

Investigasi Gaya Potong, Kekasaran Permukaan dan Keausan Pahat Pada Proses Bubut Baja Menggunakan Teknik Pelumasan *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) Berbasis Minyak Nabati

Mazwan^{a,*}, Satrio Darma Utama^a, Ridhani Anita Fajardini^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Politeknik Jambi

Jl. Lingkar Baral II Lrg Veteran. Bagan Pete, Jambi 36129, Indonesia

^bInstitut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia

*E-mail: Mazwan@politeknikjambi.ac.id

Abstract

The machining process must be carried out correctly so that the resulting components can meet the specified specifications. The performance of the turning process can be evaluated based on machinability properties such as cutting force, surface roughness, and tool wear, the values of which are expected to be as minimum as possible. The cutting force, surface roughness, and tool wear produced in the turning process are influenced by process parameters, such as cutting speed, depth of cut, feed, and cutting conditions. This research uses a lubrication technique based on minimum quantity lubrication (MQL). This research aims to analyze the influence of turning process parameters on cutting force, surface roughness, and tool wear in the AISI 4140 steel turning process. This study employs an L_{18} orthogonal array based on the Taguchi experimental design. The study's findings indicate that feed motions are the primary factor influencing all responses, followed by depth of cut. The surface roughness value is unaffected by changes in cutting speed, and differences in cutting fluids do not affect tool wear.

Keywords: machinability; minimum quantity lubrication; machining process

Abstrak

Proses pemesinan harus dilakukan dengan tepat agar komponen yang dihasilkan dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan. Kinerja proses bubut dapat dievaluasi berdasarkan sifat mampu mesin (*machinability*) seperti gaya potong, kekasaran permukaan dan keausan pahat, yang nilainya diharapkan seminimum mungkin. Gaya potong, kekasaran permukaan dan keausan pahat yang dihasilkan pada proses bubut dipengaruhi oleh parameter proses, seperti kecepatan potong, kedalaman potong, gerak makan dan kondisi pemotongan. Penelitian ini menggunakan teknik pelumasan berbasis *minimum quantity lubrication* (MQL). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa pengaruh parameter-parameter proses bubut terhadap gaya potong, kekasaran permukaan dan keausan pahat pada proses bubut baja AISI 4140. Metode penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen Taguchi *matriks ortogonal array* L_{18} . Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kedalaman potong merupakan faktor utama yang mempengaruhi semua respon diikuti gerak makan. Perubahan kecepatan potong tidak mempengaruhi nilai kekasaran permukaan dan perbedaan cairan pemotongan tidak berpengaruh terhadap keausan pahat.

Kata kunci: sifat mampu mesin; *minimum quantity lubrication*; proses pemesinan

1. Pendahuluan

Proses bubut adalah salah satu teknik pemesinan yang paling umum digunakan dalam industri manufaktur. Proses ini dilakukan dengan cara memutar benda kerja dan memotong material pahat bubut. Baja AISI 4140 adalah baja paduan rendah yang mengandung kromium, molibdenum, dan mangan sebagai bahan penguat. Baja jenis ini digunakan di berbagai industri, seperti konstruksi, minyak dan gas, karena kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan ausnya yang tinggi. Baja ini juga sering digunakan dalam industri dirgantara dan otomotif. Kekerasan baja AISI 4140 berkisar antara 50-52 HRC setelah mengalami perlakuan panas. Proses bubut (*turning*) untuk material yang memiliki kekerasan diatas 45 HRC disebut sebagai proses *hard turning* [1]. Oleh karena itu, proses bubut untuk baja AISI 4140 yang dikeraskan dapat juga disebut sebagai proses *hard turning*.

Kekasaran permukaan memainkan peran penting pada kualitas produk yang dihasilkan. Kualitas permukaan yang baik diperlukan untuk menentukan efektivitas biaya dan fungsionalitas dari produk yang dihasilkan. Faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan pada proses bubut antara lain jenis material pahat bubut, kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong dan sudut potong [2; 1]. Penelitian tentang pengaruh parameter proses terhadap kekasaran

telah banyak dilakukan. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Makhesana dkk. (2021) pada proses bubut baja paduan AISI 4140 menunjukkan bahwa gerak makan dan radius pojok pahat memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kekasaran permukaan [3].

