |
| | 1194 | 1,941 | |
| | 1194 | 0,595 | |
| | 1433 | 0,858 | 1,546 |
| | 1433 | 1,684 | |
| | 1433 | 2,098 | |
| 7 mm | 955 | 1,611 | 1,075 |
| | 955 | 0,934 | |
| | 955 | 0,681 | |
| | 1194 | 2,229 | 1,979 |
| | 1194 | 1,894 | |
| | 1194 | 1,815 | |
| | 1433 | 1,566 | 1,536 |
| | 1433 | 1,710 | |
| | 1433 | 1,334 | |

Diperoleh nilai rata-rata VB seperti pada tabel diatas. Dari nilai rata-rata tersebut, selanjutnya dilakukan analisis untuk menghitung umur keausan pahat. Berikut merupakan hasil dari perhitungan umur keausan pahat:

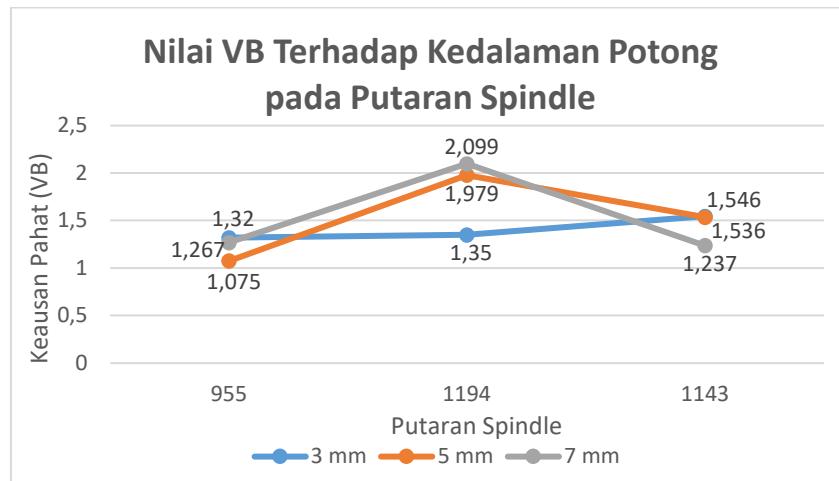
Tabel 4. Hasil Perhitungan Umur Keausan Pahat

| No. | Kedalaman Pemakanan (mm) | N (Rpm) | T _m (menit) | T teoritis (menit) | T aktual (menit) | Validasi error (%) |
|-----|--------------------------|---------|------------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 1. | 3 | 955 | 1,75 | 1,00005 | 0,530 | 88,69% |
| 2. | 3 | 1194 | 1,43 | 1,00005 | 0,424 | 135,86% |
| 3. | 3 | 1433 | 1,17 | 1,00005 | 0,303 | 230,02% |
| 4. | 5 | 955 | 1,75 | 0,99996 | 0,651 | 53,62% |
| 5. | 5 | 1194 | 1,43 | 0,99996 | 0,289 | 246,0% |
| 6. | 5 | 1433 | 1,17 | 0,99996 | 0,305 | 227,97% |
| 7. | 7 | 955 | 1,75 | 0,99995 | 0,552 | 80,86% |
| 8. | 7 | 1194 | 1,43 | 0,99995 | 0,273 | 266,30% |
| 9. | 7 | 1433 | 1,17 | 0,99995 | 0,378 | 164,54% |

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, umur alat pahat teoritis (T teoritis) dari persamaan Taylor bernilai relatif konstan, sekitar 1 menit untuk semua variasi parameter pemotongan. Hal ini menunjukkan bahwa model Taylor hanya mewakili kondisi ideal karena hanya mempertimbangkan kecepatan pemotongan dan tidak memperhitungkan faktor-faktor nyata seperti suhu tinggi, getaran, dan metode pemotongan kering (*dry cutting*). Di sisi lain, umur alat pahat yang sebenarnya (T aktual) dari eksperimen menunjukkan nilai yang lebih rendah dan lebih bervariasi tergantung pada kecepatan spindle dan kedalaman pemotongan.

