

## **STUDI KUALITAS PERMUKAAN PEMBUBUTAN KERING PADA BAJA AISI 4340 ( $\pm 35$ HRC) MENGGUNAKAN PAHAT PVD DAN CVD BERLAPIS**

Wira Setiawan<sup>1</sup>, Junaidi<sup>2</sup>, Yulfitra<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Komputer, Universitas Harapan Medan

Email : [marganapanggabean4@gmail.com](mailto:marganapanggabean4@gmail.com)

### **ABSTRACT**

The machining operation should be targeted at dry or near dry machines to avoid environmental problems associated with the use of cutting fluids. To overcome the above situation, 80% of all machining operations are carried out with superior cutting tools such as CBN and ceramics. However, the price for the lathe chisel is still quite expensive. Cheaper carbide cutting tools are seen as a possible replacement for CBN and Ceramic insert cutting tools and are mostly processed by chemical vapor deposition (CVD) and physical vapor deposition (PVD) techniques. Therefore, a study was conducted on the performance of both PVD tools and CVD coated tools which is very important to recommend the appropriate tool for machining AISI 4340 steel. The workpiece used in this research is AISI 4340 steel ( $\pm 35$  HRC) and the tool used is plated PVD and CVD chisels. The tool used in this study to measure surface roughness is the Stylus Profilometer. The turning process is carried out with 8 cutting conditions using a CNC lathe. In this dry turning research, the most significant variables on surface roughness, surface roughness mathematical equations and also optimal cutting conditions were found, namely cutting speed ( $v$ ) = 180 m/min, feed motion ( $f$ ) = 0.2 mm/rev and depth cut ( $a$ ) = 0.2mm and surface roughness ( $R_a$ ) = 2.178 micron.

***Kata Kunci:** Surface roughness, Dry turning, Turning process, AISI 4340 steel*

### **1. PENDAHULUAN**

Pada saat yang sama, operasi pemesinan harus ditargetkan mesin kering atau hampir kering untuk menghindari lingkungan masalah yang terkait dengan penggunaan cairan pemotongan. Untuk mengatasi situasi di atas, 80% dari semua operasi pemesinan dilakukan dengan pahat potong unggulan seperti CBN dan keramik. Namun harga untuk pahat bubut tersebut masih terbilang mahal. Pahat potong karbida dengan harga lebih murah dipandang sebagai kemungkinan pengganti dari pahat potong sisipan CBN dan Keramik dan sebagian besar diproses dengan teknik deposisi uap kimia (CVD) dan deposisi uap fisik (PVD).

Untuk memproduksi suatu komponen yang memiliki kualitas yang tinggi, kualitas permukaan adalah persyaratan yang paling penting untuk pengguna. Menurut Ezugwu dan Okeke menyimpulkan dalam penelitian mereka bahwa pemotongan dan kecepatan memiliki pengaruh yang lebih signifikan daripada kedalaman pemotongan pada umur pahat selama pemesinan baja AISI 4340 yang menggunakan pahat PVD berlapis dan dalam studi terpisah juga dilaporkan bahwa parameter pakan lebih dominan daripada kecepatan potong yang divariasikan [1]. Pemahaman dalam proses pembuangan geram di pemotongan logam adalah penting untuk pemilihan material dan desain pahat, dan juga untuk memastikan akurasi dimensi yang konsisten dan integritas permukaan produk jadi. Gesekan dalam pemotongan logam mempengaruhi daya pemotongan (*cutting power*), kualitas pemesinan, umur pahat, dan ongkos produksi.

