



## Pengaruh laju pemakanan proses *milling* terhadap perubahan temperatur pada pahat *endmill* karbida

*The effect of feed rate milling process on temperature change of carbide endmill tool*

H.S. Putra\*, A.S. Rumbiak, S.Y. Lubis, S. Darmawan

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Kota Jakarta Barat, Jakarta, Indonesia, 11400. HP. 085770315718

\*E-mail: [hardy.515200025@stu.untar.ac.id](mailto:hardy.515200025@stu.untar.ac.id)

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

Received 13 June 2024

Accepted 23 July 2024

Available online 01 October 2024

#### Keywords:

Milling process

Cutting temperature

Endmill carbide



Cutting Tool temperature has a significant role in the machining process in terms of tool life and workpiece properties. In dry machining process, cutting temperature condition must be monitored as excessive temperature rise can cause tool wear and damage to workpiece. Research on cutting heat has existed along with the development of metal cutting technology. Scientists have made many attempts to determine the cutting heat through theoretical analysis, numerical simulation, and experimental research. Measurement of cutting tool temperature requires a certain method because in milling process the cutting tool rotates to cut the workpiece. This research was conducted with an experimental research using an infrared thermal imager to obtain the result of carbide endmill tool in the face milling process of SKD61 (Special Kogyo Die) steel. The cutting parameters used were 1320 RPM spindle speed, 42, 98, 230 mm/min, and 0.5mm depth of cut. The milling process carried out with a time frequency of 5 minutes. The results of carbide endmill tool temperature measurement show that increasing the feed rate affects the temperature rise of the carbide endmill tool. At the feed rate of 42 mm/min, the highest temperature recorded was 152.3 °C, then at the feed rate of 98 mm/min, the highest temperature was 195 °C, and the feed rate of 230 mm/min had the highest temperature in this study, which was 219.4 °C.

*Dinamika Teknik Mesin*, Vol. 14, No. 2, Oktober 2024, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

### 1. PENDAHULUAN

Pada perkembangan industri manufaktur proses permesinan merupakan satu proses manufaktur yang penting karena dapat memproduksi produk dan jasa dengan jumlah yang cukup besar. Pemotongan logam menggunakan mesin perkakas melibatkan interaksi dalam bentuk potong dan gerak makan antara mata pahat potong dan benda kerja (Nasution dkk., 2021). Dengan demikian, mesin perkakas dapat digunakan sedemikian rupa sehingga terjadi proses pemotongan benda kerja oleh mata pahat dan menghasilkan berbagai macam produk

benda kerja. Sebagian besar produk industri logam dibuat menggunakan proses pengerjaan tertentu dengan mesin *milling* (Susanto dkk., 2021).

Pada proses permesinan interaksi yang dialami pahat berasal dari permukaan geram yang mengalir dan permukaan benda kerja yang telah terpotong. Interaksi yang terjadi pada mata pahat dengan benda kerja dapat mengakibatkan keausan pada mata pahat. Keausan pahat akan semakin membesar hingga mencapai batas tertentu yang menyebabkan pahat tidak dapat digunakan kembali atau pahat telah mengalami kerusakan (Lubis dkk., 2021).

Sejumlah besar fenomena panas yang terjadi baik di area sempit maupun luas dari zona pemotongan berhubungan langsung dengan tingkat keausan pahat, material benda kerja dan banyak karakteristik lain dari proses pemesinan (Habrat dkk., 2021). Sebagian besar proses gaya potong diubah menjadi energi panas, panas yang dihasilkan mengalir dari zona pemotongan ke pahat, benda kerja, geram, dan kedalam lingkungan, hal ini menyebabkan keausan pada mata pahat. Distribusi panas yang dihasilkan dipengaruhi oleh benda kerja, kecepatan potong, laju pemakanan, kedalaman potong dan parameter lain yang relevan (Liao dkk., 2024).