Pada kedalaman potong 3 mm, T aktual yang tercatat ialah 0,530 menit pada kecepatan putaran spindle 955 Rpm, kemudian berkurang menjadi 0,424 menit pada putaran spindle 1194 Rpm, dan 0,303 menit pada putaran spindle 1433 Rpm, sehingga dapat dilihat bahwa T aktual lebih rendah daripada waktu teoritis. Pada kedalaman pemotongan 5 mm, T aktual adalah 0,651 menit pada putaran spindle 955 Rpm, kemudian turun tajam menjadi 0,289 menit pada putaran spindle 1194 Rpm dan 0,305 menit pada putaran spindle 1433 Rpm, menunjukkan penurunan signifikan dalam umur alat pahat dibandingkan dengan nilai T teoretis. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman potong meningkatkan beban mekanis serta mempercepat keausan alat pahat. Untuk kedalaman potong 7 mm, umur alat pahat aktual adalah 0,552 menit pada kecepatan spindle 955 Rpm, 0,273 menit pada putaran spindle 1194 Rpm, dan 0,378 menit pada putaran spindle 1433 Rpm. Meskipun ada peningkatan kecil pada kecepatan tertinggi, nilai-nilai ini masih jauh lebih rendah daripada nilai T teoritis. Umur alat terpanjang selama proses pemesinan *milling* metode *dry cutting* dicapai pada kedalaman potong 5 mm dengan kecepatan spindle 955 Rpm, berlangsung selama 0,651 menit. Sementara itu, umur alat pahat terpendek terjadi pada kedalaman potong 7 mm dengan kecepatan spindle 1194 Rpm, berlangsung selama 0,273 menit hingga mencapai batas keausan alat maksimum.

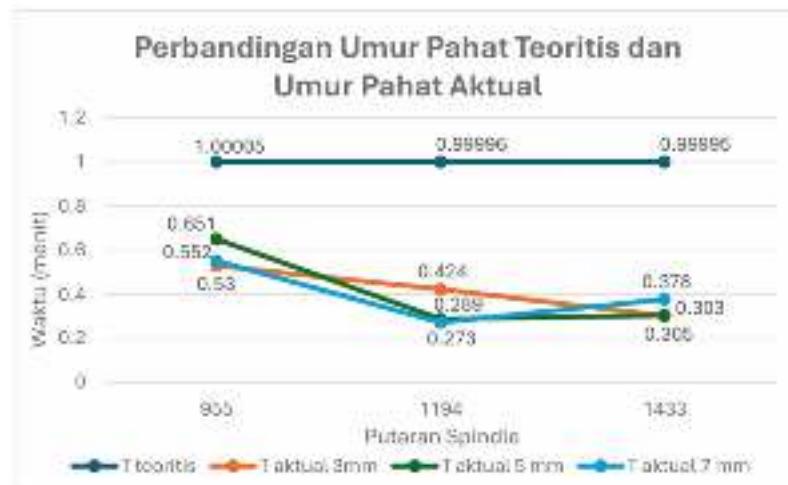
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa umur alat pahat teoritis selalu lebih besar daripada umur alat aktual dalam semua kondisi pemotongan. Semakin tinggi kecepatan spindle dan semakin besar pula dalam pemotongan, semakin besar selisih antara umur alat T teoritis dan T aktual. Hal ini membuktikan bahwa Persamaan Taylor cenderung memberikan perkiraan yang terlalu optimis karena tidak memperhitungkan efek suhu tinggi dari pemotongan kering, peningkatan gaya pemotongan, dan mekanisme keausan. Oleh karena itu, umur alat pahat yang sebenarnya dalam proses pemesinan CNC *milling* baja ST 70 dengan pemotongan kering hanya mencapai sekitar 25–65% dari umur alat pahat teoritis. Itulah mengapa umur alat teoritis sebaiknya digunakan sebagai panduan kasar, sementara penilaian yang lebih akurat harus didasarkan pada eksperimen dan pengamatan langsung terhadap keausan alat pahat.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Nilai VB Terhadap Kadalaman Potong pada Putaran Spindle

Grafik yang menunjukkan hubungan antara keausan tepi pahat (VB) dan kedalaman pemotongan pada kecepatan spindle digunakan untuk menganalisis bagaimana variasi perubahan kedalaman pemotongan mempengaruhi keausan alat pahat. Grafik diatas menunjukkan nilai rata-rata keausan alat untuk pemotongan kering pada setiap kedalaman. Nilai VB untuk kedalaman pemakanan 3 mm dengan putaran spindle 955 Rpm, 1194 Rpm, dan 1433 Rpm berturut-turut adalah 1,320 mm, 1,350 mm, dan 1,546 mm. Nilai VB untuk kedalaman pemakanan 5 mm dengan putaran spindle 955 Rpm, 1194 Rpm, dan 1433 Rpm berturut-turut adalah 1,075 mm, 1,979 mm, dan 1,536 mm. Nilai VB untuk kedalaman pemakanan 7 mm dengan putaran spindle 955 Rpm, 1194 Rpm, dan 1433 Rpm berturut-turut adalah 1,267 mm, 2,099 mm, dan 1,237 mm.

