MODEL PREDIKSI TEMPERATUR PAHAT PADA PROSES BUBUT MELALUI ANOVA DAN REGRESI

Lailatus Sa'diyah Yuniar Arifianti, Sudirman Rizki Ariyanto, Susi Tri Umaroh, Ferly Isnomo Abdi, Mohammad R. J

Abstrak: Pada proses pembubutan, temperatur tinggi sering terjadi akibat gesekan antara pahat dan benda kerja, yang berdampak pada peningkatan keausan pahat dan penurunan kualitas hasil pemesinan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses, yaitu kecepatan putar (spindle speed), kecepatan makan (feed rate), dan kedalaman potong (depth of cut), terhadap temperatur pahat menggunakan metode analisis variansi (ANOVA) dan regresi linier berganda. Percobaan dilakukan sebanyak 16 kali berdasarkan rancangan faktorial penuh 2^3 dengan dua replikasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa feed rate dan depth of cut berpengaruh signifikan terhadap temperatur pahat, sedangkan spindle speed tidak memberikan pengaruh yang signifikan secara individual. Namun, interaksi antara faktor-faktor tersebut terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap temperatur. Model regresi linier berganda yang dikembangkan memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 93,99%, yang menunjukkan kecukupan model untuk prediksi. Temuan ini memberikan kontribusi dalam pengendalian parameter proses untuk meminimalkan temperatur pahat, memperpanjang umur pahat, serta meningkatkan efisiensi dan kualitas dalam proses pembubutan.

Kata Kunci: Pembubutan, Temperatur Pahat, Spindle Speed, Feed Rate, ANOVA, Regresi Linier.

Abstract: *In the turning process, high temperatures often occur due to friction between the tool and the workpiece, which has an impact on increasing tool wear and reducing the quality of machining results. This study aims to analyze the effect of process parameters, namely spindle speed, feed rate, and depth of cut, on tool temperature using analysis of variance (ANOVA) and multiple linear regression methods. The experiment was conducted 16 times based on a 2^3 full factorial design with two replications. The analysis showed that feed rate and depth of cut had a significant effect on tool temperature, while spindle speed did not have a significant effect individually. However, the interaction between these factors proved to have a significant effect on temperature. The developed multiple linear regression model has a coefficient of determination (R^2) value of 93.99%, which indicates the adequacy of the model for prediction. The findings contribute to the control of process parameters to minimize tool temperature, extend tool life, and improve efficiency and quality in the turning process.*

Keywords: *Turning, Tool Temperature, Spindle Speed, Feed Rate, ANOVA, Linear Regression*.

Industri manufaktur modern menuntut proses pemesinan yang tidak hanya harus akurat, tetapi juga hemat biaya dan tahan lama. Salah satu proses pemesinan yang paling umum digunakan adalah pembubutan, yaitu proses mengubah ukuran benda kerja dengan memotong material dengan bantuan alat yang bersentuhan langsung dengan benda kerja yang berputar. Lebih dari 70% proses pemesinan logam di industri ini dilakukan pada mesin bubut, yang menunjukkan dominasi proses ini di sektor manufaktur (Wang et al., 2020). Karena gesekan alat-benda kerja menghasilkan suhu panas di ujung alat dalam operasi ini, hal itu memiliki pengaruh langsung pada kinerja alat serta masa pakainya (Zhang et al., 2019). Suhu alat yang berlebihan merupakan penyebab keausan dini, deformasi termal, dan kualitas permukaan benda kerja yang terganggu. Oleh karena itu, penting untuk memahami faktor-faktor yang memengaruhi kenaikan suhu, seperti kecepatan spindel, laju umpan, dan kedalaman pemotongan,