Langkah yang paling penting dari kualitas permukaan selama proses pemesinan adalah kekasaran permukaan rata-rata ( $R_a$ ). Ketika aus pahat mencapai nilai tertentu, meningkatnya gaya pemotongan, getaran, dan temperatur pemotongan, hal itu

menyebabkan kesalahan dimensi lebih besar dari toleransi dan integritas permukaan menjadi memburuk. Keausan pahat ini adalah salah satu aspek terpenting dalam pembubutan keras. Biasanya abrasi, adhesi dan difusi dianggap mekanisme keausan pahat utama dalam pemesinan keras. Namun, efek individual masing – masing mekanisme tergantung pada geometri pahat, tingkat atau kelas pahat, parameter pemotongan, dan kekerasan benda kerja. Keausan pahat meningkat secara linear terhadap peningkatan parameter pemotongan. Ini menunjukkan bahwa peningkatan aus pahat pada kondisi pemotongan yang lebih tinggi mungkin karena abrasi terutama pada ujung pahat (*rake*) dan tepi pahat (*flank*) pada saat pemesinan.

Dari tinjauan literatur yang berkaitan dengan pemesinan baja AISI 4340, terbukti bahwa pemodelan dan optimalisasi karakteristik pemesinan yang berbeda seperti flank wear, kekasaran permukaan dan gaya potong menjadi fokus utama. Hampir tidak ada informasi terkait tentang karakteristik chip yang berbeda serta efek lapisan pahat pada keausan pahat saat mekanisme pemesinan baja AISI 4340. Apalagi pahatnya dilapisi CVD menunjukkan hasil yang baik dalam pengerjaan berbagai grade lain dari super alloy berbasis baja AISI 4340. Oleh karena itu, dilakukan studi banding tentang kinerja baik CVD dan perkakas lapis PVD yg sangat penting untuk merekomendasikan pahat yang sesuai untuk pemesinan baja AISI 4340. Karena peraturan lingkungan yang lebih ketat, maka fokus penelitian terbaru bergeser ke arah pemotongan mesin kering atau hampir kering menggunakan lanjutan pahat berlapis.

Pemilihan pemesinan kering dalam penelitian ini dilakukan dengan upaya lingkungan untuk meminimalisir atau menghilangkan penggunaan limbah cairan pemotongan. Pada penelitian ini menggunakan pahat berlapis yaitu pahat CVD dan pahat PVD berlapis yang digunakan secara bergantian pada proses pembubutan kering baja AISI 4340 dengan kecepatan potong yang berbeda.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertempat di laboratorium SMKN 2 Medan. Pada penelitian ini dilakukan proses pembubutan pada tanggal 9 April 2022 dengan 8 kondisi pemotongan. Bahan benda kerja pada penelitian ini adalah baja AISI 4340 yang telah dikeraskan hingga mencapai kekerasan (35) HRC. Adapun komposisi kimia dan sifat material bahan AISI 4340 adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2. Benda kerja berbentuk silinder pejal dengan diameter 80 mm dan panjang 300 mm. Sebelum pengujian pahat dilakukan untuk membubut benda kerja, terlebih dahulu dilakukan permesinan awal terhadap benda kerja terlebih dahulu dengan tujuan memastikan keadaan benda akan terpasang sekolinier (*centering*) pada “*chuck and tail stock*” dan mengupas bagian terluar benda kerja yang teroksidasi maupun kerak yang terbentuk pada saat benda kerja dikeraskan (*heat treatment*).

Pada desain percobaan ada tiga final yang dilakukan, pertama menemukan 5 (lima) kondisi pemotongan potensial sebagai rekomendasi ISO 3685 di bawah kriteria daya pemotongan yang rendah lebih diharapkan dan permukaan akhir dari putaran halus ( $R_a < 3,2$  mikron). Ketika eksperimen dijalankan dalam pembubutan, kondisi pemotongan ( $v$ ,  $f$ ,  $a$ ) menjadi variabel independen, sedangkan keausan sisi (VB) dan kekasaran permukaan (dalam parameter  $R_a$ ) akan menjadi *variabel respons*.

Pengukuran keausan sisi dilakukan menggunakan mikroskop *micro capture*. Mikroskop ini dipasang kekomputer pribadi dan dilengkapi dengan perangkat lunak. Pengukuran keausan sisi dilakukan setelah panjang pembubutan 200 mm untuk setiap kondisi pemotongan yang diuji. Untuk kekasaran permukaan, *stylus profilometer*

mitutoyo SJ-210 digunakan sesuai standard ISO 1997 dimana kecepatan gerak stylus 0,25 m/s panjang *cut-off* tetap 0,8 mm dan panjang evaluasi 4 mm.

