Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

ISSN (Online): 3025-2598

`Artikel Penelitian

Penerapan Metoda High Pressure Jet Cooling (HPJC) untuk Mengurangi Keausan Tepi Pahat pada Proses Membubut dengan Kecepatan Rendah

Ismet Hari Mulyadi[a]

[a] *Departement Teknik Mesin Fakultas TEknik Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang 25163, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
Diterima Redaksi: 06 Desember 2023
Revisi Akhir: 20 Desember 2023
Diterbitkan *Online*: 29 Desember 2023

KATA KUNCI

High Pressure Jet Cooling (HPJC)
Keausan Tepi
Membubut

KORESPONDENSI

E-mail: ismet@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

High-Pressure Jet Cooling (HPJC) is an alternative method to the ineffective and environmentally friendly flooding method for coolant distribution at the cutting contact area. This method is widely utilized in machining materials that are difficult to cut or have superior mechanical properties using various tools with high cutting speeds. It will be difficult for coolant to penetrate the contact area at high cutting speeds. For this reason, in this study, HPJC is used to turn low-carbon steel material with a tool that has a low cutting speed. By using a tool capable of providing pressure variation in coolant delivery, flank wear as a result of the turning process was observed. The results were validated using ANOVA and Fisher's least significant differences methods. The results show that pressure variation can reduce the tool wear rate. However, the tools used were insufficient to distinguish the applied pressure change from the tool life reduction. This is because the coolant is only concentrated on the main plane of the tool. As a result, other types of wear, namely nose wear, have increased.

1. PENDAHULUAN

Cairan pending digunakan dalam proses pemesinan bertujuan untuk mengurangi gesekan, memberikan pelumasan, dan mendinginkan benda kerja dan mesin perkakas. Dengan penggunaan cairan pendingin ini akan dapat membantu memperpanjang umur pahat, meningkatkan kualitas permukaan, mencegah pembentukan BUE (*Built-up Edge*), mengevakuasi geram dari daerah pemotongan, dan melindungi benda kerja dari korosi dengan pembentukan lapisan film pada permukaan [1]. Namun demikian, penggunaannya juga memiliki beberapa kekurangan, seperti biaya, dampak lingkungan, dan potensi risiko kesehatan. Oleh karena itu pemilihan jenis cairan pendingin yang tepat untuk situasi tertentu untuk memaksimalkan efisiensi dan kualitas sekaligus meminimalkan efek negatifnya [2].

Secara umum cairan pendingin disalurkan ke daerah pemotongan melalui berbagai metode, seperti dengan cara membanjiri (*flooding*), penyemprotan (*spraying*), tetesan (*dripping*), pengkabutan (*misting*), dan dioleskan secara manual (*brushing*). Diantara metoda-metoda tersebut, yang paling umum adalah dengan cara membanjiri dengan pertimbangan membantu menciptakan lingkungan basah yang menyerap panas yang timbul selama proses pemesinan, sehingga berkontribusi pada pembuangan panas yang efektif [3]. Akibatnya, biaya penggunaan cairan pendingin pada proses pemesinan berkontribusi antara 8% - 17% dari biaya produksi [4],[5]. Padahal, menurut Sales dkk (2002), mengalirkan cairan pendingin dengan membanjiri yang diasumsikan akan meningkatkan kemampuan pendinginan tidak akan efektif dalam menurunkan suhu pemotongan pada antarmuka pahat dengan geram [6]. Hal ini disebabkan karena cairan pendingin tidak dapat secara efektif mencapai daerah deformasi utama [7]. Selain itu, Paul dan Chattopadhyay (1995) juga menyatakan baha metoda ini hanya efektif pada kecepatan potong yang rendah [8].

Penggunaan cairan pendingin pada proses pemesinan dengan cara membanjiri merupakan praktek yang sudah umum. Akan tetapi dampak negatif yang ditimbulkannya dan kurang efektifnya metoda [9] tersebut dalam meningkatkan mampu mesin menjadi alasan untuk mencari alternatif lain.

