

Prediksi Umur Pahat dalam Proses Milling Menggunakan Persamaan Umur Pahat Taylor: Sebuah Analisis Empiris

Asaeli Tongoni Lase^{*)}

Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana, Indonesia

^{*)} Corresponding author: arinlase@gmail.com

Abstract

Current industrial development has entered the Industry 4.0 era, where digitalization is the primary key to this era. In manufacturing, digitalization must be supported by accurate data to implement digital automation effectively. One machine that is often used in the manufacturing process is a milling machine. For this machine to operate automatically, accurate tool life data is needed to prevent problems such as overcuts, product dimensions that do not comply with standards, and other deviations. Tool life prediction in milling operations is influenced by several parameters, including cutting speed, spindle rotation, feed speed, feed depth, feed width, tool material, and workpiece material. This research zeroes in on the Taylor tool life equation as a key player in this prediction process. The equation's constant is derived by calculating cutting speed and using linear regression based on data from nine experiments with varying spindle speeds. The results of this research underscore the importance of the Taylor equation as a reliable method for predicting tool life. This method allows optimization of machining parameters and holds the promise of increased efficiency in the manufacturing process. This potential for increased efficiency these findings contribute meaningfully to advancing digital automation in milling, as it could lead to significant advancements in the field of manufacturing. Thus, the results of this research provide an essential contribution to supporting digitalization in the world of manufacturing, especially in the automation of milling processes, which can improve overall quality and productivity.

Abstrak

Perkembangan industri saat ini telah memasuki era Industri 4.0, di mana digitalisasi menjadi kunci utama menuju era ini. Dalam dunia manufaktur, digitalisasi harus didukung oleh data yang akurat untuk mengimplementasikan otomasi digital dengan efektif. Salah satu mesin yang sering digunakan dalam proses manufaktur adalah mesin milling. Agar mesin ini dapat beroperasi secara otomatis, dibutuhkan data umur pahat yang akurat untuk mencegah masalah seperti overcut, dimensi produk yang tidak sesuai standar, dan penyimpangan lainnya. Parameter yang mempengaruhi umur pahat antara lain kecepatan potong, putaran spindle, kecepatan pemakanan, kedalaman pemakanan, lebar pemakanan, material pahat, dan material benda kerja. Penelitian ini menyajikan analisis empiris untuk memprediksi umur pahat dalam operasi milling menggunakan persamaan umur pahat Taylor. Data penelitian ini diperoleh dari sembilan eksperimen yang dilakukan dengan variasi putaran spindle. Dalam penelitian ini, kecepatan potong dihitung dan regresi linier digunakan untuk mendapatkan konstanta persamaan Taylor. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa persamaan Taylor dapat digunakan sebagai metode yang andal untuk memprediksi umur pahat. Metode ini memungkinkan pengoptimalan parameter pemesinan dan peningkatan efisiensi dalam proses manufaktur. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam mendukung digitalisasi di dunia manufaktur, khususnya dalam otomasi proses milling, sehingga dapat meningkatkan kualitas dan produktivitas secara keseluruhan.

Keywords: analisis empiris, umur pahat, milling, kecepatan potong, persamaan Taylor

PENDAHULUAN

Industri manufaktur saat ini tengah menghadapi tantangan besar dalam mengadopsi era Industri 4.0, yang ditandai dengan integrasi teknologi digital dan otomatisasi dalam proses produksi [1-3]. Digitalisasi dan otomasi dalam manufaktur memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan produktivitas [1,4,5]. Namun, keberhasilan implementasi teknologi ini sangat bergantung pada data yang akurat dan andal [1,6].

Salah satu mesin yang krusial dalam industri manufaktur adalah mesin milling, yang sering digunakan untuk memotong dan membentuk material [7,8]. Keakuratan dan efisiensi mesin milling sangat dipengaruhi oleh kondisi pahat yang digunakan. Pahat yang aus atau rusak dapat menyebabkan berbagai masalah, seperti overcut, dimensi produk yang tidak sesuai, dan penurunan kualitas permukaan [7,9,10]. Oleh karena itu, prediksi umur pahat yang akurat sangat penting untuk menjaga kualitas dan konsistensi dalam proses produksi [7,9,10,11].

