

Pengaruh Cairan Pendingin Bertekanan Tinggi terhadap Keausan Tepi Pahat, Gaya Potong, dan Kekasaran Permukaan pada Pembubutan Baja AISI 4340

Arum Soesanti^a, Bobby O.P. Soepangkat^b, Bambang Pramujati^b

^a Mahasiswa Program Pascasarjana, Jurusan Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia

^b Laboratorium Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia

Abstract

In the metal cutting process, friction between the work piece and the tool will generate heat, creating high temperature in the chip-tool interface. It will increase cutting force, tool wear, and surface roughness. Conventional cooling using standard pressure coolant (SPC) is usually applied to reduce the cutting temperature, tool wear and surface roughness. However, this cooling method is not effective because it could not reach the area between the chip and tool rake interface where the maximum temperature occurs. Applying high pressure coolant (HPC) is one effective way to reduce the cutting temperature, cutting forces, flank wear, and surface roughness. The present work investigates the role of HPC on cutting forces, flank wear, surface roughness and chip form in turning AISI 4340. The experimental result indicated significant reduction in cutting forces, flank wear, and surface roughness on the application of HPC.

Keywords: high pressure coolant (HPC), cutting forces, flank wear and surface roughness.

1. PENDAHULUAN

Pada proses pemotongan logam, gesekan yang terjadi antara pahat dengan benda kerja akan menimbulkan panas yang tinggi, sehingga mempercepat terjadinya keausan tepi pahat. Selain itu, peningkatan keausan tepi pahat akan berdampak pada peningkatan gaya potong yang terjadi, sehingga kekasaran permukaan akan meningkat. Oleh karena itu, penggunaan cairan pendingin pada proses pemotongan logam sangat dibutuhkan.

Namun, pendinginan secara konvensional kurang efektif karena tidak mampu menjangkau daerah antara bidang geram dan bidang utama pahat dimana temperatur maksimum terjadi. Selain itu, pemakaian cairan pendingin yang tidak berkesinambungan akan mengakibatkan bidang aktif pahat mengalami beban thermal yang berfluktuasi yang dapat menyebabkan kerusakan pada pahat.

Penggunaan cairan pendingin bertekanan tinggi (CPBT) dengan menggunakan *water-soluble oil* dapat meningkatkan umur pahat hingga 250% dibandingkan dengan penggunaan cairan pendinginan tanpa tekanan (CPTT) pada proses bubut Ti-6AL-4V [1]. Penggunaan CPBT pada proses pemotongan logam juga memungkinkan terjadinya pengurangan temperatur pada daerah antara bidang geram dan bidang utama pahat, sehingga dapat mengurangi koefisien gesek, pembentukan *built-up edge*, dan

distorsi thermal pada pahat dan benda kerja. Hal ini dapat mengurangi terjadinya *flank wear* pada pahat dan meningkatkan umur pahat [2]. Selain itu, Dhar [3] juga menyatakan bahwa penggunaan CPBT dapat mengurangi gaya pemotongan dan temperatur yang terjadi, serta dapat mengurangi konsumsi cairan pendingin sebesar 50%. Bahkan, penggunaan cairan pendingin bertekanan tinggi (80 bar) pada proses bubut untuk material AISI 4320 dapat menurunkan keausan pahat, meningkatkan umur pahat dan menurunkan kekasaran permukaan benda kerja bila dibandingkan dengan proses bubut tanpa penggunaan cairan pendingin [4]. Pada proses bubut material 42CrMo4, penggunaan CPBT dapat menurunkan temperatur pahat dan secara signifikan dapat mengurangi keausan tepi pahat sehingga dapat meningkatkan umur pahat. Penggunaan CPBT menyebabkan pertumbuhan kekasaran permukaan selama pemesinan semakin rendah sehingga dapat meningkatkan kualitas produk [5].