Selain kekasaran permukaan, pengukuran gaya potong juga penting untuk dilakukan karena gaya potong memiliki pengaruh terhadap daya yang dibutuhkan oleh mesin bubut selama proses pemesinan [4; 5]. Semakin besar gaya potong yang terjadi, maka semakin besar pula daya pemotongan yang dibutuhkan dan energi yang dikonsumsi. Roy dan Ghosh (2014) telah melakukan penelitian dan investigasi terhadap gaya yang terjadi selama pemotongan baja paduan AISI 4140 [6]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa gerak makan merupakan faktor yang paling mempengaruhi gaya potong diikuti dengan kedalaman potong. Selain gaya potong dan kekasaran permukaan, keausan pahat juga merupakan salah satu faktor penting untuk di perhatikan. Untuk meningkatkan efisiensi proses bubut dan mengurangi biaya produksi, penting untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi keausan pada pahat. Penelitian yang dilakukan oleh Zhao dkk. (2017) menyatakan bahwa sudut potong dan kecepatan potong memberi pengaruh signifikan terhadap keausan pahat [7]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Debnath dkk. (2016) juga menyatakan bahwa kecepatan potong merupakan pengaruh utama pada nilai keausan pahat diikuti dengan kedalaman potong [8].

Selain parameter proses, penggunaan cairan pemotongan juga memberi pengaruh penting dalam meningkatkan kualitas dari produk yang dihasilkan. Namun, penggunaan cairan pemotongan memiliki beberapa kelemahan terkait dengan masalah lingkungan, biaya, dan kesehatan dari operator mesin. Untuk mengurangi dampak ekonomi dan lingkungan, *minimum quantity lubricant* (MQL) merupakan alternatif dari penggunaan *flood cooling*. MQL hanya menggunakan sejumlah kecil cairan pemotongan yang disemprotkan ke zona pemotongan, biasanya dalam jumlah 50 ml/jam atau kurang. Penggunaan teknik MQL dapat membantu mengurangi gaya pemotongan dan meningkatkan umur pahat dibandingkan dengan teknik *flood cooling* [9]. Panday dkk. (2021) pada penelitiannya mengevaluasi performa MQL berbasis minyak nabati dan minyak hidrolik pada proses pembubutan aluminium 6061 [10]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa MQL dapat digunakan dengan baik menggunakan minyak nabati maupun minyak hidrolik. Minyak nabati dapat menjadi substitusi yang baik untuk *flood cooling*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa pengaruh dari parameter-parameter proses pemesinan terhadap respon gaya potong, kekasaran permukaan dan keausan pahat pada proses bubut baja AISI 4140 dengan Teknik pendinginan MQL.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Material

Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja paduan AISI 4140 yang dikeraskan dan memiliki diameter sebesar 50 mm dan panjang pemotongan sebesar 50 mm. Pahat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pahat sisipan karbida yang dilapisi CVD TiCN-Al₂O₃ dengan tipe TNMG160412-UR dengan radius pojok (R) yaitu, 1,2 mm. Pemegang pahat yang digunakan adalah jenis ETG NR1616H33, dengan panjang 100 mm. Mesin bubut yang digunakan pada penelitian ini adalah Merk Ann Yang Machinery CO. LTD, buatan Taiwan dengan model DY-410X000G. Proses pemotongan menggunakan MQL. Cairan pemotongan disuplai dengan kecepatan aliran 50 mL/jam pada tekanan 5 bar dan sudut *nozzle* 45°. Material benda kerja dan pahat bubut yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1. Tabel 1 menunjukkan Sifat Kimia dan Fisik Minyak Nabati yang digunakan.