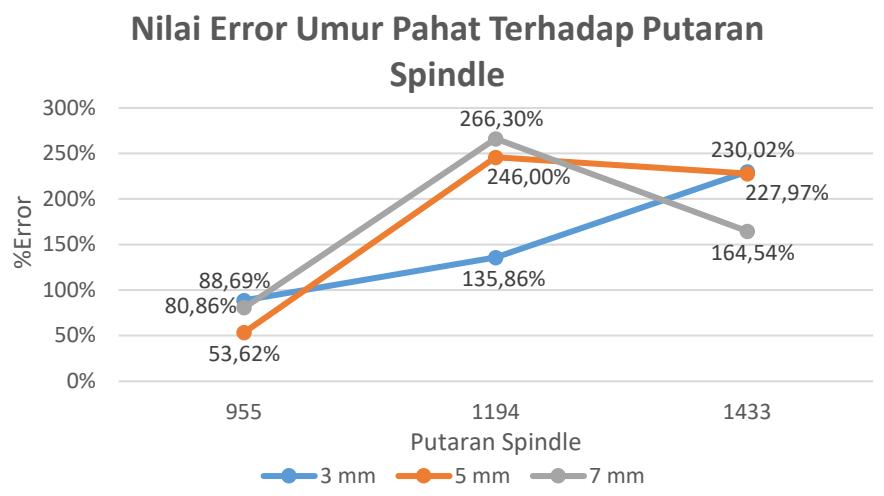
Hasil grafik menunjukkan bahwa nilai keausan flank pahat pada kecepatan spindle 1194 Rpm cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kedalaman potong. Peningkatan ini terjadi akibat meningkatnya gaya potong dan tekanan kontak antara alat pahat dan benda kerja, serta area gesekan yang lebih besar di zona potong. Situasi ini menyebabkan beban mekanis dan suhu potong yang lebih tinggi, terutama selama pemotongan kering, yang mempercepat laju keausan pada sisi flank alat pahat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kedalaman potong merupakan salah satu parameter pemesinan yang mempengaruhi keausan alat pahat dan secara langsung memengaruhi umur pakai alat pada kecepatan spindle yang sama.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Umur Pahat Teoritis dan Aktual

Grafik perbandingan antara umur pahat teoritis dan umur pahat aktual menunjukkan perbedaan antara hasil perhitungan dan hasil uji eksperimental. Umur pahat teoritis hampir konstan, sekitar 0,99995–1,00005 menit untuk semua variasi kecepatan spindle. Di sisi lain, umur pahat aktual menunjukkan nilai yang lebih rendah dan bervariasi tergantung pada kecepatan spindle dan kedalaman potong. Dalam semua kondisi pemotongan, nilai T aktual berada di bawah nilai T teoritis, terutama pada kecepatan spindle sedang dan tinggi. Penurunan umur pahat aktual ini dapat disebabkan oleh peningkatan suhu pemotongan, gaya pemotongan, dan mekanisme keausan yang tidak dipertimbangkan dalam model teoritis.

Pada kedalaman potong 3 mm, umur alat pahat secara konsisten menurun dari 0,530 menit pada 955 Rpm menjadi 0,424 menit pada 1194 Rpm, dan turun menjadi 0,303 menit pada 1433 Rpm. Polanya serupa pada kedalaman potong 7 mm, di mana umur alat pahat tertinggi terjadi pada 955 Rpm (0,552 menit) dan menurun pada 1194 Rpm (0,273 menit), meskipun sedikit meningkat lagi pada 1433 Rpm (0,378 menit). Pada kedalaman potong 5 mm, meskipun nilai umur pahat sedikit bervariasi, tren umum tetap menunjukkan bahwa kecepatan spindle yang lebih rendah menghasilkan umur alat pahat yang lebih panjang, dengan nilai tertinggi 0,651 menit pada 955 Rpm dan menurun pada kecepatan yang lebih tinggi.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai Error Umur Pahat Terhadap Putaran Spindle