Untuk mengetahui lebih jauh lagi efektifitas dari penggunaan cairan pendingin bertekanan tinggi, maka dilakukan penelitian tentang pengaruh cairan pendingin bertekanan tinggi (CPBT) pada proses bubut, terhadap gaya pemotongan, keausan tepi pahat, dan kekasaran permukaan benda kerja. Untuk mengetahui besar pengaruh CPBT terhadap penurunan gaya pemotongan, keausan tepi pahat, dan

		d ₁		d ₂		d ₃	
		Fv ₁	Fv ₂	Fv ₁	Fv ₂	Fv ₁	Fv ₂
V ₁	f ₁	33.30	33.78	45.47	45.42	58.40	58.02
	f ₂	42.56	42.70	54.01	53.77	63.88	64.96
	f ₃	43.73	43.83	55.65	56.10	73.73	74.17
V ₂	f ₁	27.39	28.05	43.95	44.04	53.47	54.02
	f ₂	34.97	35.11	55.28	54.78	63.98	64.85
	f ₃	53.77	55.76	73.81	75.37	85.74	85.53
V ₃	f ₁	27.86	28.08	37.86	35.04	56.45	56.84
	f ₂	36.45	36.30	57.87	58.31	62.76	63.40
	f ₃	47.30	47.93	65.36	64.22	77.50	78.88

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.82756	0.41378	284.85	0.00
Residual error	51	0.07408	0.00145		
Lack of fit	6	0.01344	0.00224	1.66	0.152
Pure error	45	0.06064	0.00135		
Total	53	0.90165			
S = 0.0381136 R-Sq = 91.8% R-Sq(adj) = 91.5%					

Prediktor	Koefisien	Nilai P
Konstanta	2.0914	0.00
Log f	0.60749	0.00
Log d	0.79749	0.00

Prediktor	Koefisien	Nilai P
Konstanta	1.49212	0.00
Log f	0.23069	0.00
Log d	0.74621	0.00

σ_{ε}^2

$$\text{Log } F_f = 1.49 + 0.231 \text{ Log } f + 0.746 \text{ Log } d \quad (3)$$

$$F_f = 30.90 f^{0.231} d^{0.746} \quad (4)$$

$$\text{Log } F_v = 2.09 + 0.607 \text{ Log } f + 0.797 \text{ Log } d \quad (1)$$

$$F_v = 123.03 f^{0.607} d^{0.797} \quad (2)$$

		d ₁		d ₂		d ₃	
		Ff ₁	Ff ₂	Ff ₁	Ff ₂	Ff ₁	Ff ₂
V ₁	f ₁	19.35	19.49	24.71	24.82	33.69	32.40
	f ₂	21.62	21.53	27.61	27.54	32.47	32.46
	f ₃	23.36	23.20	27.80	27.01	33.14	34.33
V ₂	f ₁	17.84	17.54	22.80	23.80	27.62	29.17
	f ₂	18.06	19.07	25.43	25.68	33.75	33.52
	f ₃	21.97	22.77	28.38	27.53	35.64	34.42
V ₃	f ₁	18.07	18.35	24.96	24.08	34.34	33.66
	f ₂	17.04	17.19	27.76	27.92	33.51	34.01
	f ₃	23.00	20.48	33.75	33.21	36.08	37.39

		d ₁		d ₂		d ₃	
		Fv ₁	Fv ₂	Fv ₁	Fv ₂	Fv ₁	Fv ₂
V ₁	f ₁	36.38	36.09	49.18	48.99	63.10	68.19
	f ₂	45.40	44.84	61.50	61.69	77.74	79.45
	f ₃	45.74	47.17	80.89	80.57	94.70	95.11
V ₂	f ₁	37.15	37.32	44.61	45.21	58.89	59.97
	f ₂	35.26	35.66	54.90	55.57	72.40	73.30
	f ₃	56.69	51.81	84.33	84.39	97.84	97.74
V ₃	f ₁	37.28	37.50	44.28	44.98	59.47	56.07
	f ₂	42.72	44.11	54.44	54.62	72.60	73.05
	f ₃	54.34	55.03	69.66	70.53	83.98	83.93

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.50233	0.25116	279.33	0.00
Residual error	51	0.04586	0.0009		
Lack of fit	6	0.00851	0.00142	1.71	0.141
Pure error	15	0.03735	0.00083		
Total	53	0.54819			
S = 0.0299861 R-Sq = 91.6% R-Sq(adj) = 91.3%					

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.86365	0.43182	337.83	0.00
Residual error	51	0.06519	0.00128		
Lack of fit	6	0.02022	0.00337	3.37	0.178
Pure error	15	0.04497	0.001		
Total	53	0.92884			
S = 0.0357522 R-Sq = 93.0% R-Sq(adj) = 92.7%					