Salah satu alternatif yang dicoba diaplikasikan adalah dengan menggunakan metoda penyaluran cairan pendingin dengan kecepatan tinggi (*High Pressure Jet Cooling*-HPJC). HPJC adalah metode pendinginan dan pelumasan zona pemotongan dalam pemesinan dengan

https://doi.org/10.25077/xxxxx
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

menggunakan jet fluida bertekanan tinggi, biasanya air atau oli. Jet bertekanan tinggi diarahkan ke antarmuka pahat/ geram, memberikan efek pelumasan yang efisien yang membantu mengurangi gesekan, membuang panas, dan meningkatkan usia pakai pahat [10]-[15], dan mengurangi waktu siklus pemesinan [16]. HPJC umumnya digunakan dalam pemesinan material yang sulit dikerjakan dengan proses pemesinan dan mulai dikenal sebagai metode untuk meningkatkan laju pemindahan dan produktivitas secara substansial dalam industri pemotongan logam [17].

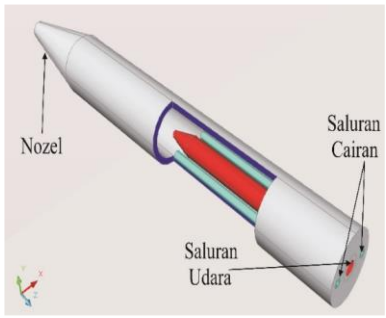
Walaupun penggunaan HPJC pada suatu proses pemesinan sangat bermanfaat, akan tetapi masih banyak tantangan dalam penerapan metoda ini yang harus dicarikan jalan keluarnya [18], [19]. Untuk itu berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengurangi faktor-faktor penghambat penerapannya secara praktis.

Kumar dkk (2002) dengan menggunakan metoda HPJC dengan tekanan 17 bar dan pahat *karbida tungsten* yang tidak berlapis dan berlapis menemukan bahwa terjadi peningkatan performansi proses pemesinan material ASSAB 718 [20]. Kesimpulan yang sama juga diperoleh oleh Mia dkk (2016) pada saat membubut material Ti-6AL-4V dengan menggunakan pahat karbida yang berlapis dan menggunakan tekanan yang relatif tinggi [21]. Sedangkan, Machado dkk (1998) menggunakan metoda HPJC dengan tekanan 16,67 MPa untuk meningkatkan performansi pahat dan mengendalikan aliran geram pada pemesinan material Ti6A14V dan Inconel 901. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa relatif tidak banyak pengaruh yang berarti dari penggunaan metoda ini terhadap objektif yang diamati [22]. Hal ini sejalan dengan penelitian Ezugwu dan Bonney (2003) dengan menggunakan aliran cairan pendingin yang lebih banyak dan variatif serta didukung dengan variasi tekanan. Mereka mendapatkan kenyataan bahwa terjadi ketidakkonsistenan performansi dari metoda HPJC pada pemesinan Inconel 718 dengan pahat keramik [23]. Bahkan dengan menggunakan pahat karbida berlapis, terjadi peningkatan keausan pahat dengan menggunakan metoda ini [24]

Mengacu pada penelitian sebelumnya dapat dinyatakan bahwa penggunaan metoda HPJC menunjukkan bahwa tidak semua aplikasi dari metoda ini dapat berhasil. Hal itu walaupun telah didukung oleh pahat berkecepatan tinggi dan berlapis yang secara teoritis memiliki koefisien gesek yang rendah. Hal ini disebabkan karena penggunaan cairan pendingin hanya efektif pada kecepatan potong yang rendah. Dengan kecepatan potong yang rendah daerah kontak pahat dan benda kerja memiliki tekan yang rendah sehingga memungkinan cairan pendingin untuk mempenetrasinya dengan baik apalagi jika diaplikasikan dengan tekanan yang tinggi [25]. Sedangkan kecepatan potong yang rendah hanya dapat dipergunakan pada material yang memiliki komposisi karbon menengah dan rendah. Untuk itulah, pada penelitian ini metoda HPJC dievaluasi dengan menggunakan pahat HSS (*High-speed steel*) yang memiliki kecepatan maksimum 30 m/menit untuk pemotongan baja karbon rendah. Mampu mesin yang dipilih sebagai indikator keberhasilan metoda ini adalah keausan tepi pahat. Sedangkan fokus utama yang dianggap menjadi faktor yang berpengaruh dari performansi dari penerapan metoda HPJC ini adalah tekanan aliran cairan pendingin ke daerah kontak yang divariasikan memalui bukaan katup kompresor yang dihubungkan dengan alat sederhana ke saluran cairan pendingin.