Penelitian panas pemotongan telah ada seiring dengan perkembangan teknologi pemotongan logam. Para ilmuwan telah melakukan banyak upaya untuk mengetahui panas pemotongan melalui analisis teoritis, simulasi numerik, dan penelitian eksperimental (Yang dan Chen, 2022). Panas pemotongan diteliti karena efek samping yang serius pada kinerja proses permesinan. Faktor utama yang mempengaruhi nilai temperatur dan distribusinya di zona pahat, benda kerja yang sedang dikerjakan dan geram adalah karakteristik material yang sedang dikerjakan, karakteristik mata pahat, parameter pemotongan, geometri mata pahat, serta jenis dan cara pendinginan dan terakhir jenis operasi pemesinan (Zgórnjak dkk., 2016).

Pada penelitian pengukuran temperatur mata pahat memerlukan metode khusus karena mata pahat pada proses pemesinan *milling* berputar untuk memotong benda kerja, sehingga penggunaan alat pengukur temperatur non-kontak direkomendasikan dibandingkan dengan alat pengukuran temperatur yang bersentuhan langsung dengan mata pahat (Jiang dkk., 2016). Taufiq Rochim menjelaskan bahwa pada proses *milling* persentase temperatur yang dihasilkan oleh geram tidak lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur yang dihasilkan oleh mata pahat. Panas yang merambat pada mata pahat merupakan proses konduksi panas yang dipengaruhi oleh konduktivitas panas material pahat dan penampang pahat yang relatif kecil (Rochim, 1993).

Ogendengbe dkk., (2019) telah melakukan penelitian temperatur pemotongan pada proses permesinan menggunakan simulasi ANSYS dengan tiga variasi kondisi pemotongan dan menggunakan 2 jenis pahat yaitu *tungsten carbide* dan *high carbon steel*. Dari penelitiannya didapatkan bahwa panas yang dihasilkan selama proses pemotongan mempengaruhi kekasaran permukaan benda kerja dan panas yang dihasilkan juga dapat mengurangi besarnya gaya pemotongan.

Penelitian yang dilakukan Ruihu Zhou menggunakan simulasi *finite element method* (FEM) dan eksperimen menggunakan *embedded thermocouple* untuk mengetahui temperatur benda kerja pada proses *milling* 4-axis dan menunjukkan bahwa kedua metode yang digunakan pada penelitian dapat digunakan untuk mendapatkan hasil temperatur benda kerja selama proses *milling*, tetapi pada metode simulasi tidak dapat menghasilkan peningkatan temperatur yang akurat, metode simulasi hanya dapat digunakan untuk mengetahui temperatur maksimal benda kerja (Zhou, 2020).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi temperatur mata pahat dengan metode eksperimental selama proses *milling* baja SKD61 (*Special Kogyo Die*). Penelitian dilakukan menggunakan *infrared thermal imager* UNI-T 120S. Eksperimen kemudian dilakukan untuk mengetahui distribusi dan nilai temperatur mata pahat pada laju pemakanan yang berbeda. Pengaruh laju pemakanan terhadap temperatur dianalisa untuk akhirnya mendapatkan kesimpulan.

