

ANALISIS VARIASI MEDIA PE'NDINGIN DAN PARAMETER PENGEBORAN TERHADAP KEAUSAN MATA BOR PADA PROSES PENGEBORAN PLAT BAJA ST37

Sopian Silitonga *¹
Akmal Indra ²

^{1,2} Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bengkalis

*e-mail: sopiansilitonga78@gmail.com, akmalindra@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi media pendingin dan parameter pengeboran terhadap keausan mata bor HSS pada baja karbon rendah ST37. Eksperimen dilakukan menggunakan mesin bor EDGE ZX-45 dengan rancangan Taguchi orthogonal array L9 (3³), yang melibatkan tiga faktor utama: kecepatan putaran (1100, 1460, 1860 rpm), gerak makan (0,045; 0,086; 0,142 mm/rev), dan tiga jenis media pendingin (oli Dromus, minyak kelapa, dan air mineral). Pengukuran keausan rata-rata (VB) dilakukan menggunakan mikroskop USB dan dianalisis dengan metode Taguchi menggunakan Signal-to-Noise (S/N) ratio dan Analisis Varians (ANOVA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putaran rendah dan gerak makan rendah dengan oli Dromus sebagai media pendingin menghasilkan keausan minimum sebesar 0,21192 mm, sedangkan keausan maksimum 0,48975 mm terjadi pada kombinasi gerak makan tinggi, kecepatan tinggi, dan pendingin air mineral. Analisis Taguchi dan S/N ratio menunjukkan bahwa kecepatan putaran merupakan faktor paling dominan, diikuti gerak makan, sedangkan pengaruh media pendingin relatif lebih kecil. Hasil ANOVA mengonfirmasi bahwa kecepatan putaran berpengaruh signifikan ($p\text{-value } 0,045 < 0,05$), sementara gerak makan dan media pendingin tidak signifikan pada taraf 95%. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan parameter pemotongan yang tepat untuk memperpanjang umur pahat dan meningkatkan efisiensi pemesinan.

Kata kunci: ANOVA, Baja ST37, Gerak makan, Kecepatan putaran, Media pendingin, Taguchi

Abstract

This study aims to analyze the effect of cooling media variations and drilling parameters on the flank wear of HSS drill bits when machining low-carbon steel ST37. Experiments were carried out using an EDGE ZX-45 drilling machine with a Taguchi L9 (3³) orthogonal array design, involving three main factors: spindle speed (1100, 1460, 1860 rpm), feed rate (0.045, 0.086, 0.142 mm/rev), and three types of cooling media (Dromus oil, coconut oil, and mineral water). Average flank wear (VB) was measured using a USB microscope and analyzed using the Taguchi method with Signal-to-Noise (S/N) ratio and Analysis of Variance (ANOVA).

The results show that low spindle speed and low feed rate with Dromus oil as the cooling medium produced the minimum wear of 0.21192 mm, whereas the maximum wear of 0.48975 mm occurred at the combination of high feed rate, high spindle speed, and mineral water as coolant. Taguchi and S/N ratio analysis indicated that spindle speed is the most dominant factor, followed by feed rate, while the cooling media had a relatively minor effect. ANOVA confirmed that spindle speed had a significant effect ($p\text{-value } 0.045 < 0.05$), while feed rate and cooling media were statistically insignificant at the 95% confidence level. These findings highlight the importance of proper drilling parameter selection to extend tool life and improve machining efficiency.

Keywords: ANOVA, Cooling media, Feed rate, Spindle speed, ST37 steel, Taguchi

PENDAHULUAN

Proses pemesinan merupakan salah satu metode manufaktur yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan komponen dengan dimensi presisi dan kualitas permukaan yang baik. Proses ini dilakukan dengan cara menghilangkan sebagian material dari benda kerja menggunakan pahat potong. Dibandingkan dengan metode manufaktur lain seperti pengecoran dan pembentukan, proses pemesinan mampu menghasilkan toleransi geometri yang lebih akurat serta memungkinkan

pembentukan detail bagian dalam komponen yang kompleks. Berbagai jenis proses permesinan digunakan di industri, di antaranya bubut (*turning*), sekrap (*shaping* dan *planing*), bor (*drilling*), frais (*milling*), gerinda (*grinding*), gergaji (*sawing*), dan memperbesar lubang (*boring*) (Wibowo & Ibrahim, 2014).

Salah satu permasalahan utama dalam proses permesinan adalah keausan pahat yang terjadi akibat kontak langsung antara pahat dengan benda kerja. Gesekan ini menimbulkan panas pada area pemotongan, dan akumulasi panas yang berlebihan akan mempercepat kerusakan ujung pahat. Keausan yang tinggi bukan hanya menurunkan kualitas permukaan produk, tetapi juga dapat menimbulkan gaya pemotongan yang berlebihan sehingga berpotensi merusak pahat, mesin perkakas, dan bahkan membahayakan operator. Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap keausan pahat antara lain kecepatan putar, gerak makan, kedalaman potong, serta kondisi pendinginan selama proses pemesinan.