Menemukan kondisi pemotongan optimal dalam kisaran kondisi pemotongan potensial. Untuk itu, metode Taguchi diadopsi untuk desain percobaan. Metode ini diadopsi karena memberikan pendekatan yang sederhana, efisien, sistematis, dan telah banyak digunakan untuk menentukan kondisi optimal dalam aplikasi teknik.

Pekerjaan eksperimental dilakukan hanya untuk kondisi pemotongan optimal dan uji pembubutan kering dilakukan hingga lebar keausan sisi VB~0,25 mm (*Gradual ware*) (panjang pemotongan 200 mm). Durasi pemotongan atau masa pakai alat hingga VB~0,25 mm tercapai dicatat. Kekasaran permukaan dalam parameter Ra diukur pada setiap kondisi pembubutan hingga VB~0,25 mm. Seperti sebelumnya, pengukuran Ra dilakukan 3 hingga 5 kali dan rata-rata dicatat selanjutnya pengukuran suhu dan daya pemotongan dicatat pada setiap kondisi pemotongan.

**Tabel 1.** Desain paramater dan level

No	Faktor	Level 1	Level 2
1	V(laju pemotongan)(m/min)	120	180
2	F(laju pemakanan)(mm/rev)	0,2	0,4
3	A(kedalaman potong)(mm)	0,2	0,2
4	CT(jenis pahat)	ISCR	KYC
5	CF(jenis pemotongan)	MQL	DRY

Sesuai dengan sifatnya, masalah yang akan dipelajari sesuai tujuan penelitian adalah kualitas permukaan terbaik (topografi permukaan dan metalurgi), umur pahat yang paling baik (keausan pahat, umur pahat) dan daya pemotongan (P) yang paling rendah serta temperature pemotongan. Diputuskan mengadopsi Taguchi untuk desain experimental menggunakan L8 array orthogonal. Untuk itu, parameter dan level desain disajikan pada Tabel 1 dan skema pengumpulan data Taguchi L8 ada pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Skema pengumpulan data

No	V	F	CT	CF
1	120	0,2	ISCR	MQL
2	120	0,4	ISCR	DRY
3	120	0,4	KYC	MQL
4	120	0,2	KYC	DRY
5	180	0,2	KYC	MQL
6	180	0,4	KYC	DRY
7	180	0,4	ISCR	MQL
8	180	0,2	ISCR	DRY

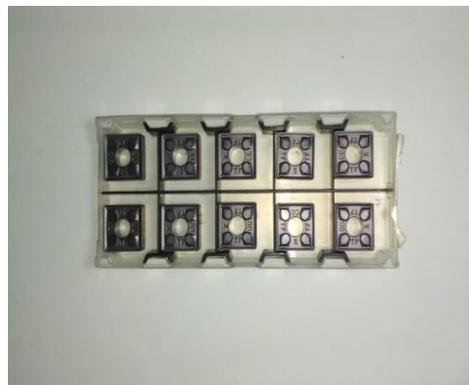
Pahat karbida berlapis yang dipilih untuk penelitian ini terdiri dari 2 (dua) jenis pahat cermet yaitu:

- Pahat CVD Berlapis TICN+AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TIN. Pahat ini dirancang untuk aplikasi pembubutan finishing kecepatan tinggi, sangat cocok untuk material jenis cast iron dan ductile iron



**Gambar 1.** Pahat CVD berlapis

- Pahat PVD berlapis TiAN. Aplikasi yang umum adalah pemesian HSLA (*High Streng Low Alloy*) dan pembubutan material yang dikeraskan dengan kecepatan rendah



**Gambar 2.** Pahat PVD Berlapis

Pada pengujian prestasi yang dilakukan, kedua jenis pahat karbida diatas pada setiap pengujian dipasangkan pada pemegang pahat MSDNN 2020K12.