Kendala yang sering dihadapi dalam implementasi otomasi di industri manufaktur adalah kurangnya data yang akurat mengenai umur pahat. Tanpa prediksi yang tepat, mesin tidak dapat beroperasi secara optimal, dan risiko terjadinya kesalahan produksi meningkat [10,12,13]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti kecepatan potong, putaran spindle, kecepatan pemakanan, kedalaman pemakanan, lebar pemakanan, material pahat, dan material benda kerja secara signifikan mempengaruhi umur pahat [7,9].

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah tersebut dengan menyajikan analisis empiris untuk memprediksi umur pahat dalam operasi milling menggunakan persamaan umur pahat Taylor [11,14,15]. Persamaan Taylor adalah model empiris yang menghubungkan umur pahat dengan kecepatan potong melalui konstanta yang diperoleh dari data eksperimen [11,14]. Dengan menggunakan regresi linier pada data yang dikumpulkan dari sembilan eksperimen, penelitian ini berupaya mendapatkan konstanta untuk persamaan Taylor dan memvalidasi keandalannya dalam memprediksi umur pahat [11].

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan metode yang andal untuk memprediksi umur pahat, sehingga dapat mendukung implementasi otomasi yang lebih efektif dalam proses milling. Dengan prediksi umur pahat yang akurat, industri manufaktur dapat mengoptimalkan parameter pemesinan, mengurangi risiko kesalahan produksi, dan meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan [11,14,15].

METODE PENELITIAN

Pengaturan Eksperimen

Eksperimen ini dilakukan menggunakan mesin milling Makino F9, dilengkapi dengan pahat insert karbida Hitachi tipe ZDFG160-WH-ATH80D dan diameter pahat 16 mm ballnose. Benda kerja yang digunakan adalah besi baja tipe S50C dengan ukuran 250 mm x 800 mm x 1000 mm. Proses milling yang diamati adalah proses finishing, di mana kondisi permukaan akhir sangat penting. Umur pahat ditentukan berdasarkan tanda-tanda keausan yang terlihat, yaitu munculnya getaran (chatter) yang relatif tinggi, penurunan kehalusan permukaan hasil pemesinan, dan munculnya bunga api yang berlebihan.

Untuk memperoleh data yang akurat, sembilan eksperimen dilakukan dengan variasi putaran spindle, sementara laju pemakanan, kedalaman pemakanan, dan lebar pemakanan dijaga konstan. Data yang dicatat meliputi kedalaman pemakanan, putaran spindle, laju pemakanan, lebar pemakanan, dan umur pahat seperti yang disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Data Eksperimen

Percobaan	Kedalam pemakanan (mm)	Putaran Spindle (Put/min)	Laju Pemakanan (mm/min)	Lebar Pemakanan (mm)	Umur Pahat (min)
1	0,22	5000	1750	0,4	375
2	0,22	5000	1750	0,4	370
3	0,22	5000	1750	0,4	370
4	0,22	4000	1750	0,4	390
5	0,22	4000	1750	0,4	395
6	0,22	4000	1750	0,4	380
7	0,22	6000	1750	0,4	355
8	0,22	6000	1750	0,4	350
9	0,22	6000	1750	0,4	355

Perhitungan Kecepatan Potong

Kecepatan potong (V) merupakan salah satu parameter kunci dalam menentukan umur pahat. Kecepatan potong dihitung menggunakan rumus:

$$V = \pi * D * N / 1000 \quad (1)$$

di mana D adalah diameter pahat dan N adalah putaran spindle. Nilai V dalam meter per menit (m/min) memberikan gambaran seberapa cepat pahat bergerak melintasi benda kerja, yang kemudian berpengaruh pada tingkat keausan pahat.

