



Optimasi Parameter Pemotongan CNC Milling untuk Mencapai Keausan Minimal pada Pahat *Insert Carbide* terhadap Material DIN 1.2311 dengan Metode Statistik

Febby Fauziah^{1*}, Otto Purnawarman², Herman Budi Harja³, Muhammad Syahdan Fathul Haq⁴

¹⁻⁴Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia

*Penulis Korespondensi : fauziah@polman-bandung.ac.id

Abstract. Flank wear is one of the primary concerns in machining processes, especially in CNC milling, as it directly affects tool life, machining efficiency, and the surface quality of workpieces. This study aims to analyze the effect of cutting parameters on the wear rate of carbide insert tools (Sandvik R245-12T3 M-PM 530) when machining DIN 1.2311 material using a 2008 CNC milling machine (DMTG XD-40A). The parameters tested include cutting speed (V_c), feed per tooth (f_z), and toolpath. The Taguchi method with an L9 orthogonal array was used to determine the optimal parameter combination. ANOVA was used to evaluate the contribution of each factor, while the coefficient of determination (R^2) was applied to assess model accuracy and detect structural instability of the CNC machine's table. The results show that cutting speed was the most dominant factor contributing 75.54% to tool wear, followed by toolpath at 20.63%, and feed per tooth at 2.51%. The minimum observed tool wear was 0.10575 mm, achieved using 260 m/min cutting speed, one-way toolpath, and 0.08 mm/rev feed rate. The regression model yielded an R^2 value of 92.31%, indicating high model reliability and its ability to reflect potential mechanical instability in the machine's construction due to aging. These findings are expected to guide industrial applications in optimizing machining conditions, extending tool life, and improving productivity, particularly when using modern cutting tools on older CNC machines.

Keywords: CNC Milling Machine; Cutting Parameters; Cutting Speed; Taguchi Method; Tool Wear.

Abstrak. Keausan pahat bagian tepi merupakan salah satu permasalahan utama dalam proses pemesinan, khususnya pada mesin CNC milling, yang berdampak langsung terhadap umur pahat, efisiensi pemotongan, dan kualitas permukaan benda kerja. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter pemotongan terhadap keausan pahat insert carbide tipe Sandvik R245-12T3 M-PM 530 pada material DIN 1.2311 menggunakan mesin CNC milling tahun 2008 tipe DMTG XD-40A. Parameter yang diuji meliputi kecepatan potong (*velocity cutting*), laju pemakanan (*feed per tooth*), dan pola pemakanan (*toolpath*). Metode Taguchi dengan rancangan *Orthogonal Array* L9 digunakan untuk menentukan kombinasi parameter optimal. Selanjutnya, analisis statistik ANOVA digunakan untuk mengukur kontribusi tiap faktor, dan koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi stabilitas model serta mendeteksi ketidakstabilan konstruksi pada bagian meja mesin CNC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan potong merupakan faktor paling dominan terhadap keausan pahat dengan kontribusi sebesar 75,54%, diikuti pola pemakanan sebesar 20,63%, dan *feed/tooth* sebesar 2,51%. Nilai keausan minimum sebesar 0,10575 mm diperoleh pada kombinasi parameter kecepatan potong 260 m/min, *toolpath one way*, dan *feed/tooth* 0,08 mm/rev. Nilai R^2 sebesar 92,31% mengindikasikan bahwa model regresi dapat menjelaskan variasi keausan secara sangat baik, serta membantu dalam mengidentifikasi kemungkinan ketidakstabilan pada konstruksi meja mesin CNC yang sudah berumur.

Kata kunci: Keausan Pahat; Kecepatan Potong; Mesin CNC Milling; Metode Taguchi; Parameter Pemotongan

1. LATAR BELAKANG

Menurut Kementerian Perindustrian (2024), sektor manufaktur Indonesia mengalami pertumbuhan rata-rata sebesar 3,44% per tahun pada periode 2014–2022. Pertumbuhan tersebut mendorong perkembangan teknologi pemesinan, salah satunya penggunaan mesin CNC milling yang memiliki tingkat akurasi dan efisiensi lebih baik dibandingkan mesin konvensional (Saputra & Yudiyanto, 2024; Firdaus & Susanti, n.d.). Seiring perkembangan tersebut, kondisi mesin CNC di Laboratorium CAD, CAM, dan CNC Politeknik Manufaktur

Bandung perlu diperhatikan karena mesin CNC DMTG yang digunakan telah beroperasi sejak tahun 2008 dengan *cutting time* mencapai 192.512 menit dan *power on time* lebih dari satu juta menit. Kondisi mesin dan parameter pemotongan yang tidak sesuai dapat memengaruhi kualitas hasil pemesinan, efisiensi proses, dan keausan pahat (M. P. Groover, 2019).