2. METODOLOGI

Untuk mencapai tujuan yang didefinisikan pada penelitian ini, proses membubut dilakukan terhadap benda kerja baja karbon rendah ST 37 yang memiliki diameter 25 mm dengan mempergunakan mesin perkakas bubut *Krisbow* KW 15-907 yang memiliki putaran spindel dan kecepatan makan maksimum berturut-turut 3600 RPM dan 14 mm/menit. Adapun pahat potong yang dipergunakan adalah pahat HSS dengan kecepatan potong (V_c) 30 m/menit. Sebelum proses pemotongan dilakukan, maka alat bantu penambah tekanan cairan pendingin dirancang dan difabrikasi sehingga memiliki bentuk seperti pada Gambar 1.



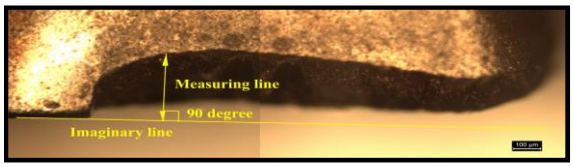
Gambar 1. Rancangan alat bantu penambah tekanan pada saluran cairan pendingin

Dengan alat bantu tersebut, cairan pendingin dengan jenis *Dromus* diarahkan untuk mempenetrasi daerah kontak pemotongan yang memiliki tebal geram sebelum terpotong (*Undeformed Chip Thickness*) sebesar 0,2 mm^2/ putaran. Adapun *nozzle* yang bewarna merah seperti pada Gambar 1 merupakan *outlet* udara bertekanan. Yang mana pada penelitian ini divariasikan dari kondisi tanpa tekanan (tanpa bukaan katup), dengan bukaan katup ¼, ½ dan katup yang terbuka penuh.

Selanjutnya proses pemotongan dilakukan sepanjang 100 mm dan kemudian keausan tepi yang terjadi diamati

 https://doi.org/10.25077/xxxxx

dengan mempergunakan mikroskop *stereo*. Hasil pengamatan bidang utama yang mengalami keausan kemudian diukur dengan mempergunakan perangkat lunak pengukuran yang menyatu dengan jenis mikroskop dipergunakan. Kurang lebih sekitar 15 titik pengukuran dipilih pada bidang utama yang mengalami keausan seperti pada Gambar 2. Adapun titik-titik tersebut merepresentasikan puncak dan lembah pada bidang utama yang mengalami abrasi pada permukaannya. Proses ini dilakukan secara berulang sampai nilai keausan tepi (VB) yang diperoleh telah sedikit melebih batas keausan tepi yang disyaratkan yaitu 0,3 mm [26].



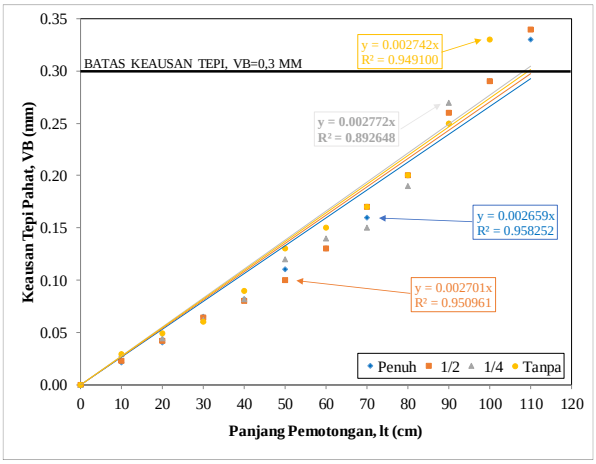
Gambar 2. Penampakan bidang utama yang mengalami keausan tepi [27]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Tekanan High Pressure Jet Cooling (HPJC) *terhadap Pergerakan Keausan Tepi Pahat*

Pada penelitian ini, pengaruh tekanan pada penerapan metoda HPJC terhadap keausan tepi pahat pada kecepatan potong rendah dan material baja karbon rendah dievaluasi. Pergerakan keausan tepi (*tool wear progression*) menjadi fokus pertama dari tahapan evaluasi. Hal ini disebabkan trend pergerakan keausan pahat merupakan indikator awal dalam mengevaluasi performansi dari sebuah pilihan kondisi pemotongan. Perbedaan tekanan pada penelitian ini divariasikan berdasarkan bukaan katup kompresor. Hasil evaluasi diberikan pada Gambar 3.