Prediktor Koefisien Nilai P

Konstanta 2.14504 0.00

Log f 0.61566 0.00

Log d 0.81842 0.00

$$\text{Log Ff} = 1.69 + 0.342 \text{ Log f} + 0.813 \text{ Log d} \quad (7)$$

$$F_f = 48.98 f^{0.342} d^{0.813} \quad (8)$$

$$\text{Log Fv} = 2.15 + 0.616 \text{ Log f} + 0.818 \text{ Log d} \quad (5)$$

$$F_v = 141.25 f^{0.616} d^{0.818} \quad (6)$$

		d ₁		d ₂		d ₃	
		Ff ₁	Ff ₂	Ff ₁	Ff ₂	Ff ₁	Ff ₂
V ₁	f ₁	23.04	23.58	31.70	31.31	42.51	45.11
	f ₂	26.54	26.42	35.94	35.99	49.14	49.44
	f ₃	27.24	27.77	43.31	43.23	57.69	56.58
V ₂	f ₁	24.74	26.67	30.60	28.78	36.84	37.49
	f ₂	25.51	25.72	31.32	32.15	43.63	43.78
	f ₃	28.74	28.69	38.28	38.38	54.96	54.51
V ₃	f ₁	22.51	23.39	30.50	30.65	39.76	37.39
	f ₂	24.91	24.82	32.19	32.23	43.37	43.41
	f ₃	29.12	29.58	36.33	36.80	48.75	50.42

		d ₁		d ₂		d ₃	
		Ra	Ra ₁	Ra	Ra ₁	Ra	Ra ₁
V ₁	f ₁	1.2	1.2	1.0	1.1	1.2	1.3
	f ₂	1.7	1.7	1.6	1.7	1.8	1.9
	f ₃	2.6	2.5	2.5	2.3	2.7	2.7
V ₂	f ₁	0.9	0.8	1.0	0.9	1.1	1.0
	f ₂	1.5	1.4	1.5	1.4	1.6	1.5
	f ₃	2.3	2.4	2.3	2.1	2.4	2.3
V ₃	f ₁	0.9	1.1	0.9	0.8	1.0	0.9
	f ₂	1.2	1.3	1.7	2.0	1.3	1.2
	f ₃	1.7	1.8	2.0	1.9	2.1	1.9

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.64059	0.3203	344.92	0.00
Residual error	51	0.04736	0.00093		
Lack of fit	6	0.01752	0.00292	1.46	0.183
Pure error	45	0.02984	0.00066		
Total	53	0.68795			

S = 0.0304732 R-Sq = 93.1% R-Sq(adj) = 92.8%

		d ₁		d ₂		d ₃	
		Ra	Ra ₁	Ra	Ra ₁	Ra	Ra ₁
V ₁	f ₁	1.5	1.2	1.7	1.6	1.3	1.4
	f ₂	1.8	2.1	1.7	1.0	1.7	1.6
	f ₃	3.0	2.9	2.5	2.6	3.4	3.4
V ₂	f ₁	1.3	1.2	1.3	1.2	1.0	1.2
	f ₂	1.9	2.1	1.7	1.5	1.5	1.5
	f ₃	2.7	2.8	2.6	2.7	3.1	3.3
V ₃	f ₁	0.9	1.0	1.1	1.2	0.9	1.1
	f ₂	1.6	1.7	1.7	1.9	1.6	1.8
	f ₃	2.3	2.3	3.1	3.0	3.2	3.0

Prediktor Koefisien Nilai P

Konstanta 1.6949 0.00

Log f 0.34179 0.00

Log d 0.81311 0.00

$$\text{Log Ra} = 1.60 - 0.160 \log V + 1.21 \text{ Log f} \quad (11)$$

$$\text{Ra} = 39.81V^{-0.160} f^{1.21} \quad (12)$$

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1.16985	0.58493	284.42	0.00
Residual error	51	0.10188	0.00206		
Lack of fit	6	0.01571	0.00262	1.32	0.267
Pure error	45	0.08917	0.00198		
Total	53	1.27474			

S = 0.0453494 R-Sq = 91.8% R-Sq(adj) = 91.4%

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1.2344	0.6172	108.87	0.00
Residual error	51	0.28912	0.00567		
Lack of fit	6	0.12232	0.02039	2.5	0.135
Pure error	45	0.1668	0.00371		
Total	53	1.52352			