Parameter pemotongan seperti *cutting speed*, *feed rate*, dan *toolpath* menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas proses *machining*. Ketidaksesuaian parameter, terutama pada penggunaan mesin lama dengan teknologi pahat modern, dapat menyebabkan peningkatan *tool wear* dan penurunan kualitas permukaan benda kerja (Hou, Zhang, Luo, & Wu, 2013). Penelitian sebelumnya oleh Andre Hidayat (2021) menunjukkan bahwa *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* berpengaruh terhadap keausan pahat pada material AISI 4140 menggunakan metode Taguchi (Hidayat, Lubis, & Rosehan, 2022). Namun, penelitian tersebut belum membahas penggunaan material DIN 1.2311 dengan *cutter tipe Sandvik* pada kondisi mesin CNC yang telah beroperasi dalam jangka panjang.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki urgensi untuk mengkaji pengaruh parameter pemotongan terhadap *tool wear* pada proses CNC milling material DIN 1.2311 menggunakan *cutter Sandvik*. Kebaruan penelitian terletak pada analisis kombinasi parameter pemotongan pada mesin CNC lama dengan penggunaan pahat modern untuk menentukan parameter optimal yang dapat meminimalkan keausan pahat. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh parameter pemotongan terhadap *tool wear*, menentukan kombinasi parameter optimal, serta mengidentifikasi parameter yang paling dominan memengaruhi keausan pahat guna meningkatkan efisiensi proses pemesinan dan kualitas hasil *machining*.

2. KAJIAN TEORITIS

Proses pemesinan merupakan salah satu metode untuk membentuk atau memodifikasi suatu material dengan cara menghilangkan sebagian volumenya dalam bentuk serpihan atau geram. Dalam tahapan ini, terjadi kontak langsung dan dinamis antara alat potong (pahat) dan benda kerja. Benda kerja akan mengalami pemisahan material secara bertahap melalui gaya potong yang tinggi, sedangkan pahat mengalami gesekan dan tekanan yang signifikan sehingga mengakibatkan peningkatan suhu pada ujung potongnya. Kondisi tersebut berpotensi mempercepat keausan pahat serta menurunkan efisiensi dan ketepatan proses pemotongan. Disisi lain, benda kerja tidak hanya mengalami perubahan bentuk, tetapi juga dapat mengalami perubahan sifat fisik maupun kimia akibat panas dan tegangan yang terjadi selama proses pemesinan berlangsung tinjauan alat (Nasution & Damanik, 2021).

Menurut Siswoko (2019), mesin CNC *milling* (*Computer Numerical Control*) adalah mesin perkakas yang dikendalikan komputer dan bekerja otomatis berdasarkan program numerik. Mesin CNC *milling* 3-sumbu memiliki pergerakan pada sumbu X, Y, dan Z untuk melakukan proses pemesinan presisi tiga dimensi (Aziz & Saraswati, 2022). Prinsip kerjanya yaitu mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk memutar spindel dan alat potong, sedangkan gerak makan dilakukan oleh meja kerja sesuai arah sumbu mesin (Budyanto, Yuono, & Rohman, n.d.).

Parameter proses pada permesinan milling merupakan acuan utama dalam menentukan perhitungan selama proses pemotongan berlangsung. Parameter ini meliputi kecepatan potong (*cutting speed/Vc*), kedalaman pemotongan (*depth of cut*), kecepatan pemakanan (*feed rate/ f*), serta jalur gerak alat potong (*tool path*) (Aziz & Saraswati, 2022).

Parameter mesin yang harus diperhatikan dalam proses pemesinan milling diantaranya sebagai berikut :

Velocity Cutting (Vc)

Merujuk pada kapasitas alat pemotong dalam menyayat material dengan aman, yang diukur berdasarkan panjang tatal yang dihasilkan per satuan waktu, seperti meter per menit (m/min) atau kaki per menit (ft/min).

$$Vc = \frac{(\pi \times d \times n)}{1000} \dots\dots\dots(i)$$

Keterangan :

Vc = Velocity cutting / Kecepatan potong (m/menit)

n = Putaran spindle mesin (Rpm)

d = diameter tool (mm)

π = 3,14 atau 22/7

Putaran Mesin (Spindle Speed)

Spindle speed merupakan kecepatan putaran spindle untuk melakukan pemakanan terhadap benda kerja dalam waktu satu menit, secara teoritis kecepatan *spindle* dapat di cari dengan rumus sebagai berikut:[9]

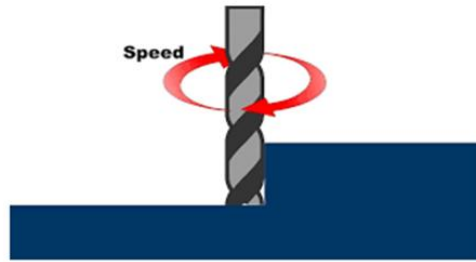
$$n = \frac{(Vc \times 1000)}{(\pi \times d)} \dots\dots\dots(ii)$$

Keterangan :

Vc = Kecepatan potong (mm/min).

π = 3,14 atau 22/7.

d = Diameter cutter (mm).