Penggunaan fluida pendingin telah lama diterapkan untuk mengendalikan temperatur pemotongan dan mengurangi keausan pahat. Fluida pendingin berfungsi menurunkan suhu, melumasi bidang gesek, dan membantu mengeluarkan serpihan pemotongan. Penggunaan fluida pendingin terbukti mampu memperpanjang umur pahat dan meningkatkan kualitas permukaan hasil pemesinan. Namun, beberapa penelitian juga menyoroti potensi dampak negatif dari fluida pendingin konvensional, seperti pencemaran lingkungan dan risiko kesehatan bagi operator yang terpapar dalam jangka panjang (Rahmat & Haripriadi, 2019). Oleh karena itu, pemilihan media pendingin yang efektif dan aman menjadi aspek penting dalam optimasi proses permesinan.

Sejumlah penelitian terdahulu membahas pengaruh variasi parameter pemotongan dan media pendingin terhadap keausan pahat. Namun, masih diperlukan kajian eksperimental yang lebih spesifik pada material baja ST37, karena material ini banyak digunakan dalam industri konstruksi dan permesinan, serta memiliki karakteristik mekanik yang memengaruhi proses pemotongan. Penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh variasi media pendingin dan parameter pengeboran terhadap tingkat keausan mata bor HSS saat melakukan pengeboran pada baja ST37. Melalui pendekatan metode *Taguchi* dan analisis *ANOVA*, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kombinasi parameter pengeboran yang optimal untuk meminimalkan keausan mata bor, meningkatkan efisiensi proses pemesinan, dan memperpanjang umur pahat.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Bengkel Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bengkalis, Riau. Eksperimen dilakukan menggunakan mesin frais tipe Edge ZX-45 yang memiliki rentang putaran spindle 100–5000 rpm dan mampu memberikan kestabilan pemotongan yang baik. Spesifikasi lengkap mesin ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 1 Spesifikasi mesin *Frais Edge*

Spesifikasi Mesin <i>Frais Edge</i>	
1. Dimensi meja kerja	: 1500 mm x 1000 mm x 2000 mm
2. Motor spindle	: 100 - 5000 Rpm
3. Voltase	: Motor utama: 1.5 kW (2 HP) Motor penggerak meja: 0.75 kW (1 HP)
4. X,Y,Z area	: 500mm x 200mm x 400mm
5. Model Mesin	: EDGE ZX-45

Mata bor yang digunakan adalah HSS twist drill berdiameter 6 mm, sedangkan pengukuran keausan dilakukan menggunakan mikroskop USB dengan pembesaran hingga 1600×, yang memungkinkan pengukuran panjang keausan pahat (VB) secara presisi. Bahan uji berupa plat baja ST37 berukuran

26 mm × 26 mm × 20 mm, sebanyak 9 sampel, yang dibor menggunakan tiga jenis media pendingin: oli Dromus (emulsi 30% oli:70% air), air mineral, dan minyak kelapa. Ketiga media pendingin ini dipilih untuk mewakili pendingin konvensional, netral, dan ramah lingkungan, sehingga perbandingan efektivitasnya dapat dianalisis secara komprehensif.

Eksperimen dilakukan menggunakan rancangan *Taguchi orthogonal array L9 (3³)* yang melibatkan tiga faktor dengan tiga level masing-masing, yaitu kecepatan putaran (1100, 1460, dan 1860 rpm), gerak makan (0,045; 0,086; 0,142 mm/rev), dan jenis media pendingin. Klasifikasi eksperimen berdasarkan kombinasi faktor tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Klasifikasi percobaan berdasarkan media pendingin

Media Pendingin	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan Putaran (rpm)
Oli Dromus	0.045	1100
	0.086	1860
	0.142	1460
Air Mineral	0.045	1100
	0.086	1860
	0.142	1460
Minyak kelapa	0.045	1100
	0.086	1860
	0.142	1460

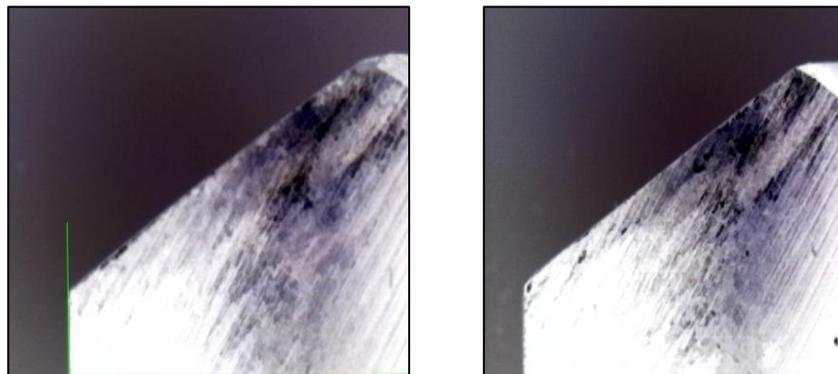
Proses pengambilan data dilakukan secara acak untuk meminimalkan bias eksperimental. Pengukuran keausan mata bor dilakukan pada kedua flute pahat dengan metode *average flank wear (VB)*. Proses pengukuran dilakukan menggunakan mikroskop USB dan perangkat lunak HiView dengan cara menarik garis dari titik awal ujung pahat hingga rata-rata bekas keausan pada bidang utama. Nilai keausan rata-rata kemudian digunakan sebagai respon utama untuk dianalisis.