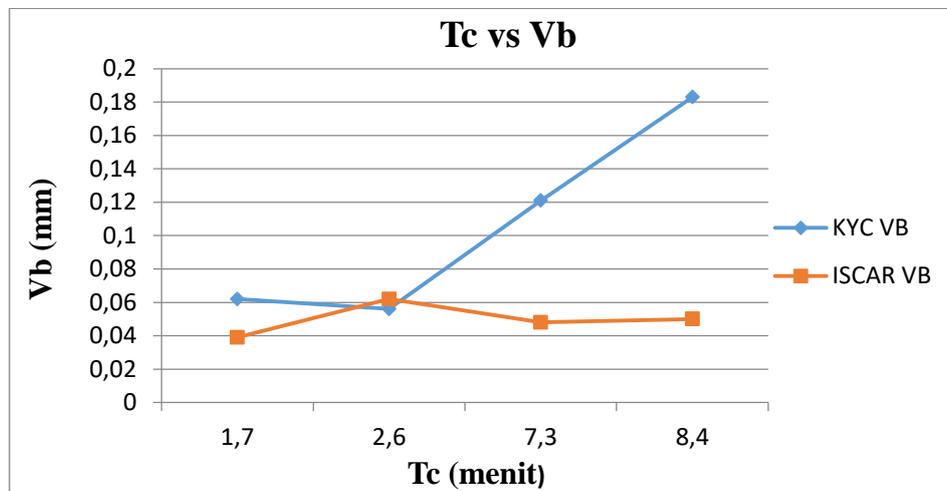
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terlihat pada tabel bahwa nilai Ra yang paling besar adalah pada kondisi pemotongan 3 ( $v = 120$  m/min,  $f = 0.2$  mm/rev,  $a = 0,2$  mm) dan nilai Ra yang paling kecil adalah pada kondisi pemotongan 8 ( $v = 180$  m/min,  $f = 0,2$  mm/rev,  $a = 0,2$  mm).

**Tabel 2.** Data Hasil Pengamatan Di SMKN 2 MEDAN

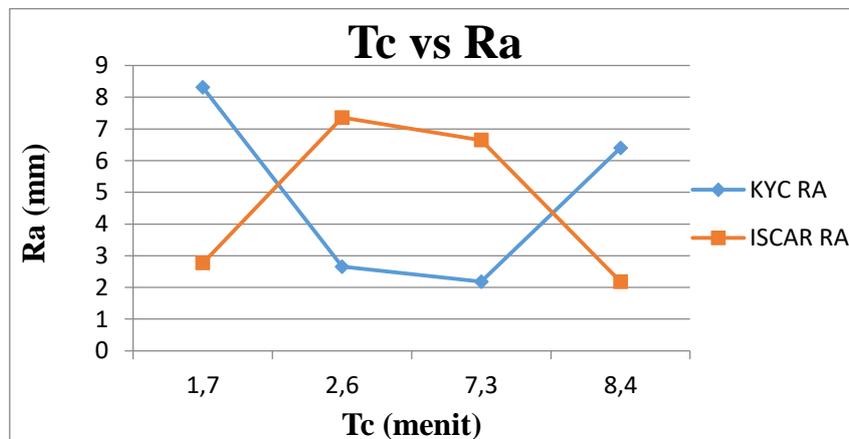
Run No	Cut Speed $v$ m/min	Feed $f$ mm/rev	Depth of Cut $a$ mm	Cutting Tools	Jenis Pahat	MQL ml/jam	Bar Dia Do mm	Cut Time $T_c$ min	Roughness $R_a$ micron	Temperatur $^{\circ}C$	Spindle $n$ rpm	Flank Wear $v_b$ mm
1	120	0.2	0.2	ISCAR	PVD	MQL	67,00	1,7	2,772	208	570	0,039
2	120	0.4	0.2	ISCAR	PVD	DRY	66,00	2,6	7,356	292	574	0,062
3	120	0.4	0.2	KYC	CVD	MQL	66,20	3,4	8,308	415	577	0,062
4	120	0.2	0.2	KYC	CVD	DRY	65,80	5,1	2,652	366	581	0,056
5	180	0.2	0.2	KYC	CVD	MQL	65,40	6,2	2,178	220	876	0,121
6	180	0,4	0,2	KYC	CVD	DRY	65,00	6,7	6,399	404	881	0,183
7	180	0,4	0,2	ISCAR	PVD	MQL	64,60	7,3	6,647	235	887	0,048
8	180	0,2	0,2	ISCAR	PVD	DRY	64,20	8,4	2,178	319	892	0,050