Gambar 1. Visualisasi Putaran Mesin Milling RPM[9]

Kedalaman Pemotongan (Depth Of Cut)

Depth of cut merupakan ukuran kedalaman pemotongan yang dilakukan oleh pahat pada setiap lintasan pemesinan. Nilai ini ditentukan dari perbedaan antara ketebalan awal benda kerja dan ketebalan akhir setelah proses pemotongan (Aziz & Saraswati, 2022).

$$a = Lo - Li(3).....(iii)$$

Keterangan :

a = Kedalaman pemotongan (mm)

Lo = Ukuran awal (mm)

Li = Ukuran akhir (mm)

Feed Rate

Feed rate merupakan kecepatan pergerakan pahat terhadap benda kerja dalam suatu waktu. Biasanya satuan gerakan pemakanan yang digunakan adalah mm/menit. Secara rumus untuk mencari kecepatan pemakanan (Afandi, n.d.) :

$$F = fz \times Z \times n.(iv)$$

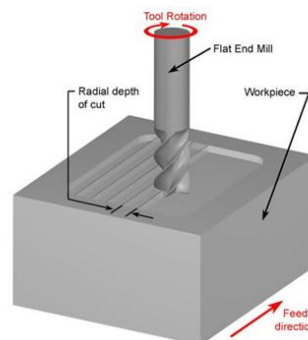
Keterangan :

F = Feed rate (mm/min).

fz = gerakan makan per gigi (mm/tooth).

Z = jumlah mata potong.

n = putaran mesin (Rpm).

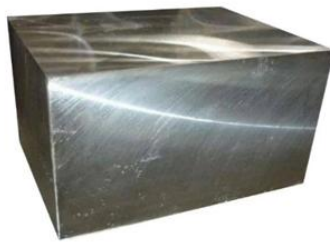


Gambar 2. Ilustrasi Feedrate(Aziz & Saraswati, 2022)

Toolpath

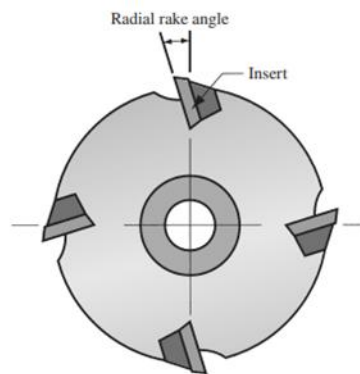
Toolpath adalah arah/jalur pergerakan cutter Ketika proses pemesinan berlangsung yang dapat mempengaruhi lama waktu prosesnya. Terdapat berbagai macam pilihan *Toolpath* dari berbagai *software*. Pemilihan *Toolpath* disesuaikan dengan kegunaannya masing-masing (Monreal & Rodriguez, 2003).

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah *DIN 1.2311* atau *40CrMnMoS8* dengan komposisi kimia dengan kandungan utamanya antara lain: Carbon (C) 0,30 %, Silicon (Si) 0.54%, Magnesium (Mn) 0.,80% *Phosphorus* (P) 0,13%, Sulfur (S) 0,05 %, *Chromium* (Cr) 1,63 %, Molybdenum (Mo) 0,38%. (Steelindo)



Gambar 3. Material DIN 1.2311

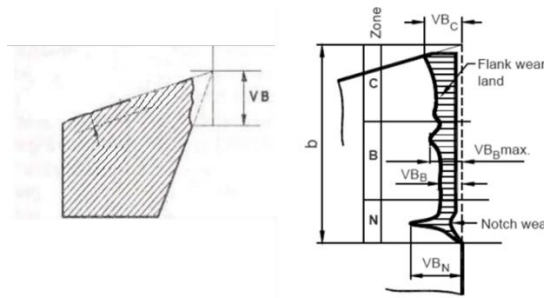
Material dipotong menggunakan cutter endmill dengan geometri seperti pada gambar 4 dibawah ini



Gambar 4. *Geometry Insert Carbide Dengan 4 Sisi Potong*

Kausan pahat tepi merupakan keausan pada sisi pahat akibat gesekan terus-menerus dengan benda kerja selama proses pemotongan. Semakin lama proses pemesinan berlangsung, keausan akan meningkat hingga pahat tidak layak digunakan lagi. Standar ISO 3685:1993 menjelaskan pola dan lokasi keausan pahat (Nugroho et al., n.d.). Nilai keausan pahat (VB) yang disarankan berbeda untuk setiap proses pemesinan, misalnya pada *turning* dan *face milling* sebesar 0,4 mm untuk pahat karbida, sedangkan *end milling* sebesar 0,3 mm. Pengukuran keausan dilakukan pada setiap mata potong pahat menggunakan mikroskop

dengan mengukur panjang VB dalam satuan milimeter (mm) (Monreal & Rodriguez, 2003 dan Nugroho, Hendrikus, & Senoaji, n.d.)