Dari Gambar 3 diketahui bahwa akibat variasi bukaan katup kompresor terjadi perubahan pergerakan laju keausan tepi pahat. Walaupun dari Gambar 3 secara umum terlihat perbedaan yang relatif kecil antara laju keausan pahat pada berbagai variasi bukaan katup. Hal ini diindikasikan perbedaan kemiringan dari kurva trend laju keausan tepi pahat. Yang mana nilai kemiringan ini untuk variasi bukaan pahat memiliki orde yang sangat kecil yaitu 1/1000. Oleh sebab itu sulit untuk membandingkan performansi yang dihasilkannya secara valid.

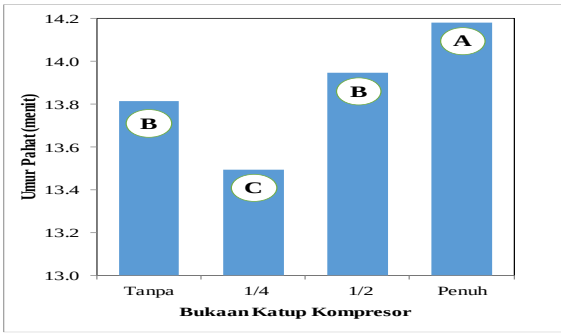


Gambar 3. Pertumbuhan keausan tepi pahat HSS akibat perbedaan tekanan dari metoda HPJC

Perbedaan yang akan lebih jelas jika dilihat dari sisi berapa lama pahat dapat bertahan sampai batas keausan tepi yang digunakan yaitu 0,3 mm tercapai. Walaupun begitu secara visual dari Gambar 3 dapat diamati bahwa untuk mencapai batas keausan tepi yang ditetapkan, penggunaan metoda HPJC dengan bukaan katup penuh dapat memotong benda kerja dalam waktu yang lebih lama (ditandai dengan kemiringan dengan warna biru). Dengan kata lain, semakin besar bukaan katup maka laju keausan pahat akan semakin lambat. Kecenderungan yang sama tetapi dengan pergerakan yang lebih lambat dihasilkan pada bukaan katup ½ (ditandai dengan kemiringan dengan warna oranye). Akan tetapi jika bukaan katup diperkecil menjadi ¼ (ditandai dengan warna abu-abu), pergerakan keausan menjadi lebih cepat. Bahkan jika udara bertekanan tidak dialiri ke sistem penyaluran cairan pendingin atau tanpa bukaan katup laju keausan lebih baik dari bukaan katup ¼ (ditandai dengan kemiringan dengan warna kuning). Hal ini kemungkinan disebabkan antara bukaan katup ¼ dengan tanpa bukaan katup tidak cukup untuk mengakselerasi kecepatan aliran sehingga mengalami kesulitan mempenetrasi daerah kontak pemotongan yang memiliki tekanan yang relatif tinggi [25].

3.2. Pengaruh Tekanan High Pressure Jet Cooling terhadap Umur Pahat

Performansi dari penerapan metoda HPJC dengan variasi bukaan katup dilihat dari sisi pergerakan keausan tepi pahat tidak dapat memberikan gambaran yang jelas. Untuk itu evaluasi dilihat lebih lanjut dari sisi umur pahat yang dihasilkan. Hasil perhitungan umur pahat yang mengacu kepada laju keausan yang dihasilkan pada bagian 3.1 diberikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Perbedaan umur pahat sebagai akibat perbedaan tekanan penyaluran metoda HPJC

Dengan mempergunakan batas keausan tepi 0,3 mm, maka dapat diketahui umur pahat pada penggunaan metoda HPC dengan variasi bukaan katup. Seperti halnya pada pergerakan laju keausan pahat, umur pahat yang paling lama dapat dicapai pada bukaan katup penuh dan diikuti dengan bukaan katup ½, tanpa bukaan katup dan bukaan katup ¼.