## 2. METODE PENELITIAN

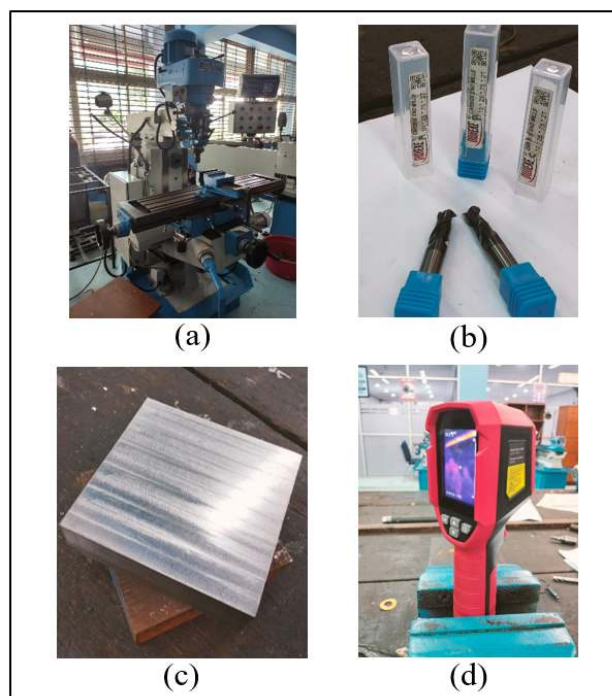
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan menggunakan mesin *milling* konvensional, dengan memvariasikan tiga laju pemakanan (*feed rate*) yang berbeda untuk mengetahui perubahan temperatur mata pahat *endmill* karbida pada proses *milling* baja SKD 61. Pengamatan pada penelitian ini dilakukan menggunakan *infrared thermal imager* sebagai alat untuk membaca temperatur selama proses pemotongan. Pada penelitian ini, proses *milling* dilakukan tanpa menggunakan cairan pendingin (*coolant*) atau menggunakan proses pemotongan kering. Parameter pemotongan pada penelitian dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter pemotongan

Parameter Pemotongan	Nilai
Diameter <i>endmill</i> (mm)	10
Kecepatan spindel (r/min)	1320
Kecepatan pemotongan (m/min)	41,469

Laju pemakanan (mm/min)	42, 98, 230
Kedalaman pemotongan (mm)	0,5

Proses *milling* dilakukan dengan tiga laju pemakanan yang berbeda, yaitu 42 mm/min, 98 mm/min, dan 230 mm/min. Pengambilan data temperatur dilakukan selama proses *milling*, sebelum proses *milling* dan setelah proses *milling* dilakukan. Mata pahat yang digunakan pada proses *milling* diganti dengan mata pahat baru pada setiap parameter yang berbeda. Adapun peralatan dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Mesin milling konvensional, (b) *Endmill carbide 2 flute*, (c) Baja SKD 61, (d) *Infrared thermal imager* UNI-T 120S.

Selama proses *milling*, *Infrared thermal imager* digunakan karena kemampuannya untuk melakukan pengukuran temperatur secara non-kontak dengan presisi tinggi. Prinsip kerja *infrared thermal imager* adalah untuk mendeteksi atau merekam radiasi inframerah yang dihasilkan oleh benda atau lingkungan. Radiasi inframerah yang diukur oleh sensor inframerah kemudian dikonversikan menjadi gambar yang tervisualisasikan. Gambar yang dihasilkan digunakan untuk melihat perbedaan temperatur antara benda dengan lingkungan sekitarnya. *Infrared thermal imager* yang digunakan merupakan *infrared thermal imager* UNI-T 120S dengan IR resolution 120x90 dan kisaran temperatur -20°C- 400 °C.

Tabel 2. Sifat fisis material (Sifa dkk., 2022) (Thành dan An, 2018)

Parameter	Endmill karbida	Baja SKD 61
Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	11900	7850
Konduktivitas termal (W/mK)	50	35,5
Panas spesifik (J/kg K)	400	460

Perpindahan panas merupakan proses perpindahan energi termal dari suatu objek ke objek lain yang memiliki perbedaan temperatur, perpindahan panas terjadi melalui tiga mekanisme yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi panas melalui zat padat dimodelkan secara matematis oleh hukum Fourier seperti persamaan 1 (Laperriere, 2014).

$$\vec{q} = -k\nabla T \tag{1}$$

Kemudian konveksi panas dapat dimodelkan dengan Hukum Newton, seperti pada persamaan 2

$$q = hA(T - T_o) \tag{2}$$

Energi radiasi persatuan waktu dari blackbody dinyatakan dengan hukum Stefan-Boltzmann sebagai:

$$q = \sigma T^4 A \tag{3}$$

Temperatur pemotongan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (4), dimana (Q) merupakan panas total yang dihasilkan perdetik.