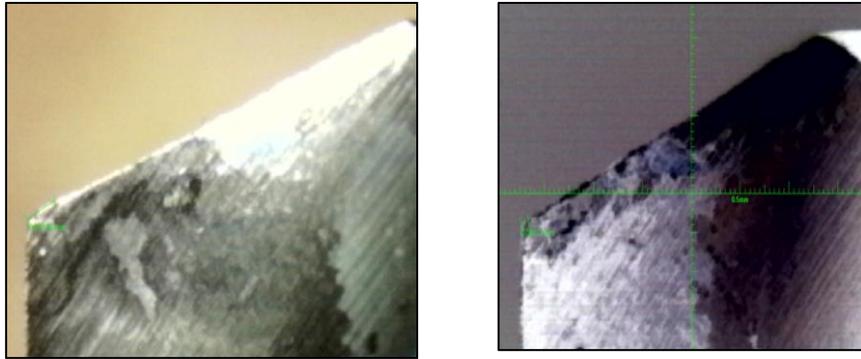
Data hasil eksperimen diolah menggunakan perangkat lunak *Minitab* berdasarkan metode Taguchi untuk memperoleh nilai *Signal-to-Noise Ratio (S/N)* dengan karakteristik *smaller-is-better*. Analisis dilanjutkan dengan *Analisis Varians (ANOVA)* untuk menentukan faktor yang paling berpengaruh signifikan terhadap tingkat keausan mata bor. Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik pada bagian Hasil dan Pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Keausan Mata Bor

Proses pengeboran pada baja ST37 menghasilkan tingkat keausan mata bor yang bervariasi sesuai kombinasi parameter pemesinan dan media pendingin yang digunakan. Pengamatan keausan dilakukan pada kedua sisi mata potong (*flute*) menggunakan mikroskop USB dengan bantuan perangkat lunak *HiView*, kemudian nilai keausan rata-rata (VB) dihitung dari panjang keausan di kedua flute. Contoh hasil pengamatan keausan sebelum dan sesudah pemesinan ditunjukkan pada gambar berikut





Gambar 1. pengukuran keausan sebelum dan sesudah pada mata bor
 (Sumber : Dokumentasi penelitian)

Nilai keausan mata bor untuk sembilan kombinasi percobaan yang dirancang menggunakan *orthogonal array L9 (3³)* ditampilkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 1. Matrik Ortogonal L9 (3³)

No	Parameter			Keausan mata bor/Vb (mm)
	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan Putaran (rpm)	Pendingin	
1	0.045	1100	Oli dromus	0.21192
2	0.045	1460	Air mineral	0.43264
3	0.045	1860	Minyak kelapa	0.27955
4	0.086	1100	Air mineral	0.33975
5	0.086	1460	Minyak kelapa	0.42025
6	0.086	1860	Oli dromus	0.37832
7	0.142	1100	Minyak kelapa	0.34170
8	0.142	1460	Oli dromus	0.44555
9	0.142	1860	Air mineral	0.48975

Dari hasil tersebut terlihat bahwa keausan terkecil terjadi pada kombinasi gerak makan 0,045 mm/rev, kecepatan putaran 1100 rpm, dan media pendingin oli Dromus, dengan nilai keausan 0,21192 mm. Sebaliknya, keausan terbesar mencapai 0,48975 mm pada kombinasi gerak makan 0,142 mm/rev, kecepatan putaran 1860 rpm, dan media pendingin air mineral. Hasil ini menunjukkan kecenderungan umum bahwa semakin besar kecepatan putar dan gerak makan, keausan mata bor meningkat. Kombinasi gerak makan rendah dan kecepatan putar rendah dengan pendingin efektif (seperti oli Dromus) mampu menekan panas dan gesekan selama pemotongan, sehingga memperlambat laju keausan. Sementara itu, kondisi pemotongan berat dengan gerak makan tinggi dan kecepatan tinggi pada media pendingin dengan kapasitas pendinginan rendah (seperti air mineral) menghasilkan keausan yang lebih cepat dan signifikan.

Pengaruh Media Pendingin dan Parameter Pengeboran

Variasi media pendingin dan parameter pengeboran menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap keausan mata bor HSS. Untuk memahami kinerja masing-masing media pendingin, hasil pengukuran keausan dikelompokkan berdasarkan jenis fluida yang digunakan. Pada media pendingin oli Dromus, keausan rata-rata mata bor tercatat paling rendah dibandingkan dua media lainnya. Nilai keausan terkecil, yaitu 0,21192 mm, diperoleh pada kombinasi gerak makan 0,045 mm/rev dan kecepatan putar 1100 rpm, sedangkan keausan tertinggi untuk media ini mencapai 0,44555 mm pada kombinasi 0,142 mm/rev dan 1460 rpm. Data selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 2. Keausan Mata Bor dengan Media Pendingin Oli Dromus

No	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan Putaran (rpm)	Keausan (mm)
1	0.045	1100	0.21192
2	0.086	1860	0.37832
3	0.142	1460	0.44555

Hasil ini membuktikan efektivitas oli Dromus dalam mengurangi panas dan gesekan selama pemotongan, sehingga memperlambat laju keausan pahat. Penggunaan **air mineral** sebagai media pendingin menghasilkan nilai keausan yang secara umum lebih tinggi. Keausan maksimum tercatat sebesar 0,48975 mm pada kombinasi gerak makan 0,142 mm/rev dan kecepatan putar 1860 rpm, yang juga merupakan keausan tertinggi dari seluruh percobaan. Keausan terendah pada media ini mencapai 0,33975 mm pada kombinasi 0,086 mm/rev dan 1100 rpm. Data lengkapnya disajikan pada tabel 5 dibawah ini.