Lailatus Sa'diyah Yuniar Arifianti, Sudirman Rizki Ariyanto, Susi Tri Umaroh, dan Ferly Isnomo Abdi adalah akademisi Universitas Negeri Surabaya.
Mohammad R. J adalah akademisi Politeknik Negeri Malang.
Email: lailatusarifianti@unesa.ac.id

sehingga proses pembubutan dapat dikontrol (Kumar & Singh, 2021). Penelitian sebelumnya terutama berfokus pada pengaruh parameter proses terhadap keausan pahat dan kekasaran permukaan, tetapi masih relatif sedikit dalam hal studi kuantitatif mengenai hubungan langsung antara suhu pahat dan parameter pemotongan (Rahman et al., 2022; Ahmed & Rehman, 2023). Untuk menjembatani kesenjangan ini, dalam penelitian ini, secara statistik dicoba untuk menganalisis pengaruh parameter pembubutan terhadap suhu pahat melalui analisis varians (ANOVA) dan teknik regresi linier berganda. Keunikan penelitian ini terletak pada penggunaan desain faktorial penuh yang digabungkan dengan pemodelan matematika berbasis regresi untuk memprediksi suhu pahat secara tepat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bertindak sebagai pedoman dalam desain proses pembubutan yang lebih terkendali, peningkatan efisiensi pemotongan, dan perpanjangan masa pakai pahat dalam aplikasi industri nyata.

Dalam upaya untuk mencapai produksi yang hemat biaya dan ramah lingkungan, metode baru seperti pembubutan kering CNC dan pendinginan kriogenik mulai mendapat perhatian serius. Studi eksperimental oleh (Oghenekohwo et al., 2024) menunjukkan bahwa penggunaan pendingin kriogenik pada suhu sekitar 0 °C memiliki penurunan suhu pahat yang luar biasa dan peningkatan masa pakai pahat selama pemesinan baja tahan karat SS304. Hal ini sesuai dengan studi teknologi mikrotekstur pahat yang dilakukan oleh (Tang et al., 2022), yang melalui simulasi dan eksperimen FEM membuktikan bahwa tekstur permukaan pahat memiliki kemampuan untuk mengubah distribusi panas dan mengurangi suhu puncak pada ujung pahat hingga 12%. Selain itu, makalah penelitian Jurnal STEAM Engineering oleh (Saravanakumar et al., 2024) menggunakan desain faktor penuh dan ANOVA untuk menjelaskan efek interaksi kedalaman pemotongan dan laju umpan pada suhu pahat dan kekasaran permukaan aluminium yang dibubut dan menekankan pentingnya analisis multiparameter dalam kontrol suhu proses. (Valizadeh Sotubadi et al., 2023) mengembangkan model AI yang dapat dijelaskan untuk memperkirakan keausan pahat dari data suhu waktu nyata dan menunjukkan bahwa pemodelan suhu yang tepat merupakan tambahan yang berguna untuk strategi pemeliharaan prediktif. Dalam karya mereka, (Ramírez Núñez et al., 2024) menerapkan termokopel tertanam untuk memantau suhu pahat secara waktu nyata dan menghubungkannya dengan kondisi pemotongan yang sebenarnya, menghadirkan teknik baru dalam pengukuran data eksperimen. Kemudian, sebuah studi oleh (Zhu et al., 2022) menyajikan tinjauan komprehensif tentang dinamika termal pahat potong dalam berbagai operasi pemesinan seperti pembubutan dan pengeboran dengan penekanan pada wawasan tentang fenomena termal.

Penerapan pembelajaran mesin dalam simulasi suhu pemotongan dan keausan pahat secara bersamaan dalam pembubutan keras AISI D6, menunjukkan garis integrasi teknologi AI dalam kontrol presisi proses manufaktur (Das et al., 2022). Metode elemen hingga untuk pemodelan suhu pahat selama proses pembubutan berbantuan ultrasonik panas, serta verifikasi eksperimental model (Airao dan Nirala, 2023). juga menunjukkan bahwa suhu pemotongan pahat bergantung secara signifikan pada sudut geometri pahat serta jenis material benda kerja (Abou El Hossein dan Kops, 2017). Literatur akademis lokal juga membenarkan relevansi studi saat ini. (Priatna, 2022) mempelajari efek variasi laju umpan pada suhu pahat dan menyarankan bahwa parameter ini memiliki dampak yang sangat signifikan pada kontrol panas selama proses pembubutan. (Minh Duc et al., 2025). meningkatkan proses pembubutan keras dengan mempertimbangkan faktor interaksi antara kecepatan pemotongan dan parameter waktu kontak pahat, yang menunjukkan bahwa pengaturan optimal diperlukan untuk mencegah panas berlebih. Melalui integrasi studi sebelumnya dan pendekatan eksperimental yang sistematis, studi