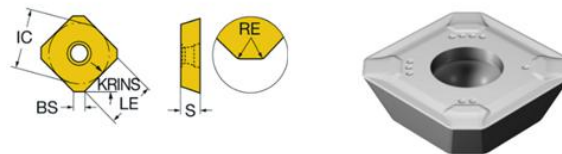


Gambar 5. Keausan Pahat Jenis Flank Wear

Faktor utama yang mempengaruhi keausan pahat meliputi kecepatan potong (*cutting speed/Vc*), *feed per tooth*, dan pola pemakanan (*toolpath*). Keausan pahat dapat terjadi melalui beberapa mekanisme, yaitu abrasi, adhesi, dan oksidasi. Abrasi merupakan keausan yang terjadi akibat gesekan partikel keras benda kerja pada permukaan pahat. Adhesi terjadi karena adanya kontak dengan tekanan dan suhu tinggi yang menyebabkan material benda kerja menempel pada permukaan pahat dan kemudian mengikisnya. Sementara itu, oksidasi terjadi pada suhu pemotongan yang tinggi sehingga menyebabkan terbentuknya lapisan oksida pada pahat, terutama pada pahat karbida (Chistiano, Rosehan, & Lubis, 2023).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan CNC milling DMTG XD-40A dan alat potong nya adalah *Insert Sandvik R245-12 T3 M-PM 530*. *Insert carbide* adalah jenis *tools* yang akan di gunakan selama penelitian. Keunggulan pahat ini memiliki ketangguhan, kekuatan impact, dan ketahanan terhadap guncangan termal yang dibutuhkan, tetapi keduanya juga memiliki keterbatasan penting, khususnya berkenaan dengan kekuatan dan kekerasan *panas.carbide* termasuk di antara material perkakas dan cetakan yang paling penting, serbaguna, dan hemat biaya untuk berbagai aplikasi (M. P. Groover, 2019).



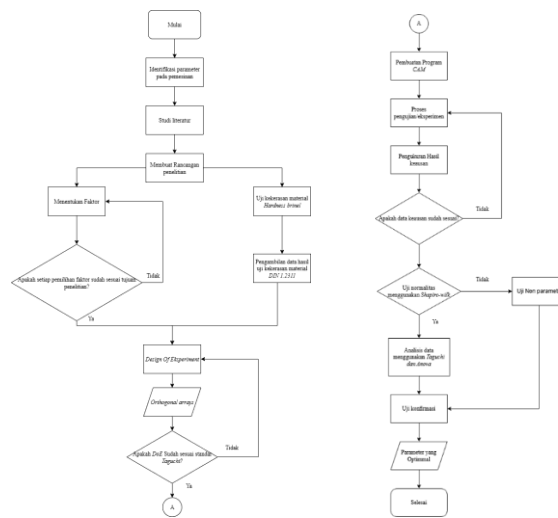
Gambar 6. *Insert R245-12T3 M-PM 530*

Untuk mengukur keausan pahat menggunakan alat ukur digital yang dinamakan *Dino-Lite*. *Dino-Lite AM4113* adalah mikroskop digital portabel yang digunakan untuk mengukur dan mengamati keausan pada pahat dengan presisi tinggi.



Gambar 7. Dino-lite AM4113/AD4113

Pada penelitian kali ini, diperlukan suatu rancana pekerjaan yang akan menjadi acuan pada alur proses penelitian. Sehingga penelitian ini dapat dilakukan secara sistematis serta pengerjaan dapat sesuai alur dan berjalan dengan baik.



Gambar 8. Diagram alir penelitian

Parameter permesinan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Velocity of Cutting* (V_c), *Toolpath* dan *Feed rate* (F). Adapun V_c yang digunakan adalah sebagai berikut

$$\begin{array}{l}
 \text{P} \quad f_z \quad 0.17 \text{ mm (0.08 - 0.25)} \\
 \quad \quad h_{ex} \quad 0.12 \text{ mm (0.06 - 0.18)} \\
 \quad \quad v_c \quad 290 \text{ m/min (325 - 260)} \dots\dots\dots(v)
 \end{array}$$

Gambar 9. Rekomendasi parameter Sandvik Coromant

Berikut merupakan hasil pengujian kekerasan material dengan menggunakan metode *Hardness Rockwell B*.

Tabel 1. Hasil pengujian kekerasan material DIN 1.2311

Nama Material	Jenis Mesin	Percobaan			Rata - Rata	Nilai Hrb
		1	2	3		
Din 1.2311(1)	Gnehm Horgen 150	0,643	0,63	0,643	0,639	310,5447
Din 1.2311(2)	Gnehm Horgen 150	0,638	0,625	0,625	0,629	320,539

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

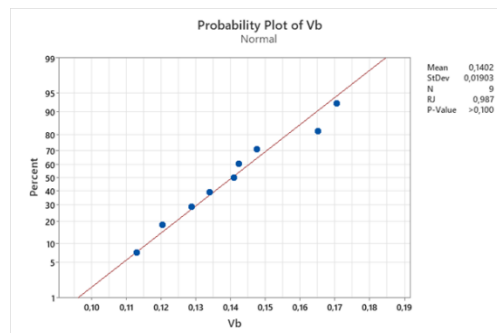
Berdasarkan hasil eksperimen, data diperoleh dari proses facing benda kerja dengan menggunakan kombinasi parameter yang sudah ditentukan oleh metode Taguchi. Dimana parameter penelitian kali ini meliputi Velocity cutting, Toolpath, dan Feed/tooth dengan respon keausan pahat. Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 2 sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil pengujian keausan pahat