Gambar 1. (a) Material Benda Kerja AISI 4140, (b) Pahat Sisipan Karbida

Tabel 1. Sifat Kimia dan Fisik Minyak Nabati [11]

Jenis Minyak Nabati	Density (g/ml)	Viscosity Index	Kinematic Viscosity @40 °C (mm ² /sec)	Iodine Value	Pour Point °C	Flash Point °C
Minyak Bunga Matahari	0,890	205	38,2	113–148	–15	272

Minyak Sawit	0,910	189	41,9	50–55	12	304
--------------	-------	-----	------	-------	----	-----

2.2 Pengukuran Parameter-parameter Respon

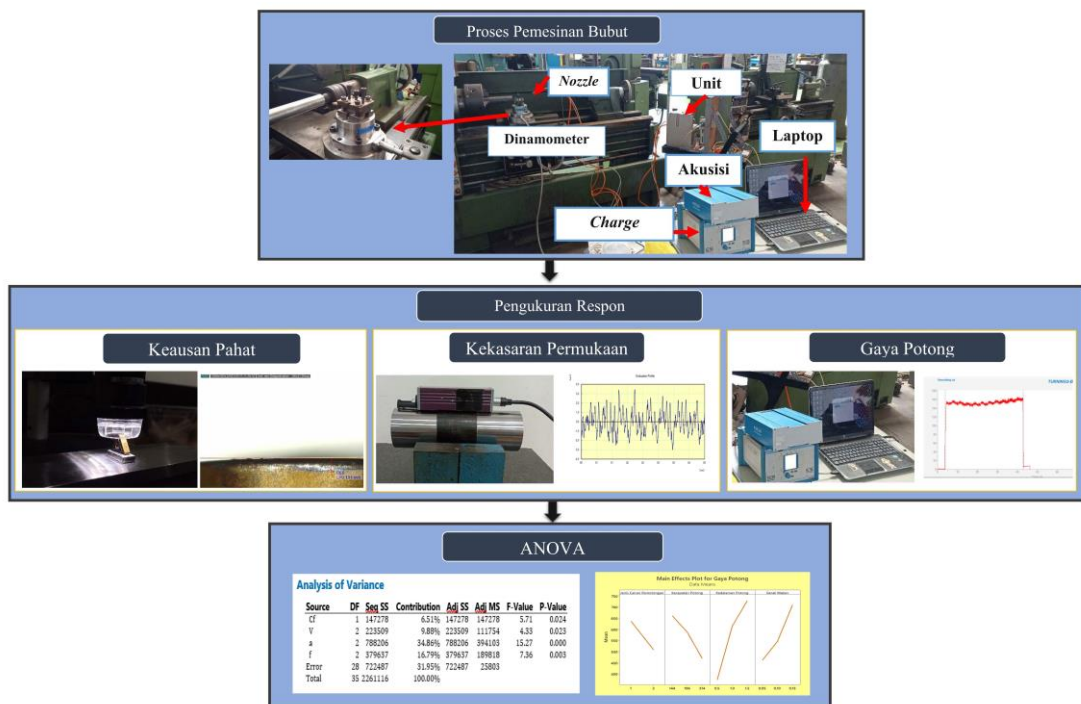
Respon yang diteliti adalah respon gaya potong, kekasaran permukaan dan keausan pahat. Kualitas permukaan suatu produk biasanya diukur dengan kekasaran permukaan (R_a). Kekasaran permukaan merupakan proporsi dari sifat mekanis suatu komponen dan merupakan faktor yang sangat mempengaruhi biaya perakitan. Kekasaran permukaan menggambarkan geometri dan tekstur permukaan komponen suatu produk [12]. Kekasaran rata-rata (R_a) didefinisikan sebagai nilai aritmatika profil dari garis tengah sepanjang sampel [13]. Gaya potong diukur menggunakan KISTLER *dynamometer type 9272*, sedangkan kekasaran permukaan diukur menggunakan Mitutoyo SJ-310 dan keausan pahat diukur menggunakan Dino-Lite *microscope digital*.

2.3 Rancangan Eksperimen

Rancangan eksperimen pada penelitian ini berdasarkan metode Taguchi yaitu menggunakan matriks ortogonal L_{18} dengan total 18 percobaan. Eksperimen dilakukan secara acak dengan replikasi dua kali. Parameter-parameter proses yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2. Tabel 3 menunjukkan matriks ortogonal L_{18} dengan 18 kombinasi percobaan dan hasil pengukuran respon. Gambar 2 menunjukkan skema penelitian.