$$Q = Q_{sh} + Q_y + Q_a \tag{4}$$



Gambar 2. Proses pengambilan data temperatur

Sebelum melakukan pengujian, benda kerja dan mata pahat harus ditempatkan dengan posisi *center*, sehingga proses pemesinan dapat berjalan sesuai dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 1. Setelah semua persiapan selesai, pengambilan data temperatur mata pahat *endmill* karbida dilakukan dengan mengarahkan *infrared thermal imager* pada jarak 10-15cm dari area pemotongan antara mata pahat dengan benda kerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

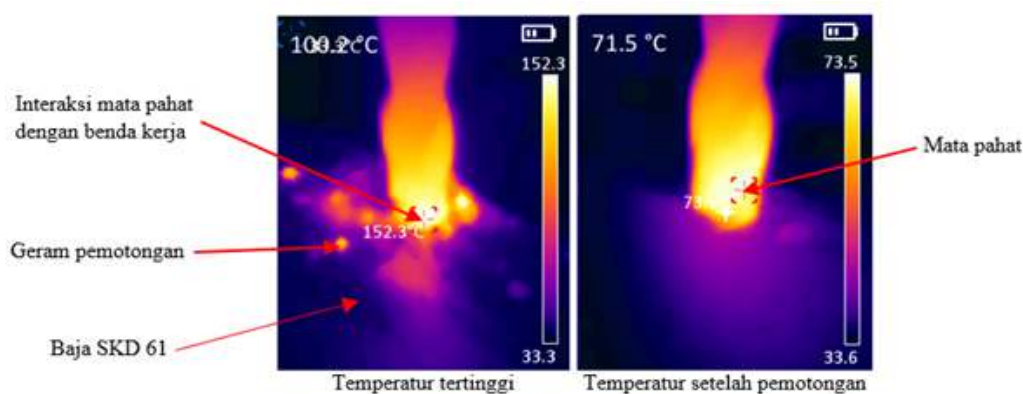
Pada proses *milling* dengan laju pemakanan 42mm/min menunjukkan bahwa temperatur tertinggi yang dihasilkan selama proses pemotongan adalah 152,3 °C, kemudian pada laju pemakanan 98mm/min menunjukkan bahwa temperatur teringginya adalah 195,0 °C, dan pada laju pemakanan 230 mm/min temperatur tertinggi pada pahat adalah 219,4 °C. Pada gambar 8 terlihat bahwa temperatur tertinggi berada pada area kontak antara mata pahat dengan baja SKD 61, yang menandakan intensitas gesekan dan deformasi yang tinggi. Hasil pengukuran temperatur pemotongan pada proses *milling* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Temperatur mata pahat pada laju pemakanan 42 mm/min (a), 98 mm/min (b), dan 230 mm/min (c)

Waktu (menit)	a	b	c
	Temperatur (°C)	Temperatur (°C)	Temperatur (°C)
5	41,2	76,0	80,6
10	64,5	95,4	107,1

15	75,8	111,1	125,2
20	87,3	135,2	144,4
25	100,5	156,1	167,0
30	125,1	167,8	186,5
35	144,3	182,9	203,0
40	152,3	195,0	219,4

Pada Tabel 3, data temperatur pahat endmill didapatkan dengan menggunakan infrared thermal imager. Parameter pemotongan telah ditetapkan selama proses penelitian untuk mendapatkan nilai perbedaan temperatur mata pahat *endmill* karbida pada perbedaan laju pemotongan seperti yang telah ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil pengukuran temperatur menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara laju pemakanan dengan peningkatan temperatur yang terjadi pada mata pahat.