Tabel 3. Keausan Mata Bor dengan Media Pendingin Air Mineral

No	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan Putaran (rpm)	Keausan (mm)
1	0.045	1460	0.43264
2	0.086	1100	0.33975
3	0.142	1860	0.48975

Sajian data di atas menunjukkan bahwa air mineral memiliki kemampuan pendinginan terbatas dan hampir tidak memberikan efek pelumasan, sehingga kurang efektif dalam menekan keausan mata bor terutama pada kondisi pemotongan berat. Sementara itu, minyak kelapa menunjukkan performa menengah di antara kedua media lainnya. Keausan minimum tercatat 0,27955 mm pada kombinasi 0,045 mm/rev dan 1860 rpm, sedangkan nilai maksimum mencapai 0,42025 mm pada kombinasi 0,086 mm/rev dan 1460 rpm.

Tabel 4. Keausan Mata Bor dengan Media Pendingin Minyak Kelapa

No	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan Putaran (rpm)	Keausan (mm)
1	0.045	1860	0.27955
2	0.086	1460	0.42025
3	0.142	1100	0.34170

Minyak kelapa memberikan efek pelumasan yang cukup baik dan ramah lingkungan, namun daya serap panasnya lebih rendah dibandingkan oli Dromus sehingga laju keausan tetap meningkat pada beban pemotongan yang tinggi. Untuk menilai pengaruh kuantitatif dari setiap faktor, dilakukan analisis *Signal-to-Noise (S/N) ratio* dengan karakteristik *smaller-is-better* sesuai metode Taguchi. Untuk menilai pengaruh kuantitatif dari setiap faktor yang diuji, dilakukan analisis *Signal-to-Noise (S/N) ratio* menggunakan metode Taguchi dengan karakteristik *smaller-is-better*. Karakteristik ini digunakan karena nilai keausan yang diinginkan adalah sekecil mungkin untuk memperpanjang umur pahat. Tabel dibawah menampilkan hasil perhitungan S/N ratio untuk setiap kombinasi percobaan.

Tabel 5. S/N Taguchi design

No	Parameter			Keausan (mm)	S/N Rations
	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan Putaran (rpm)	Pendingin		
1	0.045	1100	Oli dromus	0.21192	13.4766
2	0.045	1460	Air mineral	0.43264	7.2775
3	0.045	1860	Minyak kelapa	0.27955	11.0708
4	0.086	1100	Air mineral	0.33975	9.3768

5	0.086	1460	Minyak kelapa	0.42025	7.5298
6	0.086	1860	Oli dromus	0.37832	8.4428
7	0.142	1100	Minyak kelapa	0.34170	9.3271
8	0.142	1460	Oli dromus	0.44555	7.0221
9	0.142	1860	Air mineral	0.48975	6.2005

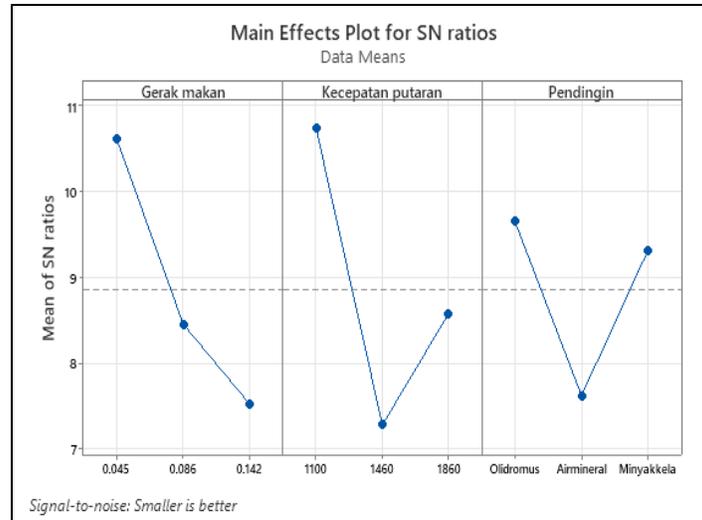
Merujuk pada tabel di atas terlihat bahwa percobaan dengan gerak makan 0,045 mm/rev, kecepatan putaran 1100 rpm, dan media pendingin oli Dromus memiliki nilai S/N tertinggi. Hal ini sejalan dengan hasil pengamatan keausan yang menunjukkan nilai terkecil pada kombinasi tersebut. Sebaliknya, percobaan dengan gerak makan 0,142 mm/rev, kecepatan putaran 1860 rpm, dan media pendingin air mineral menghasilkan S/N ratio terendah, yang menunjukkan tingkat keausan terbesar. Pola ini mengindikasikan bahwa kecepatan putaran tinggi dan gerak makan besar meningkatkan panas gesek, dan bila tidak diimbangi pendingin efektif, keausan mata bor akan cepat meningkat.