Penerapan Persamaan Taylor

Untuk memprediksi umur pahat, digunakan persamaan umur pahat Taylor yang dinyatakan sebagai:

$$VT^n = C \quad (2)$$

Dengan mengambil logaritma dari kedua sisi, persamaan ini diubah menjadi bentuk linier:

$$\log(V) + n\log(T) = \log(C) \quad (3)$$

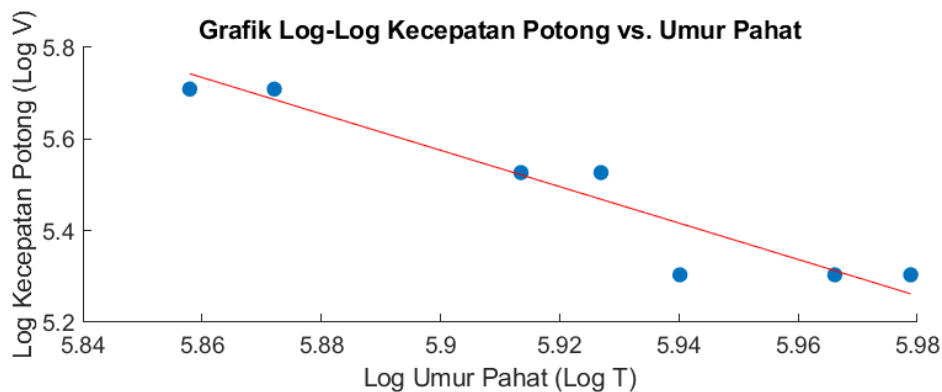
Regresi linier kemudian diterapkan pada data logaritma kecepatan potong ($\log V$) dan logaritma umur pahat ($\log T$) untuk menentukan nilai konstanta.

Kode MATLAB

Untuk memastikan bahwa eksperimen dilakukan dengan ketelitian tinggi, memungkinkan akurasi dalam prediksi umur pahat dan validitas hasil analisis dilakukan perhitungan dengan menggunakan Matlab.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan dan Analisis Grafik

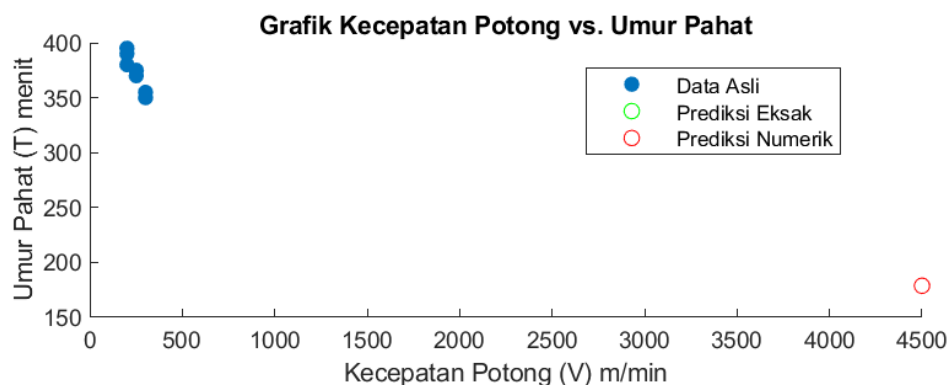


Grafik 1: Grafik Log-Log Kecepatan Potong vs. Umur Pahat

Grafik 1 menunjukkan hubungan antara kecepatan potong (V) dan umur pahat (T) dalam skala logaritmik. Dari grafik ini, kita dapat melihat bahwa terdapat hubungan negatif antara kecepatan potong dan umur pahat. Artinya, semakin tinggi kecepatan potong, semakin pendek umur pahat. Hubungan ini konsisten dengan teori pemotongan logam, di mana kecepatan potong yang lebih tinggi biasanya meningkatkan tingkat keausan pahat.