Tabel 2. Parameter-parameter Proses

Parameter Proses	Simbol	Unit	Level		
			1	2	3
Jenis cairan pemotongan	CF	-	Minyak bunga matahari	Minyak sawit	-
Kecepatan potong	V	mm/menit	144	196	314
Kedalaman potong	a	mm	0,5	1	1,5
Gerak makan	f	mm/rev	0,05	0,1	0,15



Gambar 2. Skema Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran F_c , R_a dan V_b pada proses bubut baja AISI 4140 ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rancangan Eksperimen dan Hasil Percobaan

No.	Parameter Pemesinan				Parameter Respon					
	Cf	V	a	f	F_c (N)		R_a (μm)		V_b (mm)	
					R1	R2	R1	R2	R1	R2
1	1	1	1	1	182	184,6	1,248	1,203	0,094	0,085
2	1	1	2	2	223,3	223,4	3,294	3,418	0,122	0,123
3	1	1	3	3	280,3	284,5	3,646	3,505	0,219	0,22
4	1	2	1	1	89,4	89,59	1,695	1,505	0,11	0,103
5	1	2	2	2	202,11	210,3	1,038	1,074	0,141	0,143
6	1	2	3	3	256,9	252,2	3,123	3,054	0,746	0,751
7	1	3	1	2	83,07	83,82	0,791	0,707	0,432	0,433
8	1	3	2	3	221,1	222,7	2,364	2,319	0,692	0,698
9	1	3	3	1	232,5	238,6	1,540	1,675	0,68	0,661
10	2	1	1	3	125,3	125	0,629	0,669	0,385	0,388
11	2	1	2	1	105,9	101,9	0,693	0,629	0,161	0,151
12	2	1	3	2	270,6	271,9	1,770	1,704	0,476	0,474
13	2	2	1	2	120,2	120,7	1,160	1,142	0,123	0,125
14	2	2	2	3	189,8	189,3	1,025	1,030	0,233	0,239
15	2	2	3	1	239,03	211,4	1,146	1,139	0,378	0,377
16	2	3	1	3	97,09	97,91	1,009	1,075	0,288	0,282
17	2	3	2	1	109,9	109,2	1,397	1,359	0,223	0,236
18	2	3	3	2	236,4	238,5	1,230	1,244	0,746	0,732

3.1 Analysis of Variance

Data hasil percobaan dilakukan uji ANOVA untuk mengetahui parameter proses yang memberi pengaruh signifikan terhadap setiap respon. Uji ANOVA dilakukan menggunakan aplikasi Minitab20. Hasil uji Anova ditunjukkan pada Tabel 4.

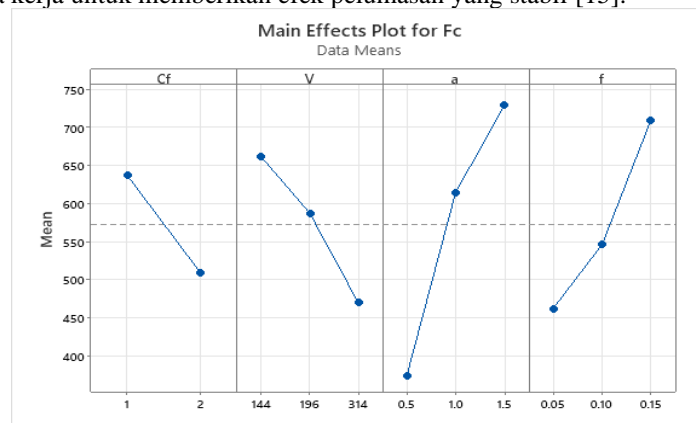
Tabel 4. Hasil Uji ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Gaya Potong					
Jenis cairan pemotongan	1	147278	147278	5.71	0.024
V	2	223509	111754	4.33	0.023
a	2	788206	394103	15.27	0.000
f	2	379637	189818	7.36	0.003
Error	28	722487	25803		
Total	35	2261116			
Kekasaran Permukaan					
Jenis cairan pemotongan	1	8.1695	8.16955	24.10	0.000
V	2	1.4651	0.73253	2.16	0.134
a	2	5.9811	2.99056	8.82	0.001
f	2	2.8452	1.42258	4.20	0.025
Error	28	9.4906	0.33895		
Total	35	27.9515			
Keausan Pahat					
Jenis cairan pemotongan	1	0.00528	0.005280	0.28	0.599
V	2	0.48711	0.243556	13.01	0.000
a	2	0.66728	0.333638	17.83	0.000
f	2	0.14852	0.074260	3.97	0.030
Error	28	0.52399	0.018714		
Total	35	1.83218			