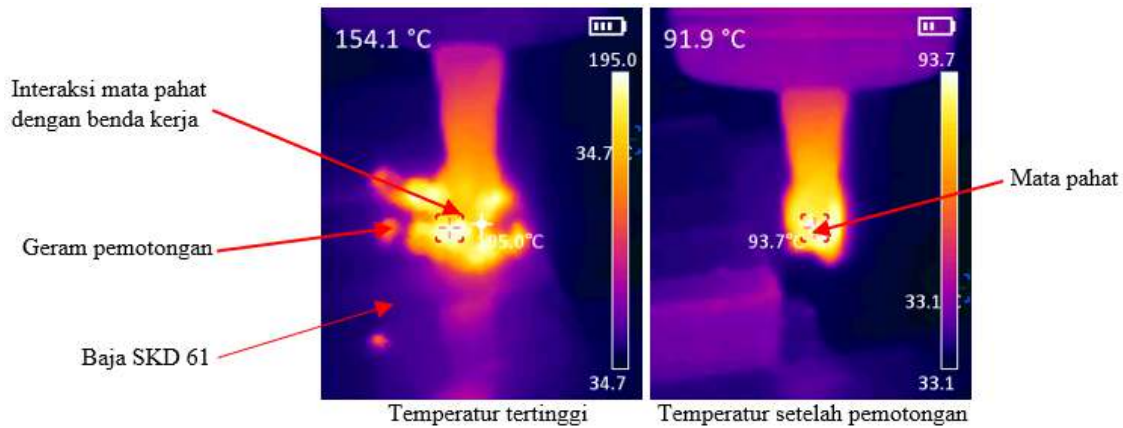
Gambar 3. Laju pemakanan 42 mm/min

Gambar 4 menunjukkan distribusi temperatur pahat pada laju pemakanan 42 mm/min, distribusi temperatur tertinggi terjadi pada ujung pahat berwarna kuning dengan nilai temperature 152,3 °C, warna jingga merupakan distribusi temperatur sedang dengan nilai 87,9 °C, dan warna ungu menunjukkan distribusi temperatur terendah dengan nilai 66,3 °C. Pada warna jingga dan ungu merupakan distribusi panas yang terjadi pada bagian badan pahat.

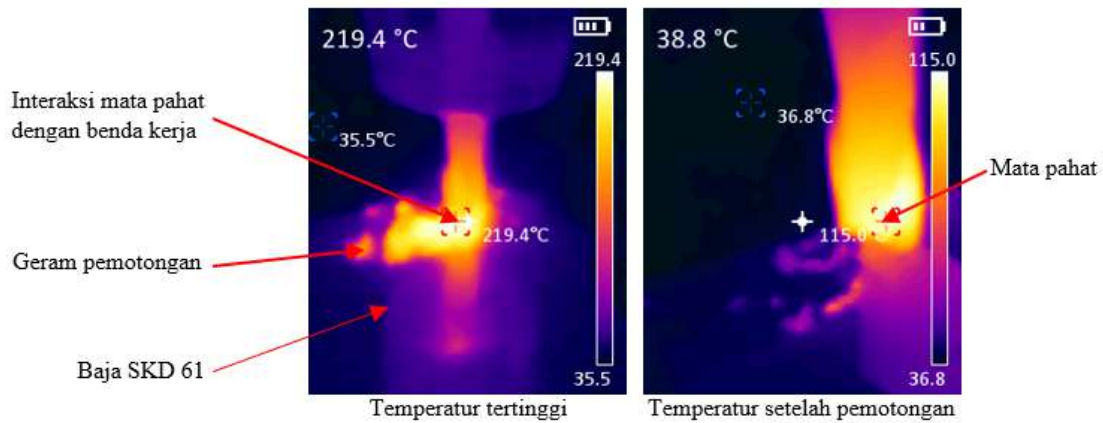
Gambar 5 menunjukan laju pemakanan yang ditingkatkan menjadi 98 mm/min, distribusi temperatur tertinggi pada mata pahat terdapat pada ujung mata pahat dengan nilai temperatur 195 °C berwarna kuning, distribusi temperatur sedang berwarna jingga sebesar 99,1 °C, dan distribusi temperatur terendah pada mata pahat sebesar 79°C yang berwarna ungu.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan distribusi temperatur pahat pada laju pemakanan dinaikkan menjadi 230 mm/min. distribusi temperatur pahat tertinggi ditunjukkan dengan warna kuning sebesar 219,4 °C, distribusi temperatur sedang sebesar 155,6 °C berwarna jingga, dan distribusi temperatur terendah berwarna ungu sebesar 91,1 °C.