Selanjutnya, tabel berikut menyajikan respon setiap faktor terhadap nilai S/N ratio.

Tabel 6. *Respon Tabel For Signal To Noise Ratios Smaller Is Better*

Level	Gerak makan (mm/rev)	Kecepatan putaran (rpm)	Pendingin
1	10.608	10.727	9.647
2	8.450	7.276	7.618
3	7.517	8.571	9.309
Delta	3.092	3.450	2.029
Rank	2	1	3

Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran merupakan faktor yang paling dominan memengaruhi keausan mata bor, dengan delta S/N paling besar dibanding faktor lain. Gerak makan berada pada urutan kedua, sedangkan jenis media pendingin memberikan pengaruh yang relatif lebih kecil terhadap variasi keausan. Meskipun demikian, peran media pendingin tetap penting dalam menjaga kestabilan temperatur pemotongan, terutama pada kondisi gerak makan dan kecepatan tinggi. Kombinasi parameter yang tepat terbukti mampu mengurangi gesekan dan panas berlebih sehingga memperlambat laju keausan pahat. Visualisasi pengaruh masing-masing faktor ditampilkan pada grafik berikut:



Gambar 2. Grafik Dari *Signal To Noise Ratios Smaller Is Better*

Grafik respon S/N ini memperlihatkan tren yang konsisten dengan data sebelumnya, di mana kecepatan rendah (1100 rpm) dan gerak makan rendah (0,045 mm/rev) menghasilkan keausan terkecil, khususnya saat dikombinasikan dengan oli Dromus sebagai media pendingin. Perbedaan nilai S/N antar level juga mengonfirmasi bahwa peningkatan kecepatan putaran dan gerak makan akan mempercepat keausan, sementara media pendingin hanya memperlambat efek tersebut tanpa sepenuhnya meniadakannya. Analisis ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran memiliki pengaruh paling signifikan terhadap keausan, diikuti oleh gerak makan, sedangkan jenis media pendingin memberikan pengaruh paling kecil. Kombinasi yang menghasilkan keausan minimum adalah kecepatan 1100 rpm, gerak makan 0,045 mm/rev, dan media pendingin oli Dromus, yang sejalan dengan pengamatan eksperimental sebelumnya.

Analisis Statistik Lanjutan (ANOVA dan Uji Tukey)

Untuk mengetahui faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap keausan mata bor secara statistik, dilakukan *Analisis Varian (ANOVA)*. Analisis ini memungkinkan identifikasi faktor yang signifikan berdasarkan nilai *p-value* dengan taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Tabel berikut menampilkan hasil ANOVA untuk tiga faktor yang diuji: gerak makan, kecepatan putaran, dan media pendingin.

Tabel 9. *Analisis Of Varian (ANOVA)*

No	Source	Df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
1.	Gerak makan	2	0.021072	0.010536	15.92	0.059
2.	Kecepatan putaran	2	0.027941	0.013971	21.11	0.045
3.	Pendingin	2	0.011105	0.005553	8.39	0.106
4.	Eror	2	0.001324	0.000662		
5.	Total	8	0.061442			

Dari tabel ini terlihat bahwa kecepatan putaran memiliki *p-value* 0,045, yang lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran berpengaruh signifikan terhadap keausan mata bor. Sementara itu, gerak makan memiliki *p-value* 0,059 dan media pendingin 0,106, keduanya lebih besar dari 0,05 sehingga pengaruhnya terhadap keausan tidak signifikan secara statistik pada taraf 95%. Hasil ini menegaskan bahwa perubahan kecepatan putaran merupakan faktor paling kritis dalam mempercepat atau memperlambat keausan, sedangkan variasi media pendingin hanya memberikan efek sekunder.

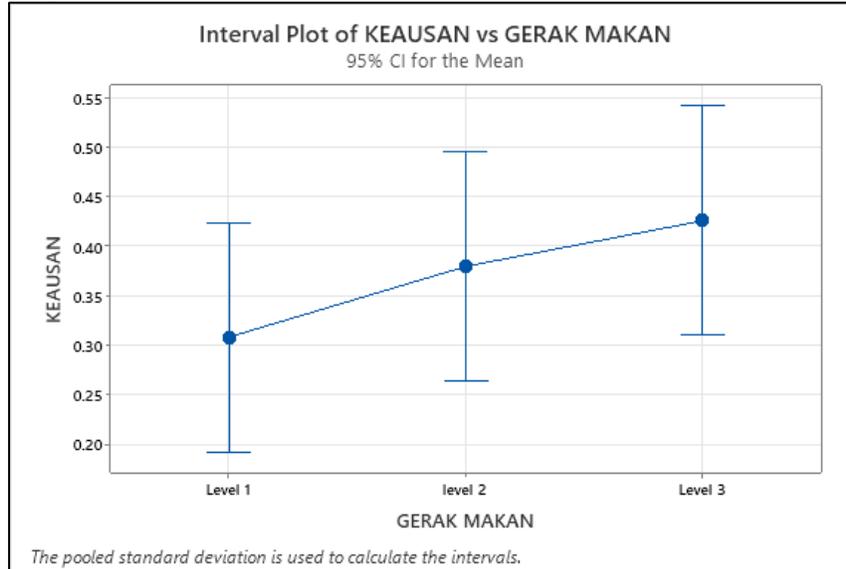
Untuk melihat lebih detail perbedaan antar level tiap faktor, dilakukan uji lanjut Tukey HSD. Uji ini membantu mengidentifikasi pasangan level yang berbeda signifikan secara statistik, yang penting untuk menentukan kombinasi optimal parameter pengeboran.