Run	Faktor			Respon hasil pengukuran				
	vc (mm/min)	Tool path	feed (mm/min)	Vb1	Vb2	Vb3	Vb4	Average
1	260	350	0,08	0,108	0,109	0,126	0,138	0,12025
2	260	327,98	0,16	0,094	0,095	0,118	0,145	0,11300
3	260	214	0,25	0,105	0,119	0,142	0,149	0,12875
4	295,5	350	0,16	0,111	0,132	0,161	0,165	0,14225
5	295,5	327,98	0,25	0,100	0,145	0,166	0,125	0,13400
6	295,5	214	0,08	0,171	0,112	0,155	0,152	0,14750
7	325	350	0,25	0,171	0,130	0,171	0,188	0,16500
8	325	327,98	0,08	0,169	0,139	0,121	0,135	0,1410
9	325	214	0,16	0,172	0,156	0,188	0,166	0,17050

Pada penelitian ini jenis uji normalitas yang di pakai adalah shapiro-wilk, karena jumlah data yang sedikit sehingga dipilih jenis uji normalitas shapiro-wilk. Maka menggunakan hipotesis sebagai berikut:

H_0 = Data terdistribusi normal, H_1 = Data terdistribusi tidak normal, $P\text{-Value} > 0,05$ maka H_0 diterima, H_1 ditolak, $P\text{-Value} < 0,05$ maka H_0 ditolak, H_1 diterima



Gambar 10. Hasil Uji normalitas

Gambar 10 diatas menunjukkan bahwa hasil uji normalitas menggunakan software Aplikasi analisis statistik yang dimana data terdistribusi secara normal dilihat dari data keausan yang berada dekat/ sejajar dengan garis normal teoritis maka dapat di simpulkan bahwa data terdistribusi normal. Dari data tersebut memperoleh nilai mean 0,1402 dan data standar deviasi (StDev) 0,01903 yang menyatakan bahwa data memiliki tingkat konsistensi yang baik karena memiliki nilai Standar deviasi yang kecil. Dan mendapatkan nilai Ryan-joiner statistik sebesar

0,987 yang dimana nilai tersebut normal karena semakin mendekati nilai 1 maka data semakin terdistribusi dengan normal.

Berdasarkan nilai yang di peroleh P value > 0.05 maka H_0 diterima, H_1 ditolak. Sehingga dari berbagai aspek tersebut maka dapat dikatakan bahwa data keausan tersebut terdistribusi dengan normal, dan dapat diuji secara parametrik (Krishnaiah & Shahabudeen, n.d.).

Selanjutnya dilakukan pengukuran mean square deviation untuk mengetahui nilai error yang ada pada setiap pengukuran dan Perhitungan *S/N ratio* dengan karakteristik *Smaller is better* dengan nilai sebagai berikut :

sample	Faktor			Respon hasil pengukuran					MSD	SN ratio (x)
	vc (mm/min)	Tool path	feed (mm/min)	Vb1	Vb2	Vb3	Vb4	AVERAGE		
1	260	350	0,08	0,108	0,109	0,126	0,138	0,12025	0,01462	18,35164
2	260	327,98	0,16	0,094	0,095	0,118	0,145	0,11300	0,01320	18,79344
3	260	214	0,25	0,105	0,119	0,142	0,149	0,12875	0,01689	17,72428
4	295,5	350	0,16	0,111	0,132	0,161	0,165	0,14225	0,02072	16,83553
5	295,5	327,98	0,25	0,100	0,145	0,166	0,125	0,13400	0,01855	17,31621
6	295,5	214	0,08	0,171	0,112	0,155	0,152	0,14750	0,02223	16,53090
7	325	350	0,25	0,171	0,130	0,171	0,188	0,16500	0,02768	15,57810
8	325	327,98	0,08	0,169	0,139	0,121	0,135	0,1410	0,02019	16,94928
9	325	214	0,16	0,172	0,156	0,188	0,166	0,17050	0,02921	15,34543

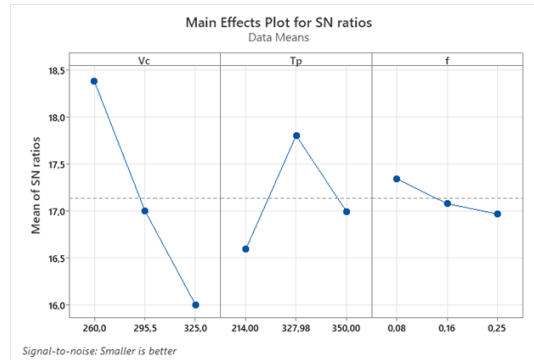
Gambar 11. Tabel hasil pengukuran dan SN Ratio

Tahap selanjutnya dilakukan penghitungan main effect untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh dalam percobaan ini. gambar 11 dibawah ini menunjukkan faktor yang paling berpengaruh (Wahjudi, San, & Pramono, 2001) .