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat untuk respon gaya potong semua parameter berpengaruh secara signifikan. Untuk respon kekasaran permukaan jenis cairan pemotongan, kedalaman potong dan gerak makan berpengaruh secara signifikan sedangkan parameter kecepatan potong tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan. Penelitian yang dilakukan oleh Javidikia dkk. (2020) juga menyatakan kecepatan potong tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan pada proses bubut menggunakan teknik MQL [14]. Untuk respon keausan pahat kecepatan potong, kedalaman potong dan gerak makan berpengaruh secara signifikan, sedangkan parameter jenis cairan pemotongan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan.

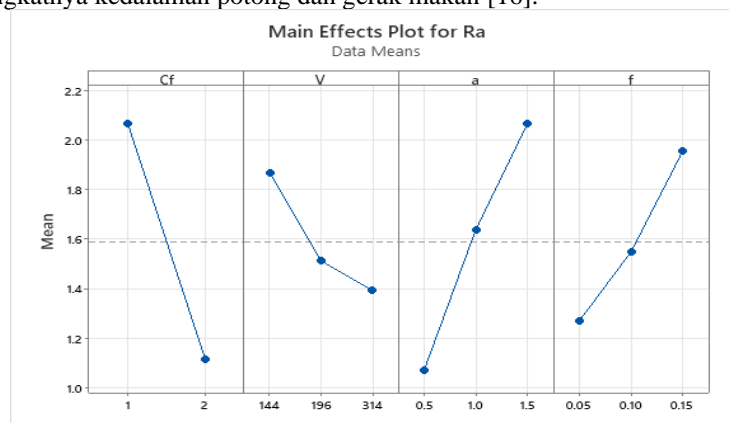
3.2 Pengaruh Parameter-Parameter Proses Terhadap Respon

Pengaruh parameter-parameter proses terhadap gaya potong ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat bahwa penggunaan jenis cairan pemotongan minyak sawit menghasilkan gaya potong yang lebih rendah dibandingkan minyak bunga matahari. Hal ini disebabkan oleh perbedaan viskositas antara minyak sawit dan minyak bunga matahari. Minyak sawit memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan minyak bunga matahari. Viskositas ini berperan penting dalam membentuk lapisan minyak yang lebih kental dan kuat. Selain itu, minyak sawit dapat tetap berada dipermukaan benda kerja untuk memberikan efek pelumasan yang stabil [15].



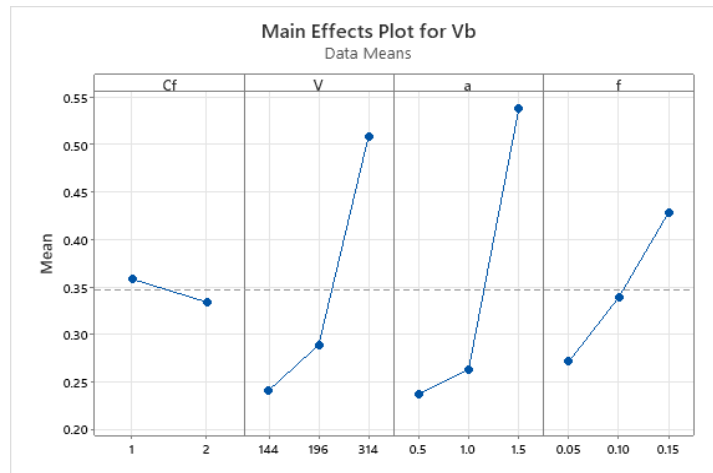
Gambar 3. Main Effects Plot F_c

Gaya potong menurun dengan meningkatnya kecepatan potong. Hal ini disebabkan peningkatan kecepatan potong dapat meningkatkan suhu pemotongan yang dapat melunakkan material pada area pemotongan [7]. Gaya potong meningkat dengan meningkatnya kedalaman potong dan gerak makan [16].