1. Uji Tukey Gerak Makan

Tabel 10. Uji Tukey Gerak makan

GERAK MAKAN (mm/rev)	Level	N	Mean	Grouping
0,142 mm/rev	3	3	0.4257	A
0,086 mm/rev	2	3	0.3794	A
0,045 mm/rev	1	3	0.3080	A

Tabel di atas menyajikan hasil uji Tukey untuk faktor gerak makan. Hasil menunjukkan bahwa gerak makan 0,045 mm/rev memiliki rata-rata keausan paling rendah (0,3080 mm), sedangkan 0,142 mm/rev menghasilkan rata-rata keausan tertinggi (0,4257 mm). Meskipun peningkatan gerak makan menyebabkan kenaikan keausan, perbedaan signifikan terutama terlihat antara level terendah dan tertinggi. Level menengah (0,086 mm/rev) berada di antara keduanya dan secara statistik tidak berbeda jauh dari kedua level lainnya. Visualisasi hasil ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. Grafik Uji Tukey Gerak Makan

Grafik memperlihatkan tren kenaikan keausan seiring peningkatan gerak makan, dengan kecenderungan paling aman pada level rendah. Hal ini menguatkan temuan sebelumnya bahwa beban potong yang lebih besar pada gerak makan tinggi mempercepat laju keausan mata bor.

2. Uji Tukey Kecepatan Putaran

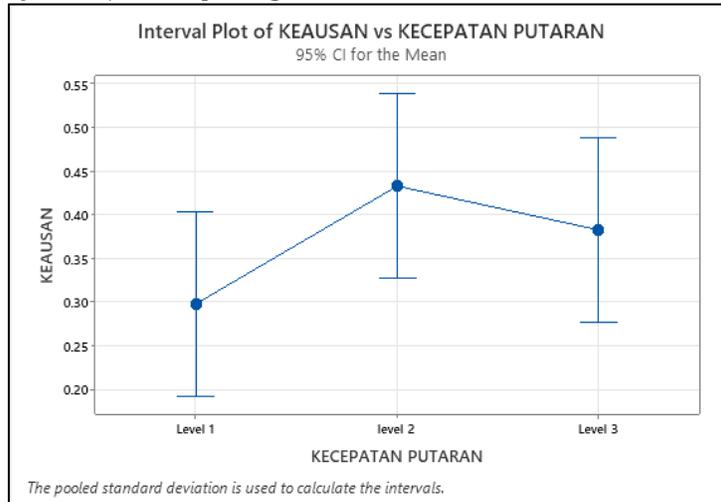
Hasil uji Tukey untuk faktor kecepatan putaran ditampilkan pada tabel 11 berikut.

Tabel 11. Uji Tukey kecepatan putaran

KECEPATAN PUTARAN (rpm)	Level	N	Mean	Grouping
1460 rpm	2	3	0.4328	A
1860 rpm	3	3	0.3825	A B
1100 rpm	1	3	0.2977	B

Dari tabel ini terlihat bahwa kecepatan 1100 rpm menghasilkan rata-rata keausan paling rendah (0,2977 mm), sementara 1460 rpm paling tinggi (0,4328 mm). Level 1860 rpm (0,3825 mm) berada

di tengah dan secara statistik tidak berbeda signifikan terhadap kedua level lainnya. Visualisasi pengelompokan Tukey ditunjukkan pada grafik berikut.



Gambar 4. Grafik Uji Tukey Kecepatan Putaran

Grafik mengonfirmasi bahwa peningkatan kecepatan dari 1100 ke 1460 rpm secara nyata meningkatkan keausan, sedangkan 1860 rpm tidak menunjukkan perbedaan signifikan dibanding kedua level lainnya. Secara praktis, ini berarti penggunaan kecepatan putaran menengah hingga tinggi perlu diimbangi dengan pendingin yang efektif agar keausan tidak cepat meningkat.