S = 0.0752933 R-Sq = 89.0% R-Sq(adj) = 88.3%

Respon	Variabel Proses	Pangkat dari variabel bila memotong dengan-		Persentase penurunan pangkat
		CPBT	CPTT	
Gaya potong	f	0.607	0.616	1.461
	d	0.797	0.818	2.5672
Gaya makan	f	0.231	0.342	32.4561
	d	0.746	0.813	8.2411
Kekasaran permukaan	V	-0.351	-0.16	54.416
	f	1.14	1.21	5.7851

Prediktor Koefisien Nilai P

Konstanta	1.8587	0.00
Log V	-0.35079	0.00
Log f	1.1407	0.00

Prediktor Koefisien Nilai P

Konstanta	1.6038	0.00
Log V	-0.1602	0.023
Log f	1.21416	0.00

$$\text{Log Ra} = 1.86 - 0.351 \log V + 1.14 \text{ Log f} \quad (9)$$

$$\text{Ra} = 72.44 V^{-0.351} f^{1.14} \quad (10)$$

Nilai koefisien gesek pada proses bubut dapat ditentukan dengan rumus [7] sebagai berikut:

$$\mu = \frac{F_f + F_v \tan \gamma_0}{F_v - F_f \tan \gamma_0} \quad (13)$$

Tabel 20 Harga Koefisien Gesek

		a ₁		a ₂		a ₃		
		μ	μ	μ	μ	μ	μ	
CPBT	V ₁	f ₁	0.25	0.24	0.22	0.22	0.24	0.23
		f ₂	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18
		f ₃	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17
	V ₂	f ₁	0.16	0.15	0.13	0.15	0.13	0.15
		f ₂	0.08	0.10	0.09	0.09	0.17	0.16
		f ₃	0.11	0.10	0.11	0.09	0.16	0.15
	V ₃	f ₁	0.11	0.12	0.14	0.13	0.19	0.19
		f ₂	0.04	0.05	0.12	0.13	0.15	0.15
		f ₃	0.10	0.06	0.17	0.15	0.15	0.16
CPTT	V ₁	f ₁	0.29	0.30	0.30	0.29	0.32	0.31
		f ₂	0.25	0.25	0.25	0.25	0.29	0.28
		f ₃	0.26	0.25	0.21	0.21	0.27	0.26
	V ₂	f ₁	0.31	0.35	0.33	0.29	0.28	0.28
		f ₂	0.36	0.36	0.24	0.25	0.27	0.26
		f ₃	0.19	0.23	0.14	0.14	0.23	0.23
	V ₃	f ₁	0.27	0.28	0.33	0.33	0.32	0.31
		f ₂	0.25	0.23	0.26	0.26	0.26	0.26
		f ₃	0.21	0.21	0.20	0.20	0.25	0.26

Tabel 20 menunjukkan nilai koefisien gesek berdasarkan perhitungan yang dilakukan dari data-data yang telah didapatkan sebelumnya. Dari tabel tersebut terlihat bahwa koefisien gesek pada variabel proses yang sama, memiliki nilai yang lebih rendah apabila pada kondisi pemotongan menggunakan CPBT daripada kondisi pemotongan yang menggunakan CPTT.

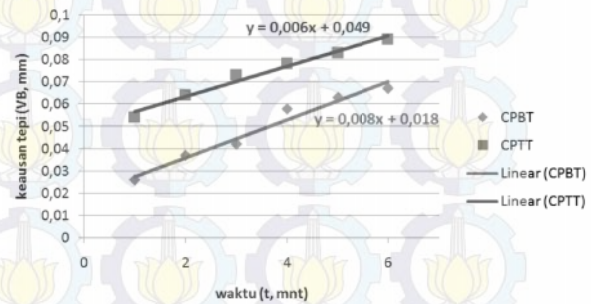
Tabel 21. Keausan tepi pahat

	proses	v	f	d	t	VB
CPBT	1	141.3	0.1	2	1	0.026
	2	141.3	0.1	2	1	0.037
	3	141.3	0.1	2	1	0.042
	4	141.3	0.1	2	1	0.058
	5	141.3	0.1	2	1	0.063
	6	141.3	0.1	2	1	0.067
CPTT	1	141.3	0.1	2	1	0.054
	2	141.3	0.1	2	1	0.064
	3	141.3	0.1	2	1	0.073
	4	141.3	0.1	2	1	0.078
	5	141.3	0.1	2	1	0.083
	6	141.3	0.1	2	1	0.089

VB (mm)

Selain itu, untuk mengetahui lebih lanjut perbandingan antara hasil proses menggunakan CPBT dan CPTT, dilakukan pengamatan untuk keausan tepi pahat. Data pengamatan tersebut dapat dilihat pada Tabel 21.