Tabel 3. Main effect

Main effect			
Faktor	VC	Tool path	Feed
Level 1	18,2898	16,9218	17,2773
level 2	16,8942	17,6863	16,9915
level 3	15,9576	16,5335	16,8729
selisih	2,33218	1,15277	0,40441
Rank	1	2	3

Tabel 3 menunjukan bahwa *Velocity cutting* merupakan faktor yang paling berpengaruh untuk respon keausan pahat di susul *Toolpath* di Rank 2 dan *feed/tooth* ada di rank 3 untuk respon tersebut (Rashid, 2023). Dan penentuan parameter optimal untuk setiap faktor yaitu untuk faktor *Velocity cutting* level 1 dengan nilai *S/N ratio* 18,28786, *Toolpath* level 2 dengan nilai *S/N ratio* 17,6863, dan *feed/tooth* di level 1 dengan nilai kalkulasi *S/N ratio* 17,27727. Untuk menentukan parameter yang optimum dapat di pilih dari nilai yang dikalkulasikan dari perhitungan *S/N ratio* yang menghasilkan nilai yang paling besar.



Gambar 12. Grafik Main Effect Terhadap Respon Keausan Pahat

Hipotesis masing masing faktor

Hipotesis Faktor Velocity Cutting (1)

Setelah melakukan perhitungan manual mengenai mencari nilai *F-Value* secara teoritis dan menggunakan *software* Aplikasi analisis Statistik. Lalu langkah selanjutnya bandingkan dengan nilai *F tabel* untuk mengetahui faktor *Velocity cutting* berpengaruh atau tidak terhadap nilai keausan pahat. Berikut untuk menyatakannya menggunakan notasi sebagai berikut :

H_0 = *Velocity cutting* tidak berpengaruh pada nilai keausan pahat

H_1 = *Velocity cutting* berpengaruh pada nilai keausan pahat

Nilai *F-Value* yang dihasilkan oleh faktor *velocity cutting* yaitu sebesar 57,06. Nilai tersebut lebih besar dari nilai *F tabel* yang sudah ditentukan yaitu 5,41 maka dapat dinyatakan bahwa Hipotesisi (0) H_0 ditolak dan Hipotesis (H) diterima yang bermakna Faktor *velocity cutting* berpengaruh pada respon nilai keausan *insert carbide*.

Hipotesis Faktor Toolpath (2)

Setelah melakukan perhitungan manual mengenai mencari nilai *F-Value* secara teoritis dan menggunakan *software* Aplikasi analisis statistik. Lalu langkah selanjutnya bandingkan dengan nilai *F tabel* untuk mengetahui faktor *Toolpath* berpengaruh atau tidak terhadap nilai keausan pahat. Berikut untuk menyatakannya menggunakan notasi sebagai berikut

H_0 = *Toolpath* tidak berpengaruh pada nilai keausan pahat

H_1 = *Toolpath* berpengaruh pada nilai keausan pahat

Nilai *F-Value* yang dihasilkan oleh faktor *Toolpath* yaitu sebesar 15,58. Nilai tersebut lebih besar dari nilai *F tabel* yang sudah ditentukan yaitu 5,41 maka dapat dinyatakan bahwa Hipotesisi (0) H_0 ditolak dan Hipotesis (H) diterima, yang bermakna Faktor *Toolpath* berpengaruh pada respon nilai keausan *insert carbide*.

Hipotesis faktor Feed/Tooth (3)

Setelah melakukan perhitungan manual mengenai mencari nilai *F-Value* secara teoritis dan menggunakan *software* Aplikasi analisis statistik. Lalu langkah selanjutnya bandingkan dengan nilai *F tabel* untuk mengetahui faktor *feed/tooth* berpengaruh atau tidak terhadap nilai keausan pahat. Berikut untuk menyatakannya menggunakan notasi sebagai berikut:

$H_0 = \text{Feed/tooth}$ tidak berpengaruh pada nilai keausan pahat

$H_1 = \text{Feed/tooth}$ berpengaruh pada nilai keausan pahat

Nilai $F\text{-Value}$ yang dihasilkan oleh faktor Feed/tooth yaitu sebesar 1,89 Nilai tersebut lebih Kecil dari nilai F tabel yang sudah ditentukan yaitu 5,41 maka dapat dinyatakan bahwa Hipotesis (H_0) diterima dan Hipotesis (H) ditolak, yang bermakna Faktor feed/tooth tidak berpengaruh pada respon nilai keausan *insert carbide*.

Analisis R square

Selanjutnya dilakukan tahapan analisis berdasarkan hasil koefisien regresi R^2 tujuannya adalah menganalisis pergerakan yang dihasilkan dari sistem penggerak table mesin CNC DMTG-XD-40A.