Table 1. Hasil pengujian statistik dengan metoda ANOVA

Source	DF	Seq SS	Contr.	Adj SS	Adj MS	F-Value	ρ-Value
Bukaan	3	0,573	93,98%	0,573	0,19089	20,80	0,007
Error	4	0,037	6,02%	0,034	0,00918		
Total	7	0,609	100,00%				

Selanjutnya, sebelum diskusi dapat dikembangkan untuk hasil yang diperoleh, metoda one-way ANOVA (*Analysis of Variances*). Hasil ANOVA dapat dilihat pada Tabel 1. Yang mana dapat diketahui bahwa bukaan katup memberikan pengaruh yang berarti terhadap performansi dari metoda HPJC. Hal ini ditandai dengan nilai ρ–*value* yang kecil dari 0,05 (dengan tingkat keyakinan 95%).

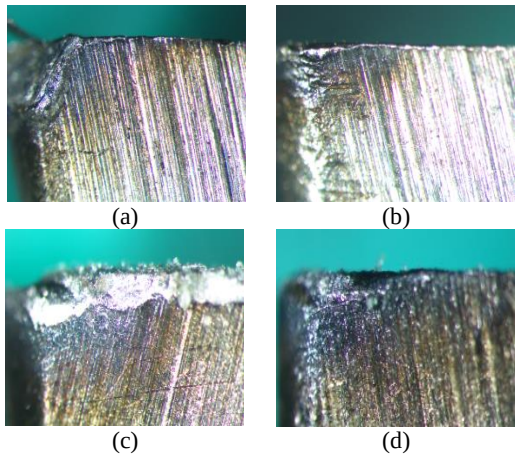
Table 2. Perbandingan antar variasi tekanan dengan mempergunakan metoda FPC

Diff. of Levels	Diff. of Means	SE of Diff.	95% CI	T-Value	Adjusted ρ-Value
1/4 - 1/2	-0,4500	0,0958	(-0.7160, -0.1840)	-4,70	0,009
Penuh - 1/2	0,3000	0,0958	(0.0340, 0.5660)	3,13	0,035
Tanpa - 1/2	-0,0921	0,0958	(-0.3581, 0.1739)	-0,96	0,391
Penuh - 1/4	0,7500	0,0958	(0.4840, 1.0160)	7,83	0,001
Tanpa - 1/4	0,3579	0,0958	(0.0919, 0.6239)	3,74	0,020
Tanpa - Penuh	-0,3921	0,0958	(-0.6581, -0.1261)	-4,09	0,015

Simultaneous confidence level = 84.70%

Sedangkan perbedaan antara variasi bukaan katup yang dipilih pada penelitian ini diuji dengan memperluas hasil ANOVA dengan menggunakan metoda perbandingan *Fisher Pairwise Comparison* (FPC). Hasil pengujian perbandingan secara statistik selanjutnya diberikan pada Tabel 2.

Ternyata dengan tingkat keyakinan yang diuji secara terus-menerus, yang memiliki nilai 84,7%, perbandingan antara bukaan katup ½ dengan tanpa bukaan katup sama sekali tidak memiliki perbedaan yang berarti. Ini menginsyaratkan bahwa tekanan kompresor yang diberikan dengan bukaan katup ½ maupun ¼ tidak cukup untuk mengakselarasi performansi dari metoda HPJC pada penelitian ini. Untuk itu diperlukan tekanan dari kompresor yang lebih besar untuk menghasilkan perbedaan yang berarti antara bukaan katup yang divariasikan. Hal ini juga dapat dilihat pada perbedaan kelompok antara bukaan katup yang diuji dengan menggunakan metoda *Fisher Least Significant Differences* (LSD) yang divisualkan pada Gambar 4. Yang mana umur pahat antara bukaan katup ½ maupun tanpa bukaan katup berada pada kelompok yang sama. Dengan kata lain, bukaan katup ½ belum mampu memberikan tekanan yang cukup untuk membantu aliran cairan pendingin untuk mempenetrasi daerah kontak pemotongan apalagi dengan bukaan katup yang lebih rendah (1/4). Akibatnya, umur pahat yang dihasilkan tidak berbeda dengan umur pahat yang dihasilkan pada proses pemotongan dengan cairan pendingin yang memiliki kecepatan alamiah yang diberikan oleh pompa distribusi cairan.