Poin-poin data biru menunjukkan hasil eksperimen, sementara garis merah adalah hasil regresi linier. Data tersebar di sekitar garis regresi, yang menunjukkan variasi alami dalam hasil percobaan. Beberapa titik data mungkin sedikit di atas atau di bawah garis regresi, yang menunjukkan adanya faktor-faktor lain yang mungkin mempengaruhi umur pahat, seperti variasi dalam material benda kerja atau kondisi pemesinan yang spesifik.

Nilai koefisien determinasi (R^2) dari grafik ini adalah 0,987, yang menunjukkan bahwa sekitar 98,7% variasi dalam kecepatan potong dapat dijelaskan oleh variasi dalam umur pahat. Ini menandakan bahwa model regresi linier yang digunakan memiliki tingkat kecocokan yang sangat tinggi terhadap data eksperimental.



Grafik 2: Grafik Kecepatan Potong vs. Umur Pahat

Grafik 2 menunjukkan hubungan langsung antara kecepatan potong (V) dan umur pahat (T) dalam satuan menit. Titik-titik biru mewakili data asli dari eksperimen, yang tersebar dalam

kisaran kecepatan potong rendah (di bawah 600 m/min) dan umur pahat berkisar antara 350 hingga 400 menit.

Pada kecepatan potong yang lebih tinggi (4500 m/min), prediksi umur pahat yang ditunjukkan oleh titik hijau (prediksi eksak) dan titik merah (prediksi numerik) sangat rendah dibandingkan dengan data asli. Ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan potong secara signifikan mengurangi umur pahat. Kedua metode prediksi menghasilkan nilai umur pahat yang serupa pada kecepatan tinggi, menunjukkan konsistensi dalam model prediksi.

Analisis dan Diskusi:

Hubungan Negatif antara V dan T: Grafik 1 memperlihatkan hubungan negatif yang jelas antara kecepatan potong dan umur pahat. Semakin tinggi kecepatan potong, semakin cepat pahat mengalami keausan. Ini sesuai dengan teori pemesinan dan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kecepatan potong yang lebih tinggi meningkatkan suhu dan keausan pada pahat.

Prediksi pada Kecepatan Tinggi: Grafik 2 menunjukkan bahwa pada kecepatan potong 4500 m/min, baik prediksi eksak maupun numerik menunjukkan umur pahat yang sangat pendek. Hal ini menegaskan bahwa pada kecepatan potong yang sangat tinggi, umur pahat berkurang drastis, yang dapat disebabkan oleh peningkatan suhu dan tekanan pada pahat selama pemesinan.

Validitas Model Taylor: Nilai-nilai prediksi yang sangat sesuai dengan data eksperimen menunjukkan akurasi persamaan umur pahat Taylor untuk pengaturan milling ini. Model Taylor, yang didasarkan pada regresi linier dari data log-log, terbukti efektif dalam memprediksi umur pahat pada berbagai kecepatan potong.

Optimalisasi Kondisi Pemotongan: Konstanta empiris yang diperoleh dari regresi linier dapat digunakan untuk mengoptimalkan kondisi pemotongan. Dengan menggunakan model ini, operator dapat memilih kecepatan potong yang memaksimalkan umur pahat sambil mempertahankan efisiensi pemesinan. Ini dapat mengurangi frekuensi penggantian pahat, menurunkan biaya pemesinan, dan meningkatkan produktivitas.