Tabel 4. Hasil Analisis R Square

Jenis Toolpath	Hasil analisis
One way Hatch	Pada strategi toolpath One Way Hatch, proses pemakanan linear (G01) hanya mengaktifkan sumbu X, sehingga ballscrew dan guideway X bekerja secara konstan dalam satu arah. Karakteristik ini menghasilkan lintasan yang stabil tanpa pembalikan arah, tercermin dari nilai R^2 sebesar 0,999 yang menunjukkan keausan pahat meningkat secara linier dan merata.
50 Degree Zig-zag	Selama proses pemakanan linear dengan perintah G01, sumbu X dan Y bergerak secara simultan, menghasilkan lintasan diagonal, dan mencakup gerakan horizontal dan vertikal alat pemotong secara berurutan yang menghasilkan perubahan arah gerakan secara tiba-tiba[32]. Dalam kondisi ini, ballscrew pada kedua sumbu aktif secara bersamaan, memaksa sistem penggerak meja bekerja secara interpolatif simultan. Gerakan ini menghasilkan beban silang (cross-loading) pada konstruksi meja CNC, yang dapat memicu ketidakseimbangan dinamis, terutama jika terdapat backlash, kekakuan struktur yang menurun, atau keausan pada rel pandu. Temuan ini selaras dengan hasil pengujian, di mana strategi toolpath tersebut menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9231, mengindikasikan bahwa respons keausan pahat bersifat fluktuatif dan tidak linier terhadap akumulasi lintasan.
Spiral	Ketidakstabilan ini mengindikasikan adanya potensi backlash atau kelonggaran pada sistem ballscrew, khususnya saat terjadi perubahan arah simultan (x,y) antar sumbu. Hal ini berdampak pada deviasi posisi aktual terhadap posisi yang diperintahkan, sehingga mempengaruhi distribusi gaya potong dan menyebabkan keausan pahat yang tidak merata[32]. Dalam jangka panjang, hal ini juga dapat menimbulkan kerusakan mikro pada ballnut, guideway, maupun kopel penggerak, terutama bila sistem pelumasan atau kompensasi backlash tidak berjalan optimal.
	Strategi toolpath Spiral membentuk lintasan pemotongan yang bergerak secara melingkar dari sisi luar menuju pusat, dengan pola gerakan interpolatif yang halus dan bertahap antara sumbu X dan Y. Tidak seperti toolpath Zig-Zag yang bersifat bolak-balik tajam dan simultan, Spiral menghasilkan transisi arah yang kontinu tanpa hentakan mendadak, sehingga gaya potong terdistribusi secara lebih merata.
	Hasil pengujian menunjukkan bahwa toolpath ini menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9966, menandakan bahwa keausan pahat berlangsung secara linier, stabil, dan minim fluktuasi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kombinasi parameter pemesinan optimum terhadap nilai keausan *insert carbide* menggunakan metode *Design of Experiment* (DoE) *Taguchi* dengan *orthogonal array* L9. Parameter optimum yang diperoleh yaitu kecepatan potong (*velocity cutting*) sebesar 260 m/menit, *toolpath* Zig-Zag 50°, dan *feed/tooth* sebesar 0,08 mm. Hasil analisis *main effect* menunjukkan bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap keausan pahat adalah *velocity cutting* dengan nilai selisih sebesar 2,33218, diikuti oleh *toolpath* sebesar 1,15277, dan *feed/tooth* sebesar 0,40441. Hasil analisis ANOVA menunjukkan kontribusi pengaruh masing-masing faktor terhadap keausan pahat, yaitu *velocity cutting* sebesar 75,54%, *toolpath* sebesar 20,63%, dan *feed/tooth* sebesar 2,51%. Selain itu, nilai keausan minimum yang diperoleh melalui regresi linier pada parameter optimum adalah sebesar 0,10575 mm. Hasil eksperimen validasi yang dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan menghasilkan nilai rata-rata keausan sebesar 0,106 mm hingga 0,107 mm, sehingga menunjukkan bahwa parameter optimum yang diperoleh mampu menghasilkan tingkat keausan pahat yang rendah dan stabil.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu menambahkan faktor lain seperti penggunaan *coolant* guna mengetahui pengaruhnya terhadap keausan pahat, serta menggunakan metode optimasi lain seperti *Response Surface Methodology* (RSM) atau *full factorial* untuk memperoleh analisis yang lebih mendalam. Selain itu, jumlah level pada setiap faktor disarankan untuk diperbanyak agar diperoleh kombinasi parameter yang menghasilkan nilai keausan lebih optimal. Untuk pihak UPT pada unit penelitian, disarankan melakukan *corrective maintenance* pada sistem penggerak mesin CNC milling guna menjaga performa dan kestabilan proses pemesinan.

DAFTAR REFERENSI

- Afandi, A. P. (n.d.). *Modul CNC milling Mastercam X9*. CV. Prima Abadi Jaya. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=V9JbEAAAQBAJ>
- Ahadi, G. D., & Zain, N. N. L. E. (2023). Pemeriksaan uji kenormalan dengan Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling dan Shapiro-Wilk. *Eigen Mathematics Journal*, 11–19. <https://doi.org/10.29303/emj.v6i1.131>
- Aziz, M., & Saraswati, R. (2022). Optimalisasi parameter mesin CNC milling 3 axis terhadap waktu produksi dengan menggunakan Response Surface Methodology. *Formosa Journal of Applied Sciences*, 1(4), 293–304.
- Boangmanalu, E. P. D., et al. (2024). Analisis sifat mekanik material plat baja ST 37 dengan metode Brinell hardness test. *Atech-i*, 1(2), 1–9. <https://doi.org/10.45035/Atech-i>