Gambar 5. Bentuk bidang utama pahat pada panjang pemotongan akhir umur pahat, (a) Bukaan penuh; (b) Bukaan ½, (c) Bukaan ¼, dan (d) Tanpa Bukaan

Selanjutnya, walaupun dengan bukaan katup yang besar mampu mengakselarasi performansi metoda HPJC dalam mempenetrasi daerah kontak dan menghasilkan tingkat keausan tepi (*flank wear*) pahat yang rendah akan tetapi dengan kecepatan aliran yang tinggi proses perpindahan panas hanya terkonsentrasi pada bagian mata potong utama. Sedangkan bagian lain tidak mendapatkan pendinginan yang cukup sehingga menyebabkan bagian ujung pahat (*nose*) mengalami keausan yang relatif besar (Gambar 5a). Hal ini berbeda dengan variasi tekanan yang lebih rendah maupun tanpa

 https://doi.org/10.25077/xxxxx

tekanan sama sekali (Gambar 5b-Gambar 5d). Yang mana kondisi ini juga ditemukan pada pemotongan untuk material yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik [22].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa secara umum penggunaan metoda HPJC cukup efektif mengurangi keausan tepi pahat jika tekanan yang diberikan cukup membantu dalam mempenetrasi daerah kontak pemotongan antara pahat dan benda kerja. Akan tetapi dengan tingginya tekanan yang diberikan menyebabkan daerah penyaluran cairan pendingin menjadi terkonsentrasi pada rentang daerah yang sempit. Akibatnya tingkat keausan tepi pahat menurun akan tetapi daerah ujung yang tidak mendapatkan penyaluran yang cukup mengalami keausan yang relatif tinggi. Jadi dalam penerapan metoda HPJC tidak hanya tingkat tekanan yang yang harus diperhatikan tetapi juga posisi penempatan *nozzle* yang efektif. Selain itu desain dari alat bantu untuk meningkatkan tekanan aliran dari cairan pendingin ke daerah kontak juga harus menjadi pertimbangan supaya alirannya tidak mengalami impulse yang disebabkan terjadinya momentum pada saluran ke luar dari *nozzle*. Impulse yang terjadi pada saluran ke luar cairan pendingin akan menyebabkan volume dan kecepatan cairan pendingin yang ke luar menjadi kurang sehingga tidak efektif dalam mempenetrasi daerah kontak pemotongan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diucapkan kepada Muhammad Fadhlan Mustaqim yang telah membantu dalam pengambilan data pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. Singh, S. S. Gill, M. Dogra, and R. Singh, “A review on cutting fluids used in machining processes,” *Eng. Res. Express*, vol. 3, no. 1, p. 012002, Mar. 2021, doi: 10.1088/2631-8695/abeca0.

[2] Thomas, “Cutting Fluids for Machining,” 2023. https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/cutting-fluids-for-machining/

[3] T. Nakamura, F. Itoigawa, and K. Kawata, “Ecological-friendly Oil Film on Water Fog Metalworking Fluid,” in *Tribology and Interface Engineering Series*, A. A. L. D. Dowson, M. Priest, G. Dalmaz, Ed. Elsevier ltd, 2005, pp. 475–480. doi: 10.1016/S0167-8922(05)80049-5.

[4] V. P. Astakhov, “Ecological Machining: Near-dry Machining,” in *Machining*, London: Springer London, 2008, pp. 195–223. doi: 10.1007/978-1-84800-213-5_7.

[5] M. Danish, T. L. Ginta, K. Habib, D. Carou, A. M. A. Rani, and B. B. Saha, “Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 5–8, pp. 2855–2868, Jul. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9893-5.

[6] W. F. Sales, G. Guimarães, Á. R. Machado, and E. O. Ezugwu, “Cooling ability of cutting fluids and measurement of the chip-tool interface temperatures,” *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 54, no. 2, pp. 57–68, Apr. 2002, doi: 10.1108/00368790210424121.

[7] P. K. W. E M Trent, *Metal Cutting*, 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2000.

[8] S. Paul and A. B. Chattopadhyay, “Effects of cryogenic cooling by liquid nitrogen jet on forces, temperature and surface residual stresses in grinding steels,” *Cryogenics (Guildf).*, vol. 35, no. 8, pp. 515–523, Aug. 1995, doi: 10.1016/0011-2275(95)98219-Q.