Kecepatan potong pada 120 m/min menghasilkan Vb paling kecil senilai 0,039 mm dan Vb paling besar senilai 0,062 mm sedangkan kecepatan potong pada 180 m/min menghasilkan Vb paling kecil senilai 0,048 mm dan Vb paling besar senilai 0,183 mm.



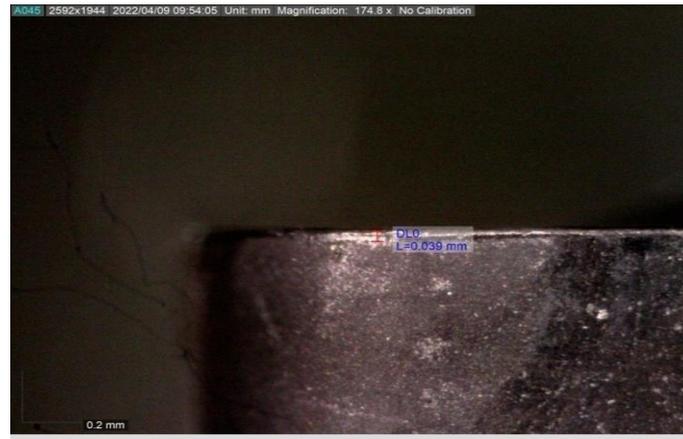
Gambar 3. Grafik Tc vs Vb

Kecepatan potong pada 120 m/min menghasilkan Ra paling kecil senilai 0,048 micron dan Ra paling besar senilai 8,308 micron sedangkan kecepatan potong pada 180 m/min menghasilkan Ra paling kecil senilai 2,178 micron dan Ra paling besar senilai 6,647 micron.



Gambar 4. Grafik Tc vs Ra

Gambar keausan mata pahat PVD Vb 0,039 mm dengan nilai Ra 2,772 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 208°C . Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 2,772 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) dengan nilai 0,2 mm/rev, dan kecepatan potong (v) dengan nilai 120 m/min kemudian kedalaman potong (a) dengan nilai 0,2 mm.



**Gambar 5.** Keausan mata pahat PVD Vb 0,039 mm

Gambar keausan mata pahat PVD Vb 0,062 mm dengan nilai Ra 7,356666667 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 292 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 7,356666667 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) dengan nilai 0,4 mm/rev, dan kecepatan potong (v) dengan nilai 120 m/min kemudian kedalaman potong (a) dengan nilai 0,2 mm.



**Gambar 6.** Keausan mata pahat CVD Vb 0,062 mm

Gambar keausan mata pahat CVD Vb 0,062 mm dengan nilai Ra 8,308 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 415 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 8,308 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) 0,4 mm/rev, dan kecepatan potong (v) dengan nilai 120 m/min kemudian kedalaman potong (a) 0,2 mm.



**Gambar 7.** Keausan mata pahat CVD Vb 0,056 mm

Gambar keausan mata pahat CVD Vb 0,056 mm dengan nilai Ra 2,652333333 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 366 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra)

dengan nilai 2,652333333 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) 0,2 mm/rev, dan kecepatan potong (v) dengan nilai 120 m/min kemudian kedalaman potong (a) 0,2 mm



**Gambar 8.** Keausan mata pahat CVD Vb 0,121 mm

Gambar keausan mata pahat CVD Vb 0,121 mm dengan nilai Ra 2,178666667 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 220 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 2,178666667 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) 0,2 mm/rev, dan kecepatan potong (v) 180 m/min kemudian kedalaman potong (a) 0,2 mm.