- Budiyanto, E., Yuono, L. D., & Rohman, F. (n.d.). *Analisa proses produksi part number D574-50081-201 menggunakan mesin milling CNC di PT DI*.
- Burhanuddin, Y., Yahya, A. T., Ibrahim, G. A., & Hamni, A. (2023). *Optimasi keausan pahat potong pemesinan milling magnesium AZ31 tanpa pendingin dengan metode Taguchi*.
- Chistiano, F., Rosehan, R., & Lubis, S. Y. (2023). Pengaruh perbedaan grade insert carbide terhadap nilai keausan mata pahat pada material baja AISI 4140. *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 6(1), 252–262. <https://doi.org/10.31004/jutin.v6i1.16386>
- Fatimah, C., Safriana, S., & Andriani, S. (2024). Uji cemaran coliform menggunakan uji MPN pada air sumur gali, sumur bor dan PDAM. *Journal of Pharmaceutical and Health Research*, 5(1), 64–72. <https://doi.org/10.47065/jharma.v5i1.4955>
- Firdaus, F. N., & Susanti, N. A. (n.d.). *Pengaruh kecepatan putar dan penyayatan endmill cutter type HSS terhadap tingkat kekasaran alumunium pada mesin CNC*.
- Gonibala, N., Masinambow, V. A., Maramis, M. B. T., et al. (2019). *Analisis pengaruh modal dan biaya produksi terhadap pendapatan UMKM di Kota Kotamobagu*.
- Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes and systems*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=VAthzQEACAAJ>
- Haniah, N. (2013). *Uji normalitas dengan metode Liliefors*. Retrieved from <http://statistikapendidikan.com>
- Hidayat, A., Lubis, M. S. Y., & Rosehan, R. (2022). Optimasi pengaruh parameter pemotongan terhadap umur pahat pada pembubutan material AISI 4140. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(6), 8743–8754.
- Hou, Y., Zhang, D., Luo, M., & Wu, B. (2013). A cutting parameters selection method in milling aero-engine parts based on process condition matching. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, Article 157343. <https://doi.org/10.1155/2013/157343>
- Imam, B., & Muttaqin, A. (n.d.). *Telaah kajian dan literature review design of experiment (DOE)*.
- International Organization for Standardization. (1993). *ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools*. ISO.
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (n.d.). *Applied design of experiments and Taguchi methods*.
- Monreal, M., & Rodriguez, C. A. (2003). Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. *Computer-Aided Design*, 35(4), 395–401. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(02\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00060-X)
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). Wiley.
- Nasution, A. R., & Damanik, W. S. (2021). Analisa gaya potong pada proses pemesinan turning menggunakan bahan politetrafluoroetilena (PTFE). *SiNTESa CERED Seminar Nasional Teknologi Edukasi dan Humaniora*.
- Nugroho, S., Hendrikus, D., & Senoaji, K. (n.d.). *Karakterisasi pahat bubut high speed steel (HSS) Boehler tipe molibdenum (M2) dan tipe cold work tool steel (A8)*. Retrieved from <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/rotasi-19->
- PT Sandvik Coromant Indonesia. (2024). *Sandvik Coromant*. Retrieved November 26, 2024, from <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=R245-12%20T3%20M-PM%20%20%20%20%201130&m=7101119>

- Putri, N. T. (2022). *Manajemen kualitas terpadu: Konsep, alat dan teknik aplikasi*. Indomedia Pustaka. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=J4l0EAAAQBAJ>
- Rahmat, M., & Haripriadi, B. D. (2019). *Analisa pengaruh variasi parameter pemotongan dan pendingin terhadap tingkat keausan pahat end mill HSS hasil pemesinan CNC router milling pada aluminium sheet 1100*.
- Rashid, K. M. J. (2023). Optimize the Taguchi method, the signal-to-noise ratio, and the sensitivity. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 8(6), 64–70. <https://doi.org/10.22271/math.2023.v8.i6a.1406>
- Saputra, L. D., & Yudiyanto, E. (2024). Analisis performa mesin CNC milling mini 3 sumbu terhadap akurasi gerak pemotongan. *Journal of Mechanical Engineering*, 1(3).
- Saunders, L., Russell, R., & Crabb, D. (2012). The coefficient of determination: What determines a useful R^2 statistic? <https://doi.org/10.1167/iov.12-10598>
- Septian, A., Jerilian, E., Hidayat, I. N., Prahadi, M. A., Prasetyo, T., & Waluyo, A. I. S. E. (2024). *Analisis data sample menggunakan uji hipotesis penelitian perbandingan menggunakan uji ANOVA dan uji T*.
- Spiess, A.-N., & Neumeyer, N. (2010). An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: A Monte Carlo approach. Retrieved from <http://www.biomedcentral.com/1471-2210/10/6>
- St, C. (2012). *Applied design of experiment and Taguchi methods*. New Delhi. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/361342523>
- Sugiantoro, B., & Widyanto, S. A. (2014). *Optimasi parameter proses milling terhadap kualitas hasil permesinan aluminium dengan metode Taguchi*.
- Uzun, M., Usca, Ü. A., Kuntoğlu, M., & Gupta, M. K. (2022). Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness during milling of AISI X210Cr12 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3–4), 2709–2720. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08365-9>
- Wahjudi, D., San, G. S., & Pramono, Y. (2001). *Optimasi proses injeksi dengan metode Taguchi*. Retrieved from <http://puslit.petra.ac.id/journals/mechanical/24>