Panas yang dihasilkan oleh mata pahat dihasilkan dari gesekan antara mata pahat dengan baja SKD 61. Semakin tinggi laju pemakanan, maka semakin besar gaya gesek yang terjadi. Panas yang dihasilkan mengalir melalui mekanisme konduksi yang dihasilkan akibat gesekan dan deformasi plastis pada area pemotongan yang mengalir dari area kontak antara mata pahat *endmill* dan permukaan benda kerja, kemudian panas ini menyebar melalui badan pahat. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, 4, dan 5.



Gambar 4. Laju pemakanan 98 mm/min

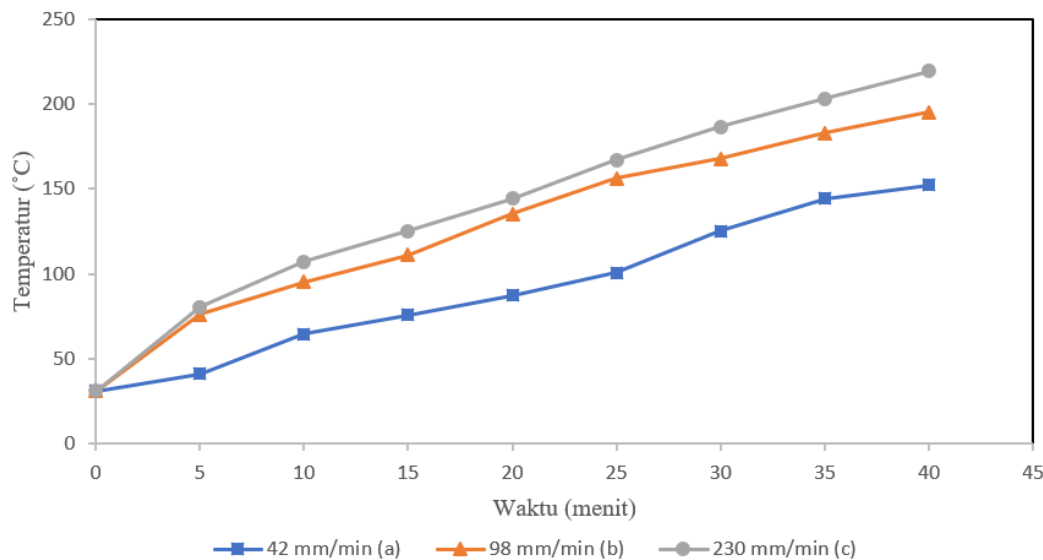


Gambar 5. Laju pemakanan 230 mm/min

Temperatur tertinggi yang didapatkan dengan menggunakan *infrared thermal imager* ditunjukkan pada bagian ujung mata pahat (*cutting edge* dan *end teeth*) yang bergesekan langsung dengan benda kerja. Pada area pemotongan energi mekanik dari proses pemotongan dikonversi menjadi energi panas, panas yang terjadi pada ujung mata pahat tersebar ke bagian badan pahat dengan gradien temperatur yang menurun, karena konduktivitas termal pahat dan pendinginan oleh udara pada lingkungan proses pemotongan melalui proses konveksi alamiah.