**Gambar 9.** Keausan mata pahat CVD Vb 0,183 mm

Gambar keausan mata pahat CVD Vb 0,183 mm dengan nilai Ra 6,399 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 404 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 6,399 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) 0,4 mm/rev, dan kecepatan potong (v) 180 m/min kemudian kedalaman potong (a) 0,2 mm. Pada kondisi pemotongan ini Ra meningkat karena disebabkan terjadinya built-up edges (BUE) pada pahat, yang dimana built-up edges (BUE) terjadi akibat adanya geram (chip) yang menempel pada pahat yang akan menyebabkan mata pahat menjadi tumpul dan pada kondisi pemotongan seperti ini bukan pahat yang memotong benda kerja tetapi geram (chip) yang terdapat pada permukaan pahat.



**Gambar 10.** Keausan mata pahat PVD Vb 0,048 mm

Gambar keausan mata pahat PVD Vb 0,048 mm dengan nilai Ra 6,647 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 235 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 6,647 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) 0,4 mm/rev, dan kecepatan potong (v) 180 m/min kemudian kedalaman potong (a) 0,2 mm.



**Gambar 11.** Keausan mata pahat PVD Vb 0,05 mm

Gambar keausan mata pahat PVD Vb 0,05 mm dengan nilai Ra 2,178 micron menghasilkan suhu tertinggi sebesar 319 °C. Nilai kekasaran permukaan (Ra) dengan nilai 2,178 micron yang dipengaruhi oleh gerak makan (f) 0,2 mm/rev, dan kecepatan potong (v) 180 m/min kemudian kedalaman potong (a) 0,2 mm.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini terdapat beberapa kesimpulan, yaitu :

- Dari pengujian masing masing kondisi pemotongan diperoleh nilai optimum yaitu kecepatan potong  $v = 180/\text{min}$ , gerak makan  $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ , kedalaman potong  $a = 0,2 \text{ mm}$  dan menghasilkan nilai  $Ra = 2,178 \text{ micron}$ .
- Karakteristik lapisan pahat potong PVD berlapis (TiAlN) memiliki suhu pemotongan yang lebih rendah yaitu  $208^\circ\text{C}$ , rendahnya gesekan, kecenderungan yang lebih rendah untuk membentuk BUE (Built Up Edge) dan lapisan ini juga memberikan ketahanan terhadap aus dikarenakan tingkat kekerasannya. Sedangkan karakteristik lapisan pahat CVD berlapis (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN) memiliki kecenderungan lapisan lebih mudah terkikis yang diakibatkan oleh

tingkat kekerasan yang lebih tinggi, suhu pemotongan yang tinggi yaitu 415°C dan volume keausan lebih besar.

- Dari hasil mengamati kualitas permukaan pada operasi pembubutan kering ditemukan adanya BUE (Built Up Edge) pada kondisi pemotongan 6 yang memiliki nilai Ra 6,399 micron, dimana BUE (Built Up Edge) ini terjadi karena adanya geram (chip) yang menempel pada permukaan pahat yang akan menyebabkan permukaan pahat menjadi tumpul

Adapun saran dari penelitian ini yaitu.

Adapun saran dari penulis untuk mendukung terciptanya kualitas yang baik untuk penelitian terkait yang akan dilakukan selanjutnya yaitu:

- Pada saat proses penelitian supaya selalu mengutamakan keselamatan dan kesehatan kerja dengan menyediakan kotak P3K dan alat keselamatan kerja.
- Mengecek kondisi benda kerja yang sudah terpasang pada mesin bubut CNC terlebih dahulu sebelum memulai penelitian dan pastikan benda kerja dalam keadaan center, supaya pada saat melakukan foto permukaan benda kerja hendaknya menggunakan mikroskop dengan resolusi yang lebih baik dan juga dengan skala pengaturan pembesaran gambar yang lebih baik
- Diharapkan pada saat memotong geram (chip) yang panjang supaya menggunakan tang potong untuk menghindari geram (chip) yang menggulung pada benda kerja yang dapat mengakibatkan kerusakan pada pahat yang sedang digunakan