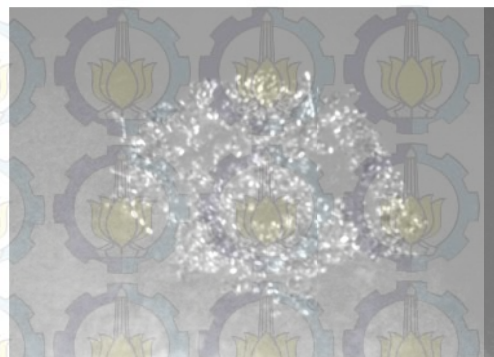
Berdasarkan data pada tabel 21, dibuat grafik untuk mengetahui kecenderungan keausan tepi pahat. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.



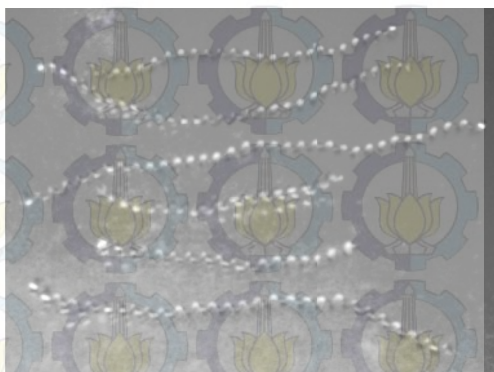
Gambar 2. Grafik Keausan Tepi Pahat

Gambar 2 menunjukkan bahwa pertumbuhan keausan tepi pahat pada proses bubut dengan menggunakan CPBT lebih rendah bila dibandingkan dengan proses bubut dengan menggunakan CPTT.

Untuk melengkapi perbandingan penggunaan CPBT dan CPTT juga dilakukan perbandingan dari geram yang dihasilkan pada proses pembubutan.



Gambar 3. Geram Hasil Proses Bubut CPBT



Gambar 4 Geram Hasil Proses Bubut CPTT

Gambar 3 menunjukkan geram hasil pembubutan dengan CPBT, sedangkan gambar 4 menunjukkan geram hasil pembubutan dengan CPTT. Dari gambar 3 dan 4 terlihat bahwa geram hasil proses pembubutan dengan CPBT mempunyai bentuk yang lebih pendek dibanding bentuk geram pada pembubutan dengan CPTT. Selain itu, geram yang dihasilkan oleh proses bubut dengan CPBT lebih tipis dibandingkan dengan geram yang dihasilkan proses bubut dengan CPTT. Hal ini bisa ditunjukkan pada perhitungan rasio pemampatan tebal geram [7] berikut ini.

Untuk volume konstan dan tidak ada deformasi kearah samping maka,

$$\lambda_h = \frac{h_c}{h} \quad (14)$$

dengan,

h = tebal geram sebelum terpotong (mm)

h_c = tebal geram setelah terpotong (mm)

Tebal geram sebelum terpotong (h) dapat dicari dengan rumus:

$$h = f \sin K_r \quad (15)$$

dengan,

f = gerak makan (mm/put)

K_r = sudut potong utama pahat = 90°

Untuk harga $f = 0.2$ mm/put, maka $h = 0.2 \sin 90^\circ = 0.2$ mm.

Dengan pengukuran secara langsung terhadap tebal geram setelah terpotong didapatkan:

Untuk CPBT $h_c = 0.22$

Untuk CPTT $h_c = 0.26$

Dengan demikian, nilai rasio pemampatan tebal geram adalah

$$\text{Untuk CPBT : } \lambda_h = \frac{0.22}{0.2} = 1.1$$

$$\text{Untuk CPTT : } \lambda_h = \frac{0.26}{0.2} = 1.3$$

Dari perhitungan sebelumnya dapat dinyatakan, bahwa jika tebal geram sebelum pemotongan sama, maka semakin rendah nilai rasio pemampatan tebal geram, semakin tipis juga geram yang dihasilkan.