Pada pahat dengan laju pemakanan 42 mm/min, peningkatan temperatur dari 41,2 °C pada 5 menit pertama hingga 152,3 °C pada menit ke 40. ini menunjukkan bahwa pada laju pemakanan rendah cenderung menghasilkan penyebaran panas yang lebih merata. Waktu interaksi yang lebih lama antara pahat dan benda kerja memungkinkan lebih banyak waktu untuk panas mengalir. Dengan peningkatan laju pemakanan 98 mm/min, temperatur pahat menunjukkan peningkatan dari 76 °C pada 5 mneit pertama hingga 195 °C pada menit ke 40, hal ini menunjukkan bahwa laju pemakanan 98 mm/min menghasilkan peningkatan temperatur yang lebih cepat. Panas yang dihasilkan lebih terkonsentrasi pada area pemotongan, dengan distribusi panas yang kurang merata dibandingkan laju pemakanan 42 mm/min. Pada laju pemakanan tertinggi yaitu 230 mm/min, menunjukkan peningkatan temperatur awal yang lebih tinggi sebesar 80,6 °C dan mencapai nilai tertinggi sebesar 219,4 °C pada menit 40, dengan laju pemakanan 230 mm/min gesekan dan deformasi plastis yang dihasilkan sangat intens sehingga distribusi panas tidak merata dan menyebabkan peningkatan temperatur yang sangat tinggi.

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 6, dapat diketahui bahwa ada hubungan linier antara laju pemakanan dengan temperatur maksimum yang dihasilkan oleh mata pahat pada proses milling baja SKD 61. Semakin tinggi laju pemakanan maka semakin cepat temperatur meningkat, dan semakin tinggi temperatur maksimum yang dicapai oleh mata pahat. Panas yang dihasilkan dapat berdampak negatif pada mata pahat. Mata pahat mengalami keausan yang lebih cepat akibat temperatur yang lebih tinggi.



Gambar 6. Temperatur mata pahat pada laju pemakanan berbeda

Penelitian yang dilakukan Bahry dan Nurrohkeyati menyatakan bahwa parameter pemotongan mempengaruhi perubahan temperatur pada mata pahat, semakin tinggi laju pemakanan maka semakin tinggi temperatur yang dihasilkan oleh mata pahat (Bahry dan Nurrohkeyati, 2022). Yang Liu melakukan penelitian temperatur pada proses milling dan menyatakan bahwa kecepatan spindle dan laju pemakanan sangat mempengaruhi distribusi panas yang terjadi pada proses pemotongan (Liu dkk, 2022). Lubis juga menyatakan bahwa kecepatan pemotongan menyebabkan perubahan temperatur pada pahat terutama pada bagian ujung mata pahat yang kontak langsung dengan benda kerja (Lubis dkk, 2019).

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan laju pemakanan sangat berpengaruh terhadap kenaikan temperatur pada mata pahat endmill karbida. Pada laju pemakanan 42 mm/min menghasilkan temperatur tertinggi yang tercatat adalah 152,3 °C, kemudian pada laju pemakanan 98 mm/min mendapatkan temperatur tertinggi sebesar 195 °C, dan laju pemakanan 230 mm/min mendapatkan temperatur tertinggi pada penelitian ini, yaitu sebesar 219,4 °C. Laju pemakanan berbanding lurus dengan peningkatan temperatur mata pahat *endmill* karbida, dimana semakin tinggi laju pemakanan maka semakin tinggi temperatur pada mata pahat. hal ini disebabkan oleh distribusi panas pada mata pahat yang terjadi secara konduksi akibat gesekan dan beban kerja mata pahat, dimana pada ujung mata (*cutting edge* dan *end teeth*) pahat memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan badan pahat. Panas yang dihasilkan pada proses pemotongan berdampak negatif pada mata pahat, dimana mata pahat dapat mengalami keausan yang lebih cepat akibat temperatur yang lebih tinggi.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih diucapkan kepada semua pihak yang telah membantu baik berupa materi maupun pikiran sehingga penelitian dan paper ini dapat terselesaikan. Ucapan terimakasih juga kami sampaikan kepada seluruh staff dan kepala Laboratorium Teknik Mesin Universitas Tarumanagara atas fasilitas yang dipergunakan dalam penelitian ini.