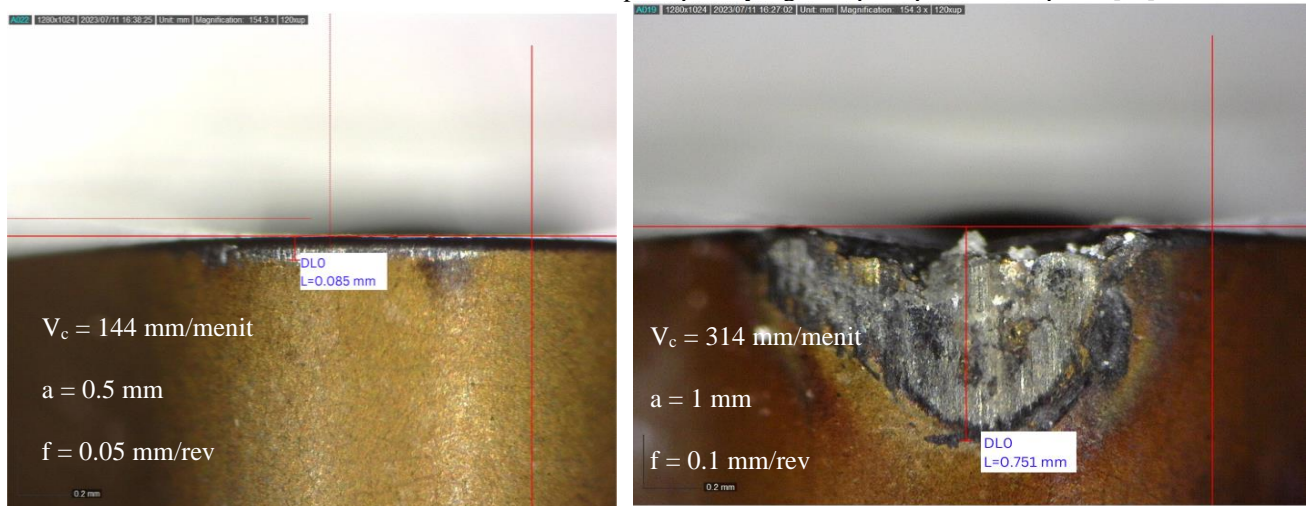
Gambar 4. Main Effects Plot R_a

Pengaruh parameter-parameter proses terhadap kekasaran permukaan dan keausan pahat ditunjukkan pada Gambar 4. Penggunaan minyak sawit sebagai cairan pemotongan menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang lebih rendah dibandingkan minyak bunga matahari. Minyak sawit memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan minyak bunga matahari. Viskositas ini berperan penting dalam membentuk lapisan minyak yang lebih kental dan kuat sehingga mungurangi gesekan antara pahat dan benda kerja [17]. Peningkatan gerak makan juga meningkatkan kekasaran permukaan [18]. Hal ini sesuai dengan persamaan teoritis kekasaran permukaan Kalpakjian dan Steven (2013) yang menyatakan parameter utama yang mempengaruhi kekasaran permukaan adalah gerak makan [13].



Gambar 5. Main Effects Plot V_b

Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa keausan pahat meningkat dengan meningkatnya kecepatan potong. Hal ini disebabkan ketika kecepatan potong meningkat, alat potong terkena tekanan dan panas yang lebih tinggi, yang dapat menyebabkan gesekan dan abrasi yang lebih besar pada pahat [19]. Penggunaan minyak sawit sebagai cairan pemotongan mampu menurunkan keausan pahat. Hal ini disebabkan minyak sawit memiliki viskositas yang lebih tinggi dari minyak bunga matahari yang mampu melumasi area pemotongan dengan baik, sehingga mengurangi gesekan antara pahat dan benda kerja [17]. Keausan pahat juga meningkat dengan meningkatnya kedalaman potong dan gerak makan. Saat kedalaman potong dan gerak makan meningkat, pahat bubuk melakukan kontak yang lebih luas dengan benda kerja sehingga meningkatkan gesekan dan tekanan pada pahat yang mempercepat keausan pahat [20].