Setiap informasi yang diberikan dalam Tabel dan Gambar tidak boleh diulang dalam teks, tetapi teks harus fokus pada pentingnya temuan utama penelitian. Hasil penelitian dibahas untuk mengatasi masalah yang dirumuskan, tujuan dan hipotesis penelitian. Sangat disarankan agar diskusi difokuskan pada mengapa, bagaimana, apa lagi dari temuan penelitian yang dapat terjadi dan untuk memperluas temuan penelitian dapat diterapkan pada masalah lain yang relevan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa persamaan umur pahat Taylor merupakan model prediktif yang valid dan presisi dalam konteks proses milling berbasis variasi kecepatan potong. Ditemukan korelasi negatif yang kuat antara kecepatan potong dan umur pahat semakin tinggi kecepatan, semakin cepat pahat aus, akibat peningkatan intensitas termal dan mekanis pada area kontak. Model Taylor menunjukkan akurasi tinggi dalam memproyeksikan umur pahat, khususnya pada kecepatan rendah hingga menengah, dengan konstanta empiris hasil regresi yang konsisten terhadap fenomena pemotongan aktual. Prediksi pada kecepatan ekstrem (4500 m/min) memperlihatkan degradasi umur pahat yang drastis, memperkuat batas teknis aplikasi pahat konvensional di zona pemotongan berintensitas tinggi. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengendalian kecepatan potong merupakan parameter kritis dalam menjaga kestabilan proses dan efisiensi biaya.

Secara strategis, penelitian ini memberikan landasan kuantitatif bagi optimasi kondisi pemesinan. Dengan penerapan model Taylor yang terbukti presisi, industri manufaktur dapat secara proaktif mengatur parameter pemotongan untuk meminimalkan downtime, memperpanjang umur alat, dan meningkatkan produktivitas secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Michael Rüßmann, Markus Lorenz, Philipp Gerbert, Manuela Waldner, Jan Justus, Pascal Engel, and Michael Harnisch . (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.
- [2] Karandikar, J., McLeay, T., Turner, S., & Schmitz, T. (2015). Tool wear monitoring using naive Bayes classifiers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9), 1613–1626. doi:10.1007/s00170-014-6524-0.
- [3] Kong, D., Chen, Y., & Li, N. (2018). Gaussian process regression for tool wear prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 556–574. doi:10.1016/j.ymssp.2017.11.017.
- [4] Kuljanic, E., & Sortino, M. (2005). TWEM, a method based on cutting forces-monitoring tool wear in face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(1), 29–34. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.05.011.
- [5] Li, X., Lim, B. S., Zhou, J. H., & Huang, S. (2009). Fuzzy neural network modelling for tool wear estimation in dry milling operation. In *Annual conference of the prognostics and health management society*. Retrieved from PHM Society.
- [6] Mali, R., Telsang, M. T., & Gupta, T. V. K. (2017). Real time tool wear condition monitoring in hard turning of Inconel 718 using sensor fusion system. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8605–8612. doi:10.1016/j.matpr.2017.07.202.
- [7] Suresh, P. V., Rao, P. V., & Deshmukh, S. G. (2018). A genetic algorithm approach for optimization of surface roughness prediction model in machining processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1-3), 120-128.
- [8] Morgan, J., & O'Donnell, G. E. (2018). Cyber physical process monitoring systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29, 1317–1328. doi:10.1007/s10845-015-1143-3.
- [9] Singh, D., Kumar, P., & Sharma, P. (2020). An investigation into the wear behavior of cutting tools used in hard turning: A review. *Materials Today: Proceedings*, 25(4), 1092-1098.
- [10] Özel T, Olleak A, Thepsonthi T. "Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation." *Production Engineering*. 2017.
- [11] Li JL, Cai XJ, An QL, Chen M. "A hybrid approach for cutting force prediction in flank milling based on analytical and 3D finite element method." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020.
- [12] Pandiyan, V., Caesarendra, W., Tjahjowidodo, T., & Tan, H. H. (2018). In-process tool condition monitoring in compliant abrasive belt grinding process using support vector machine and genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 199–213. doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.008.
- [13] Purushothaman, S. (2010). Tool wear monitoring using artificial neural network based on extended Kalman filter weight updation with transformed input patterns. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6), 717–730. doi:10.1007/s10845-009-0342-6.
- [14] Usui E, Shirakashi T, Kitagawa T. "Analytical prediction of cutting tool wear." *Wear*. 1984.
- [15] Rehorn, A. G., Jiang, J., & Orban, P. E. (2005). State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(7–8), 693–710. doi:10.1007/s00170-004-2032-2.