ini tidak hanya mengisi kesenjangan dalam literatur yang relatif terhadap pengaruh suhu pahat pada parameter proses, tetapi juga menawarkan model prediktif yang dapat langsung diterapkan untuk penggunaan manufaktur di kehidupan nyata. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu meningkatkan basis data bagi para insinyur manufaktur saat menetapkan parameter proses untuk mencapai efisiensi maksimum, umur panjang pahat, dan kualitas produk yang tinggi.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai studi eksperimental dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan menganalisis pengaruh parameter pembubutan terhadap temperatur pahat. Metode yang digunakan adalah Design of Experiments (DoE) dengan rancangan faktorial penuh (full factorial design), analisis variansi (ANOVA), dan pemodelan regresi linier berganda. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi pengaruh individu dari masing-masing parameter, tetapi juga interaksi antar-parameter dalam mempengaruhi temperatur yang timbul pada pahat bubut.

Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel bebas terdiri dari tiga faktor utama:

- Spindle speed (A): 190 rpm dan 460 rpm
- Feed rate (B): 0,325 mm/s dan 0,650 mm/s
- Depth of cut (C): 0,50 mm dan 0,75 mm

Ketiga parameter tersebut dipilih karena diketahui memiliki pengaruh signifikan terhadap kondisi pemotongan, termasuk suhu yang timbul akibat gesekan dan deformasi plastis selama proses pembubutan berlangsung. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah temperatur yang dihasilkan pada ujung pahat, yang akan digunakan sebagai respon dalam model statistic. Setiap faktor memiliki dua level, yaitu level rendah (-1) dan tinggi (+1). Variabel terikat atau respon dalam penelitian ini adalah temperatur pada ujung pahat, yang diukur dalam derajat Celcius.

Alat dan Bahan Penelitian

- Mesin Bubut Tradisional
  Digunakan sebagai pemotong utama dalam proses pemotongan. Pahat ini memiliki pengaturan kecepatan putar yang dapat disesuaikan dan mendukung pemotongan dengan variasi kecepatan pemakanan dan variasi kedalaman pemotongan.
- Pahat Sisipan DCMT 11
  Pahat jenis ini digunakan karena memiliki kestabilan pemotongan dan aplikasi yang luas dalam proses pembubutan logam. Pahat ini berdiameter 25 mm dan merupakan pahat karbida.
- Termokopel Digital
  Digunakan untuk mengukur temperatur pada ujung pahat selama proses pemotongan. Termokopel dipilih karena sensitif dan memiliki respon yang cepat terhadap perubahan suhu.

Prosedur Eksperimen

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap:

- Persiapan Awal
  Material dan peralatan disiapkan oleh peneliti dan kemudian dikalibrasi. Benda kerja dipasang pada chuck bubut dan pahat dipasang pada tiang pahat.
- Pelaksanaan Percobaan
  Pemotongan dilakukan sebanyak 16 kali dengan desain faktorial 2^3 dan 2 kali ulangan. Ketiga parameter (kecepatan spindel, laju umpan, dan kedalaman

pemotongan) diatur dengan mencampur sesuai dengan tabel desain faktorial. Suhu untuk setiap percobaan diukur setelah pemotongan selesai.

- Pengumpulan Data
  Pembacaan suhu juga dilakukan pada akhir proses pemotongan untuk setiap set parameter. Hasil setiap pembacaan diulang dua kali untuk meningkatkan kualitas dan validitas data.
- Pengolahan Data
- Data yang dikumpulkan dalam percobaan dirata-ratakan dan diproses dengan perangkat lunak statistik (Minitab). Prosedur yang terlibat dalam kegiatan pemrosesan adalah:
  A. Analisis Varians (ANOVA)
     Digunakan untuk memperkirakan pengaruh signifikan setiap variabel dan interaksi pada suhu pahat. Aturan pilihan didasarkan pada nilai-P ketika tingkat signifikansi adalah 5%.
  B. Model Regresi Linier Berganda
     Dibuat untuk memprediksi temperatur pahat berdasarkan campuran parameter pembubutan. Dua model dicoba: model tanpa interaksi dan model interaksi (orde dua). Pemilihan model terbaik didasarkan pada nilai R-squared (koefisien determinasi) dan hasil uji residual.
  C. Validasi Model
     Uji residual dilakukan untuk memastikan bahwa asumsi normalitas, independensi, dan homoskedastisitas residual telah terpenuhi. Plot residual, uji normalitas (normal probability plot), dan uji autokorelasi digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil percobaan diperoleh berdasarjab rancangan percobaan full factorial 23 dengan replikasi sebanyak dua kali. Proses percobaan dilakukan secara acak agar pengaruh perlakukan dapat tersebar secara homogen terhadap respon. Pengambilan data temperatur pada pahat dilakukan dengan menghitung rata-rata temperatur yang tertera pada alat. Tabel 1 menunjukkan hasil percobaan pada mesin bubut. R1 adalah replikasi 1 dan R2 adalah replikasi 4.