Gambar 6. Keausan Pahat Berdasarkan Kondisi Pemotongan

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat pada kondisi pemotongan dengan menggunakan parameter level 1 keausan pahat yang terjadi sangat kecil. Sedangkan keausan pahat yang terjadi sangat besar. Keausan yang terjadi dengan menggunakan kecepatan potong dan kedalaman potong yang tinggi berupa kerusakan pada pahat bukan lagi gesekan. Hal ini seperti yang dijelaskan sebelumnya dengan kecepatan potong yang tinggi maka akan meningkatkan gesekan dan abrasi pada material pahat yang berkontak langsung dengan benda kerja. Sedangkan dengan kedalaman potong yang lebih besar maka luas bidang pahat yang berkontak dengan benda kerja akan semakin besar, sehingga akan memperluas keausan yang terjadi.

Berdasarkan grafik *main effect plot* untuk setiap respon, dapat dilihat bahwa penggunaan minyak sawit sebagai cairan pemotongan dapat meminimalkan semua respon. Hal ini disebabkan karena minyak sawit memiliki nilai *kinematic viscosity* yang lebih tinggi dibanding minyak bunga matahari seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Semakin besar nilai *kinematic viscosity* maka nilai viskositasnya juga akan semakin besar, dan semakin besar gesekan antara molekul internal yang terjadi. Saat minyak bunga matahari bergerak pada saat proses pemotongan, energi yang dikonsumsi akan lebih besar. Sehingga dapat menurunkan gaya yang diterima pahat bubuk dan juga memperpanjang usia pahat dengan kurangnya gesekan yang terjadi antara pahat dan benda kerja.

Penggunaan MQL berbasis minyak nabati terbukti mampu meminimalkan nilai semua respon. Hal ini dikarenakan MQL menyempatkan pelumas dalam bentuk aerosol ke titik-titik pemotongan yang sangat spesifik melalui *nozzle*.

Sehingga cairan pemotongan benar-benar tersalurkan dan masuk pada celah-celah zona pemotongan. Gambar 7 menunjukkan penempatan *nozzle* pada saat proses pembubutan yang dilakukan.



Gambar 7. Penempatan *Nozzle* MQL

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan proses optimasi yang telah dilakukan pada proses bubut baja AISI 4140 sebagai berikut:

- Gaya makan dan gaya potong menurun saat kecepatan potong meningkat, sedangkan kenaikan kedalaman potong dan gerak makan meningkatkan gaya makan dan gaya potong. Penggunaan minyak sawit sebagai cairan pemotongan dapat menyebabkan gaya makan dan gaya potong yang lebih rendah dari pada minyak bunga matahari.
- Semakin besar gerak makan maka semakin besar juga nilai kekasaran permukaan. Penggunaan minyak sawit sebagai cairan pemotongan dapat menyebabkan nilai kekasaran permukaan yang lebih rendah dibandingkan minyak bunga matahari. Keausan pahat meningkat dengan meningkatnya kecepatan potong, kedalaman potong, dan gerak makan.
- Penggunaan teknik pelumasan MQL berbasis nabati terbukti mampu meminimalkan nilai respon.
- Penggunaan minyak sawit sebagai cairan pemotongan mampu menghasilkan respon gaya potong, kekasaran permukaan dan keausan pahat minimum.

Daftar Pustaka

- [1] V. D. Patel dan A. H. Gandhi, "Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 138, hal. 34–38, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.01.077.
- [2] Mazwan, M. K. Effendi, B. O. P. Soepangkat, S. D. Utama, dan R. A. Fajardini, "Multi-objective Optimization of Turning Process Steel SKD 11 Using BPNN-Artificial Bee Colony (ABC) Method," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International conference*, Atlantis Press International BV, 2022, hal. 520–529. doi: 10.2991/978-94-6463-134-0.
- [3] M. A. Makhesana, J. A. Baravaliya, R. J. Parmar, B. K. Mawandiya, dan K. M. Patel, "Machinability improvement and sustainability assessment during machining of AISI 4140 using vegetable oil-based MQL," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03256-2>
- [4] S. D. Utama, A. Wahjudi, M. K. Effendi, B. O. P. Soepangkat, dan R. A. Fajardini, "Multi-objective Optimization Using BPNN-PSO in the Face Milling Process of AISI 1045," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International conference*, Atlantis Press International BV, 2022, hal. 541–549. doi: 10.2991/978-94-6463-134-0.
- [5] F. R. Anita, M. K. Effendi, B. O. P. Soepangkat, dan S. D. Utama, "Multi-objective Optimization of AISI 1045 on Drilling Process Based on Hybrid BPNN and Firefly Algorithm," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International conference*, Atlantis Press International BV, 2022, hal. 530–540. doi: 10.2991/978-94-6463-134-0.
- [6] S. Roy dan A. Ghosh, "High-speed turning of AISI 4140 steel by multi-layered TiN top-coated insert with minimum quantity lubrication technology and assessment of near tool-tip temperature using infrared thermography," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 2014, doi: 10.1177/0954405413514570.
- [7] T. Zhao, J. M. Zhou, V. Bushlya, dan J. E. Ståhl, "Effect of cutting edge radius on surface roughness and tool wear in hard turning of AISI 52100 steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 9–12, hal. 3611–3618, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0065-z.
- [8] S. Debnath, M. M. Reddy, dan Q. S. Yi, "Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface

- roughness and tool wear in turning process using Taguchi method,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 78, hal. 111–119, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2015.09.011.
- [9] A. H. Elsheikh, M. A. Elaziz, S. R. Das, T. Muthuramalingam, dan S. Lu, “A new optimized predictive model based on political optimizer for eco-friendly MQL-turning of AISI 4340 alloy with nano-lubricants,” *J. Manuf. Process.*, vol. 67, no. December 2020, hal. 562–578, 2021, doi: 10.1016/j.jmappro.2021.05.014.
- [10] A. Panday, G. S. Goindi, dan N. Singh, “Evaluation of effect of oil viscosity in MQL turning of aluminium 6061,” *Mater. Today Proc.*, vol. 48, hal. 1740–1747, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.042.
- [11] V. Deshpande dan P. N. Jyothi, “A Review on Sustainable Eco-friendly Cutting Fluids,” *J. Sustain. Environ. Manag. (JOSEM)*, vol. 1, no. 2, hal. 306–320, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.nepjol.info/index.php/josem>
- [12] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 5 Edition. Wiley Global Education, 2012.
- [13] S. Kalpakjian dan R. S. Steven, *Manufacturing Engineering and Technology*, 7 Edition. Pearson Education South Asia, 2013.
- [14] M. Javidikia, M. Sadeghifar, V. Songmene, dan M. Jahazi, “Analysis and optimization of surface roughness in turning of AA6061-T6 under various environments and parameters,” *Procedia CIRP*, vol. 101, no. March, hal. 17–20, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2021.02.004.
- [15] Q. Yin *et al.*, “Effects of Physicochemical Properties of Different Base Oils on Friction Coefficient and Surface Roughness in MQL Milling AISI 1045,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 8, no. 6, hal. 1629–1647, 2021, doi: 10.1007/s40684-021-00318-7.
- [16] M. Hanief, M. F. Wani, dan M. S. Charoo, “Engineering Science and Technology , an International Journal Modeling and prediction of cutting forces during the turning of red brass (C23000) using ANN and regression analysis,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 3, hal. 1220–1226, 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2016.10.019.
- [17] D. Majak, E. U. Olugu, dan S. A. Lawal, “Analysis of the effect of sustainable lubricants in the turning of AISI 304 stainless steel,” *Procedia Manuf.*, vol. 43, hal. 495–502, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.183.
- [18] B. Arsene, C. Gheorghe, F. A. Sarbu, M. Barbu, L.-I. Cioca, dan G. Calefariu, “MQL-Assisted Hard Turning of AISI D2 Steel with Corn Oil: Analysis of Surface Roughness, Tool Wear, and Manufacturing Costs,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2058, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/met11122058>
- [19] A. Aslan, “Optimization and analysis of process parameters for flank wear , cutting forces and vibration in turning of AISI 5140 : A comprehensive study,” *Measurement*, vol. 163, hal. 107959, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107959.
- [20] D. S. Chaitanya, K. P. Rao, dan A. Mahamani, “Investigation of cutting force , surface roughness and flank wear in turning of In-situ Al6061-TiC metal matrix composite,” *MSPRO*, vol. 6, no. Icmipc, hal. 1040–1050, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.175.