Dengan cara perhitungan yang sama, dilakukan perhitungan rasio pemampatan tebal geram untuk $f_1 = 0.15$ mm/put dan $f_2 = 0.1$ mm/put, dan hasilnya ditunjukkan tabel 16.

Tabel 16. Perbandingan Rasio Pemampatan Tebal Geram

	λ_h (CPBT)	λ_h (CPTT)
f_1	$\frac{0.19}{0.15} = 1.3$	$\frac{0.22}{0.15} = 1.5$

f_2	$\frac{0.16}{0.1} = 1.6$	$\frac{0.19}{0.1} = 1.9$
-------	--------------------------	--------------------------

Dari hasil analisis rasio pemampatan tebal geram di atas dapat diambil kesimpulan bahwa penurunan rasio pemampatan tebal geram diikuti dengan penurunan tebal geram yang dihasilkan (setelah terpotong).

Rasio pemampatan tebal geram yang diinginkan adalah sekecil mungkin (mendekati satu), karena akan menaikkan sudut geser. Kenaikan sudut geser akan menurunkan gaya potong, sehingga temperatur dan daya pemotongan akan menurun. Rasio pemampatan tebal geram yang rendah akan menghasilkan geram yang tipis dan terputus-putus, sehingga mempermudah proses pembuangan geram dan tidak mengganggu proses pemotongan.

4. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada model matematis proses bubut dengan CPBT dan CPTT, didapatkan bahwa nilai koefisien pangkat variabel proses dari proses bubut dengan CPBT lebih rendah daripada CPTT. Penurunan pangkat tersebut pada model gaya potong untuk f dan d adalah sebesar 1.5% dan 2.5%, pada model gaya makan untuk f dan d adalah sebesar 32.5% dan 8.4%, serta pada model kekasaran permukaan untuk V dan f adalah sebesar 54.5% dan 5.7%.
2. Keausan tepi pahat yang terjadi pada proses bubut dengan CPBT mempunyai kecenderungan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan CPTT.
3. Nilai koefisien gesek pada pembubutan dengan menggunakan CPBT lebih rendah dibandingkan CPTT.
4. Pembubutan dengan menggunakan CPBT menghasilkan geram yang tipis dan terputus-putus, sedangkan dengan menggunakan CPTT menghasilkan geram yang tebal dan kontinyu.
5. Rasio pemampatan tebal geram yang terjadi pada proses bubut dengan menggunakan CPBT lebih rendah daripada CPTT.

Pembubutan dengan menggunakan CPBT lebih efektif daripada pembubutan dengan menggunakan CPTT. Hal ini, dikarenakan penggunaan CPBT dapat lebih menurunkan gaya makan dan gaya potong serta kekasaran permukaan dibandingkan dengan penggunaan CPTT.

Untuk selanjutnya, penelitian ini dapat dikembangkan dengan mencari nilai-nilai variabel proses pada kondisi optimum dari variabel respon pada proses pembubutan dengan menggunakan CPBT.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.K., Nandy, M.C. Gowrishankar, and S. Paul, 2009. "Some Studies on High-Pressure Cooling in

- Turning Of Ti-6Al-4V.” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*.49, pp 182-198.
- [2] N. R. Dhar, dan M. Kamruzzaman. 2008. “The Effect of Applying High-Pressure Coolant (HPC) Jet in Machining of 42CrMO4 Steel by Uncoated Carbide Inserts.” *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. ME39, No. 2. Bangladesh.
- [3] M. Mazukiewicz, Z. Kubala, and J. Chow, 1989., “Metal Machining with High Pressure Water-Jet Cooling Assistance.” *Journal of Engineering for Industry*, 111, pp.7–12.
- [4] N. R. Dhar, dan M. Kamruzzaman. 2007.”An Experimental Study of Effect of High Pressure Coolant on Tool Wear, Tool life and Roughness in Turning 16MnCr5 Steel by SNMG Insert. ”*International Conference on Mechanical Engineering*. Dhaka, Bangladesh.
- [5] N. R. Dhar, dan M. Kamruzzaman. 2008. “The Effect of Applying High-Pressure Coolant (HPC) Jet in Machining of 42CrMO4 Steel by Uncoated Carbide Inserts.” *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. ME39, No. 2. Bangladesh.
- [6] J. Datsko, 1966. *Material Properties and Manufacturing Processes*. New York: Wiley.
- [7] T. Rochim, 1993. *Teory dan Teknologi Proses Pemesinan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.