Grafik yang menunjukkan kesalahan umur pahat terhadap kecepatan spindle bertujuan untuk menyoroti perbedaan antara umur pahat teoritis dan umur pahat aktual pada setiap variasi kecepatan spindle. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa nilai kesalahan cukup signifikan, berkisar antara 54% hingga 266%. Kesalahan terendah terjadi pada kedalaman pemakanan 5 mm dengan kecepatan spindle 955 Rpm, sekitar 54%, sementara kesalahan tertinggi terjadi pada kedalaman pemakanan 7 mm dengan kecepatan spindle 1194 Rpm, sekitar 266%. Diantara tiga variasi kecepatan spindle yang digunakan, nilai kesalahan terendah terjadi pada 955 Rpm, tetapi di bawah 89%. Jadi, grafik ini pada dasarnya menunjukkan bahwa akurasi model teoretis sangat dipengaruhi oleh kecepatan spindle dan menyimpang paling besar pada kondisi pemotongan ringan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data dari pengujian keausan alat pahat *end mill solid carbide* pada material ST 70 dengan variasi kecepatan spindle yang berbeda (955 Rpm, 1194 Rpm, 1433 Rpm) dan kedalaman potong yang bervariasi (3 mm, 5 mm, dan 7 mm) dalam kondisi pemotongan kering (*dry cutting*), dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Variasi pada kecepatan spindle dapat memengaruhi umur pakai alat pahat *end mill solid carbide* dalam pemesinan CNC *milling* dengan baja ST 70 selama pemotongan dalam kondisi

kering (*dry cutting*), hal ini dapat dibuktikan melalui pengukuran keausan pahat. Dari hasil uji keausan pahat, dapat disimpulkan bahwa kecepatan spindle yang lebih rendah menghasilkan umur pahat yang lebih lama. Di sisi lain, semakin tinggi kecepatan spindle, semakin cepat keausan terjadi.

2. Variasi kedalaman potong dapat memengaruhi umur pahat *end mill solid carbide* saat melakukan pemesinan CNC *milling* pada baja ST 70 dalam kondisi pemotongan kering. Meningkatkan kedalaman potong cenderung mengurangi umur pakai pahat, terutama pada kecepatan spindle sedang hingga tinggi. Jika kedalaman potong terlalu besar, hal ini akan meningkatkan beban potong dan suhu, yang mempercepat laju keausan alat pahat selama pemesinan CNC *milling* baja ST 70 dalam kondisi pemotongan kering.

Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mencoba metode pendinginan atau pelumasan yang berbeda, variasi material pahat dan benda kerja yang berbeda, serta mengembangkan model prediksi umur pahat dengan menambahkan parameter penting seperti suhu dan gaya potong.

REFERENSI

- [1] A. Mashudi, & Susanti, N. A. (2020). Pengaruh Media Pendingin dan Kecepatan Putar Spindle Terhadap Hasil Kekasaran Permukaan Benda Kerja Pada Proses Finishing Menggunakan Mesin Bubut CNC PU. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*.
- [2] Friska, A. Y. (2019). Pengaruh Variasi Jenis Baja Terhadap Keausan End Mill Cutter HSS Pada Proses Pemesinan CNC Milling. *Jurnal Teknik Mesin*.
- [3] Sobron Y. Lubis, Rosehan, Hidayat, E. P., & Ariyanti, S. (2023). Analisa Pertumbuhan Keausan Mata Pahat Karbida pada Proses Milling Baja SKD 11. *Jurnal Serina Sains, Teknologi dan Kedokteran*, 1(2), 443–454.
- [4] Hardika, Robi. (2023). Peningkatan Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja ST 70 Setelah Proses Tempering dengan Variasi Holding Time. *Skripsi*, Magelang: Universitas Tidar.
- [5] Aziz, M. N. A., Fatkhurrohman, Santoso, E., Dewantara, M. C., & Pratama, M. Z. (n.d.). Analisis Pengaruh Putaran Spindle Proses Pembubutan Metode Dry Cutting dan Wet Cutting terhadap Kekasaran Permukaan Baja ST60 pada Pahat Karbida. Halaman 65–72.
- [6] Ivan A. H. & Surya M. Y. (2017). Karakteristik Umur Pahat Pada Proses Milling Terhadap Pemesinan Kering AISI 4140. *Jurnal Teknik Mesin*.
- [7] Ghozali, M. (2016). Analisis Putaran Spindle, Kecepatan Pemakanan dan Kedalaman Pemakanan Terhadap Getaran Benda Kerja Proses CNC Milling. *Skripsi*, Jember: Universitas Jember.
- [8] Ali Zainuddin. (2019). Materi Pertemuan 1 Perkenalan CNC. Diakses dari <https://www.slideshare.net/slideshow/materi-pertemuan-1-perkenalan-cnc/52847375>, pada tanggal 10 November 2025.
- [9] Taufiq Rochim. (1993). Teori dan Teknologi Proses Permesinan. Bandung: Jurusan Teknik Mesin, fti-itb.
- [10] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology (7th ed.). Pearson Education.