[9] T. H. C. Childs, K. Maekawa, and P. Maulik, “Effects of coolant on temperature distribution in metal machining,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 11, pp. 1006–1019, Nov. 1988, doi: 10.1179/mst.1988.4.11.1006.

[10] M. Mazurkiewicz, Z. Kubala, and J. Chow, “Metal Machining With High-Pressure Water-Jet Cooling Assistance—A New Possibility,” *J. Eng. Ind.*, vol. 111, no. 1, pp. 7–12, Feb. 1989, doi: 10.1115/1.3188736.

[11] R. Kovacevic, C. Cherukuthota, and M. Mazurkiewicz, “High pressure waterjet cooling/lubrication to improve machining efficiency in milling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 35, no. 10, pp. 1459–1473, Oct. 1995, doi: 10.1016/0890-6955(95)00128-K.

[12] A. R. Machado and J. Wallbank, “The Effects of a High-Pressure Coolant Jet on Machining,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 208, no. 1, pp. 29–38, Feb. 1994, doi: 10.1243/PIME_PROC_1994_208_057_02.

[13] P. Dahlman, “A comparison of temperature reduction in high-pressure jet-assisted turning using high pressure versus high flowrate,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 216, no. 4, pp. 467–473, Apr. 2002, doi: 10.1243/0954405021520067.

[14] P. Dahlman and M. Escursell, “High-pressure jet-assisted cooling: a new possibility for near net shape turning of decarburized steel,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 1, pp. 109–115, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00058-0.

[15] M. Kamruzzaman and N. R. Dhar, “The effect of applying high-pressure coolant (HPC) jet in machining of 42CrMo4 steel by uncoated carbide

inserts," *J. Mech. Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 71–77, 2008.
[16] MP-Systems, "Understanding High Pressure Coolant Systems," 2023. https://www.mp-systems.net/high-medium-pressure-coolant-systems/benefits-of-hpc-systems/
[17] D. Kramar and J. Kopac, "High pressure cooling in the machining of hard-to-machine materials," *High Press. Cool. Mach. hard-to-machine Mater.*, vol. 55, no. 11, pp. 685–694, 2009.
[18] Christer Richt, "Using High-pressure Coolant," 2011. https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/management/using-high-pressure-coolant
[19] J. Xu, L. He, H. Su, and L. Zhang, "Tool wear investigation in high-pressure jet coolant assisted machining Ti2AlNb intermetallic alloys based on FEM," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 1, no. 4, pp. 219–228, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ijlmm.2018.08.007.
[20] A. Senthil Kumar, M. Rahman, and S. L. Ng, "Effect of High-Pressure Coolant on Machining Performance," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 83–91, Jul. 2002, doi: 10.1007/s001700200128.
[21] M. Mia, M. A. Khan, and N. R. Dhar, "High-pressure coolant on flank and rake surfaces of tool in turning of Ti-6Al-4V: investigations on surface roughness and tool wear," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, no. 5–8, pp. 1825–1834, May 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9512-5.
[22] A. R. Machado, J. Wallbank, I. R. Pashby, and E. O. Ezugwu, "TOOL PERFORMANCE AND CHIP CONTROL WHEN MACHINING Ti6A14V AND INCONEL 901 USING HIGH PRESSURE COOLANT SUPPLY," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, Aug. 1998, doi: 10.1080/10940349808945655.
[23] E. O. Ezugwu and J. Bonney, "Effect of High-Pressure Coolant Supplies when Machining Nickel-Base, Inconel 718, Alloy with Ceramic Tools," *Tribol. Trans.*, vol. 46, no. 4, pp. 580–584, Jan. 2003, doi: 10.1080/10402000308982667.
[24] E. O. Ezugwu and J. Bonney, "Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153–154, pp. 1045–1050, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.329.
[25] T. H. C. Childs, "Friction modelling in metal cutting," *Wear*, vol. 260, no. 3, pp. 310–318, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.wear.2005.01.052.
[26] ISO, *Tool-life testing with single-point turning tools*, 2nd ed. ISO, 1993.
[27] I. H. Mulyadi, "Improving the performance of minimum quantity lubrication in high speed milling and environmental performance analysis," Manchester, 2013.