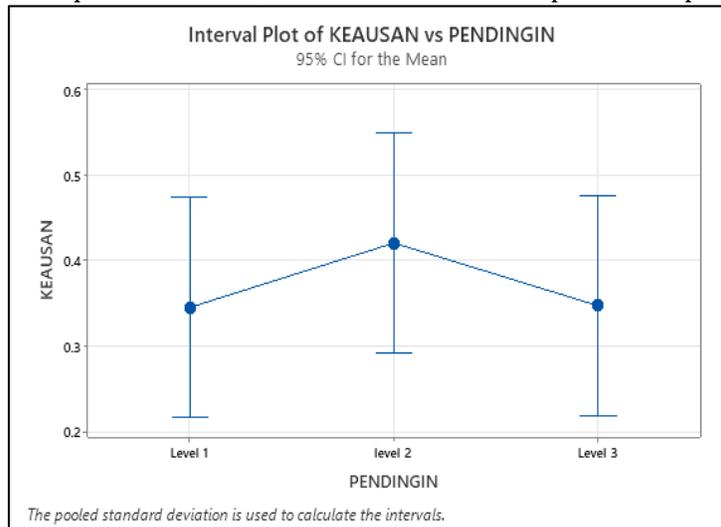
3. Uji Tukey Media Pendingin

Hasil uji Tukey untuk faktor media pendingin ditunjukkan pada sajian tabel berikut:

Tabel 12. Uji Tukey pendingin

PENDINGIN	Level	N	Mean	Grouping
Air mineral	2	3	0.420713	A
Minyak kelapa	3	3	0.347167	A
Oli dromus	1	3	0.345263	A

Secara numerik, oli Dromus memiliki rata-rata keausan paling rendah (0,3453 mm), diikuti minyak kelapa (0,3472 mm), dan air mineral tertinggi (0,4207 mm). Namun, seluruh media pendingin berada dalam kelompok huruf yang sama (A) pada hasil uji Tukey, yang berarti tidak ada perbedaan signifikan secara statistik pada taraf 95%. Visualisasi hasil ini dapat dilihat pada grafik dibawah ini.

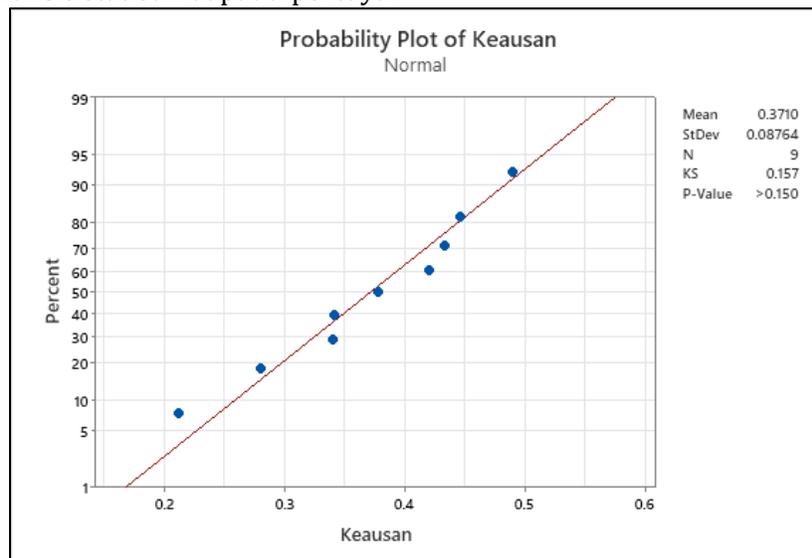


Gambar 5. Grafik Uji tukey Media pendingin

Grafik memperlihatkan bahwa meskipun perbedaan tidak signifikan secara statistik, oli Dromus dan minyak kelapa secara praktis lebih efektif menekan keausan dibanding air mineral, yang cenderung menghasilkan keausan tertinggi terutama pada kondisi pemotongan berat. Dengan hasil ANOVA dan uji Tukey ini, dapat disimpulkan bahwa kecepatan putaran adalah faktor yang paling signifikan dalam memengaruhi keausan mata bor, sedangkan gerak makan berpengaruh secara praktis namun tidak signifikan pada taraf 5%. Media pendingin memiliki pengaruh nyata secara praktis, tetapi tidak berbeda signifikan secara statistik. Temuan ini penting sebagai dasar pemilihan parameter optimal untuk meminimalkan keausan dalam proses pengeboran baja ST37.

Validasi Model dan Implikasi Hasil

Sebagai langkah akhir dalam analisis, dilakukan uji distribusi normal terhadap residual data keausan untuk memverifikasi validitas model statistik yang digunakan. Uji ini bertujuan memastikan bahwa asumsi dasar ANOVA terpenuhi, yaitu residual data berdistribusi normal, sehingga kesimpulan yang diperoleh dari analisis statistik dapat dipercaya.



Gambar 6. Uji Distribusi Normal

Sajian grafik di atas menampilkan hasil uji distribusi normal residual. Hasil uji Kolmogorov-Smirnov menunjukkan nilai statistik 0,157, yang lebih kecil dibandingkan nilai kritis tabel 0,43001 untuk $\alpha = 0,05$ dengan 9 sampel. Hal ini berarti residual data mengikuti distribusi normal, sehingga model regresi yang digunakan dalam analisis ANOVA dan Tukey valid untuk diinterpretasikan. Grafik kenormalan juga menunjukkan bahwa titik-titik residual cenderung mengikuti garis lurus tanpa adanya penyimpangan besar atau outlier yang signifikan. Validasi ini penting karena memastikan bahwa pola keausan yang diamati benar-benar mencerminkan pengaruh nyata dari variasi gerak makan, kecepatan putaran, dan media pendingin, bukan akibat fluktuasi acak atau kesalahan pengukuran. Kemudian hasil penelitian ini memberikan beberapa temuan penting terkait optimasi proses pengeboran baja ST37 menggunakan mata bor HSS:

1. **Kecepatan putaran rendah dan gerak makan rendah** secara konsisten menghasilkan keausan terkecil, yang berarti umur mata bor lebih panjang dan kualitas permukaan lebih baik.
2. **Oli Dromus** terbukti paling efektif menekan keausan, diikuti minyak kelapa, sedangkan air mineral memiliki performa terburuk. Meski uji *Tukey* menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan secara statistik, secara praktis oli Dromus memberikan hasil yang paling konsisten.
3. **Penggunaan media pendingin ramah lingkungan seperti minyak kelapa** dapat menjadi alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan dari oli industri, meskipun efektivitasnya masih sedikit di bawah oli Dromus.