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] B. Koyilada, S. Gangopadhyay, and A. Thakur, "Comparative evaluation of machinability characteristics of Nimonic C-263 using CVD and PVD coated tools," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 85, pp. 152–163, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.02.023.
- [2] B. C. Putih, "Machinability dan surface finishing 6.1.," vol. 2, pp. 1–8.
- [3] mas'ud waqiah Nurul, "濟無No Title No Title," *Persepsi Masy. Terhadap Perawatan Ortod. Yang Dilakukan Oleh Pihak Non Prof.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [4] M. I. Fitrianda, *Digital Digital Repository Repository Universitas Universitas Jember Jember Digital Digital Repository Repository Universitas Universitas Jember*. 2013.
- [5] K. Permukaan, G. P. Dan, and A. Soesanti, "Optimasi Parameter Pemesinan Untuk Umur Pahat Pada Proses Bubut Dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy The Use Of Taguchi-Grey-Fuzzy to Optimize Surface Roughness , Cutting Force And Tool Life In Turning Of Skd 11," no. Tm 092501, 2012.
- [6] A. Mardiansyah, "Analisis Kekasaran Permukaan Benda Kerja Dengan Variasi Jenis Material Dan Pahat Potong," Univ. Bengkulu, 2014, [Online]. Available: <http://repository.unib.ac.id/9244/1/I%2CII%2CIII%2CII-14-cho-FT.pdf>.
- [7] Iwan Darliansyah, "Bab Ii Tinjauan Pustaka Aplikasi," *Hilos Tensados*, vol. 1, no., pp. 1–476, 2005.
- [8] C. Johan, "Karakteristik Keausan Pahat Sisipan Karbida Akibat Pembubutan Kering Stainless Steel," p. 81, 2018.
- [9] S. Sunarto. Mawarni, "Studi Pahat Karbida Berlapis (TiAlN/TiN) pada pembubutan Kering Kecepatan Potong Tinggi Bahan Paduan Aluminium 6061," *J. Inovtek Polbeng*, vol. 07, no. 2, 2017.
- [10] U. S. Utara, U. S. Utara, and U. S. Utara, "Optimasi Kondisi Pemotongan pada

- Pembubutan Keras Baja AISI 4340 yang Menggunakan Pahat Karbida CVD Berlapis TiN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiCN dengan Metode Simulated Annealing,” 2018.
- [11] A. Ginting, R. Skein, D. Cuaca, Herdianto, Pieter, and Z. Masyithah, “The characteristics of CVD- and PVD-coated carbide tools in hard turning of AISI 4340,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 129, no. 18, pp. 548–557, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.07.072.
- [12] B. Al, “Issn 2548-7574,” vol. 2, no. 1, 2017.
- [13] F. Sitorus, A. Ginting, and B. Wirjosentono, “Penyelidikan Karakteristik Lapisan Diamond Film Pahat Karbida Terhadap Pembebanan Mekanik Pada Pembubutan Kering,” *J. Inotera*, vol. 1, no. 1, p. 32, 2017, doi: 10.31572/inotera.vol1.iss1.2016.id6.
- [14] L. Penelitian, “Pembuangan Geram Pada Proses Pembubutan Universitas Hkbp Nommensen,” 2013.
- [15] A. Reza, “Studi Suhu Pemotongan pada Pahat Karbida CVD Berlapis ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiCN ) pada Pembubutan Keras Baja AISI 4340 Secara Eksperimental dan Numerikal,” 2018.
- [16] I. Butarbutar, “Optimasi Kondisi Pemotongan pada Pembubutan Baja AISI 4340 yang Dikeraskan Menggunakan Pahat Karbida PVD Berlapis AlTiN dengan Algoritma Genetika,” 2018, [Online]. Available: <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/9903>.  
<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1xukz6lZVbIFOWyHUSpPvGNBOWra3kD-4>