#### DAFTAR NOTASI

- q : Laju perpindahan panas (W)
- K : Konduktivitas panas (W/m.K)
- $\nabla T$  : Gradien Suhu (K)
- h : Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>K)
- A : Luas permukaan perpindahan panas (m<sup>2</sup>)
- T : Temperature permukaan (K)
- T<sub>0</sub> : Temperature fluida (K)
- $\Sigma$  : 5,6703 x 10<sup>-8</sup> (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>) – konstanta Stefan-Boltzmann

- T : Temperatur (K)  
A : Luas permukaan (m<sup>2</sup>)  
Q : Panas total yang dihasilkan perdetik. (W)  
 $Q_{gs}$  : Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geser. (W)  
 $Q_g$  : Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geram. (W)  
 $Q_u$  : Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang utama. (W)

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bahry, N. A., Nurrohkayati, A. S., Analisis perubahan temperatur mata pahat karbida pada proses pembubutan baja aisi 1045 dengan fem-simulation di pt. x, *TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika*, 9(2), 65–73, 2022.
- Habrat, W., Krupa, K., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E., Thermo-mechanical aspects of cutting forces and tool wear in the laser-assisted turning of Ti-6Al-4V titanium alloy using AlTiN coated cutting tools, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(3), 759–775, 2021.
- Jiang, F., Liu, Z., Wan, Y., Shi, Z., and Zhang, H., Experimental investigation of cutting tool temperature during slot milling of AerMet 100 steel, *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, 230(5), 838–847, 2016.
- Laperriere, L., Reinhart, G., *Encyclopedia of production engineering*, CIRP-The International Academy for Production Engineering, 2014.
- Liao, Z., Schoop J., Saelzer J., Bergmann B., Priarone P., Splettstößer A., Bedekar V., Zanger F., Kaynak Y., Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance, *CIRP J Manuf Sci Technol*, 50, 151–184, 2024.
- Liu, Y., Cui, N., Chen, H., Effect of temperature on milling stability of thin-walled parts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2022.
- Lubis, S. Y., Reynaldi, Askolani, A. P., Ariyanti, S., J. *Teknologi Industri*, and P. *Teknik Mesin*, Analisis keausan mata pahat dan waktu pemotongan pada proses drilling baja S 45 C, *Prosiding SERINA III*, 2021.
- Lubis, S. M., Darmawan, S., Adianto, Ericson, Effect of cutting speed on temperature cutting tools and surface roughness of AISI 4340 steel, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 508, 2019.
- Nasution A. R., Rahmatullah, R., Harahap, J., Pengaruh variasi putaran spindle terhadap gaya potong pada proses pemesinan, *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 2(2), 92–99, 2021.
- Ogedengbe, T.S., Okediji, A. P., Yussouf, A. A., Aderoba, O. A., Abiola, O. A., Alabi, I. O., Alonge, O. I., The effects of heat generation on cutting tool and machined workpiece, in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, 2019.
- Rochim, T., *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*. Penerbit HEDS, Bandung, 1993.
- Susanto, A. ., Yuwono, I., Wahyudi, N., Wicaknono, R., Analisa gaya potong pada proses frais komponen kereta api menggunakan octave: bagian 1 up milling, *Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur*, 13(02), 60 – 67, 2021.
- Sifa, A., Endramawan, T., Putra, M. P., Suwandi, D., and Amat, M. A., Utilization of minimum quantity lubrication (mql) chip fan on ss304 during milling process to increase carbide tool life, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 19(4), 10073–10083, 2022.
- Thành N.T., An, N.T., Simulation-based optimization for preform’s dimensions of an automotive bevel gear, *Conference: Proceeding of the 5th National Conference on Mechanical Science & Technology*, 2018.
- Yang, X., Chen, P., Heat transfer enhancement strategies for eco-friendly dry hobbing considering the heat exchange capacity of chips, *Case Studies in Thermal Engineering*, 29, 2022.
- Zgórníak, P., Stachurski, W., and Ostrowski, D., Application of thermographic measurements for the determination of the impact of selected cutting parameters on the temperature in the workpiece during milling process, *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 62(11), 657–664, 2016.
- Zhou, R., Analytical model of workpiece surface temperature prediction in 4-axis milling process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(8), 2155–2162, 2020.