4. Kombinasi optimal berdasarkan analisis *Taguchi* dan *S/N ratio* adalah **kecepatan 1100 rpm, gerak makan 0,045 mm/rev, dan oli Dromus sebagai pendingin**, yang memberikan keausan minimum 0,21192 mm.

Secara praktis, temuan ini memberikan panduan bagi industri dan bengkel teknik untuk memilih kombinasi parameter pengeboran yang efektif dalam meminimalkan keausan mata bor, meningkatkan efisiensi pemesinan, dan mempertimbangkan opsi media pendingin yang lebih ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian variasi gerak makan, kecepatan putaran, dan media pendingin terhadap keausan mata bor HSS pada proses pengeboran plat baja karbon rendah ST37 menggunakan mesin bor EDGE ZX-45, diperoleh beberapa temuan penting. Nilai keausan mata bor sangat dipengaruhi oleh kombinasi parameter pengeboran yang digunakan. Keausan terkecil sebesar 0,21192 mm dicapai pada kombinasi gerak makan 0,045 mm/rev, kecepatan putaran 1100 rpm, dan media pendingin oli Dromus, sedangkan keausan terbesar sebesar 0,48975 mm terjadi pada kombinasi gerak makan 0,142 mm/rev, kecepatan putaran 1860 rpm, dan media pendingin air mineral. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan gerak makan besar dan kecepatan putaran tinggi dengan pendingin yang kurang efektif dapat mempercepat keausan mata bor.

Kombinasi parameter terbaik untuk meminimalkan keausan adalah gerak makan rendah 0,045 mm/rev, kecepatan putaran 1100 rpm, dan oli Dromus sebagai media pendingin, yang mampu mengurangi panas dan gesekan secara optimal selama proses pemotongan. Analisis *Taguchi* melalui *Signal-to-Noise (S/N) ratio* mengonfirmasi bahwa kecepatan putaran merupakan faktor paling dominan memengaruhi keausan mata bor, dengan nilai delta tertinggi sebesar 3,450, diikuti oleh gerak makan (3,092) dan media pendingin (2,029). Hasil ini juga diperkuat oleh analisis ANOVA, yang menunjukkan bahwa kecepatan putaran memiliki pengaruh signifikan terhadap keausan mata bor ($p\text{-value } 0,045 < 0,05$), sedangkan gerak makan dan media pendingin memberikan pengaruh yang tidak signifikan secara statistik pada taraf kepercayaan 95%.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa pengaturan parameter pengeboran yang tepat, terutama kecepatan putaran rendah dan gerak makan rendah dengan media pendingin yang efektif, mampu memperpanjang umur mata bor dan meningkatkan efisiensi proses pemesinan baja ST37.

DAFTAR PUSTAKA

- Ghani, J. A., Rizal, M., & Haron, C. H. C. (2014). Performance of green machining: A comparative study of turning ductile cast iron FCD700. *Journal of Cleaner Production*, 85, 289–292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.053>
- Ibrahim, A. G., Iskandar, J., Hamni, A., & Lestari, P. M. S. (2017). Analisa keausan pahat pada pemesinan bor magnesium AZ31 menggunakan metode *Taguchi*. *Jurnal Mechanical*, 8(2), 71–78.
- Kumar, M. S., & Deivanathan, R. (2021). Effect of process parameters on drilling—An overview. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1401–1406. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.394>
- Liew, P. J. (2017). An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 380–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.029>
- Madhankumar, A., Kumar, N. D., & Kumar, L. (2016). Investigation of drilling time in SS304 (Austenitic Stainless Steel) with different cutting environments. *International Journal of Emerging Technology in Computer Science and Electronics*, 21(3), 399–403.
- Padmini, R., Krishna, P. V., & Rao, G. K. M. (2016). Effectiveness of vegetable oil-based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel. *Tribology International*, 94, 490–501. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.047>

- 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. *Jurnal Polimesin*, 17(2).
- Salimi-Yasar, H., Heris, S. Z., & Shanbedi, M. (2017). Influence of soluble oil-based TiO₂ nanofluid on heat transfer performance of cutting fluid. *Tribology International*, 112, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.021>
- Soejanto, I. (2009). *Desain eksperimen dengan metode Taguchi*. Graha Ilmu.
- Wibowo, D., & Ibrahim, G. A. (2014). Pengeboran baja ASTM A1011 menggunakan pahat high speed steel dalam kondisi dilumasi cairan minyak. *Jurnal Mechanical*, 5(2).