Tabel 1. Hasil Percobaan

No	*Engineering Unit*			*Coded factor*			**Respon: Temperatur (°C)**	
	Spindle Speed (A)	**Feed Rate (B)**	**Kedalaman Potong (C)**	**Spindle Speed (A)**	**Feed Rate (B)**	**Kedalaman Potong (C)**	**Temperatur R1 (°C)**	**Temperatur R2 (°C)**
1	190	0.325	0.50	-1	-1	-1	46.1	48.1
2	190	0.325	0.75	1	-1	-1	60.3	58.4
3	190	0.650	0.50	-1	1	-1	55.7	54.4
4	190	0.650	0.75	1	1	-1	51	52.4
5	460	0.325	0.50	-1	-1	1	62.5	60.7
6	460	0.325	0.75	1	-1	1	58.9	55.7
7	460	0.650	0.50	-1	1	1	54	50.6
8	460	0.650	0.75	1	1	1	52.1	49.8

Berdasarkan data pada Tabel 1 nilai temperatur tertinggi pada percobaan nomer 5 dan terendah pada percobaan nomer 1.

Analisa Data

Analisa data meliputi perhitungan ANOVA dan pengujian hipotesis untuk mengetahui faktor tersebut berpengaruh terhadap respon. Kemudian Analisa regresi untuk memeprediksi nilai temperatur pada pahat. Pengecekan pada kecukupan atau kesesuaian model regresi berdasarkan ANOVA dan asumsi residual.

Hasil Perhitungan ANOVA untuk Respon Temperatur

Berikut ini adalah hasil ANOVA dari minitab yang ditunjukkan pada Tabel 2. Faktor A adalah spindle speed, B adalah feed rate, dan C adalah kedalaman potong.

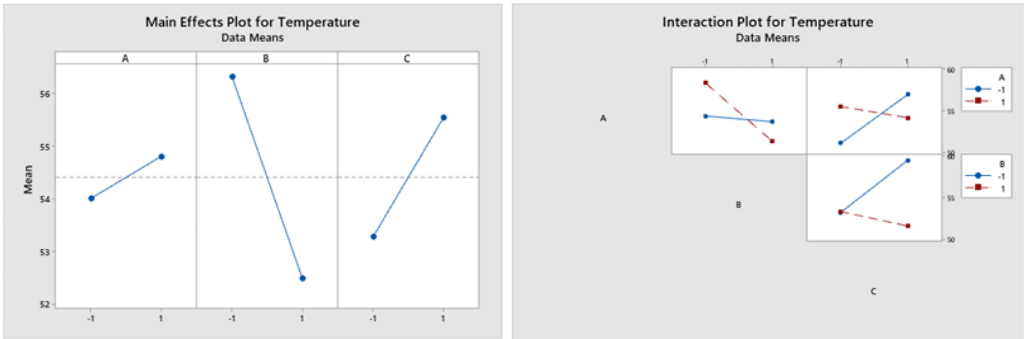
Tabel 2. ANOVA untuk Respon Temperatur Pahat

Source	DF	SS	MS	F	P
A	1	2.560	2.560	0.988	0.3494
B	1	58.943	58.943	22.736	0.0014
C	1	20.591	20.591	7.942	0.0226
A*B	1	39.841	39.841	15.368	0.0044
A*C	1	52.528	52.528	20.262	0.0020
B*C	1	63.476	63.476	24.485	0.0011
A*B*C	1	86.269	86.269	33.277	0.0004
Error	8	20.740	2.592		
Total	15	344.947			

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh masing-masing faktor terhadap temperatur pada pahat. Keputusan terhadap pengujian hipotesis berdasarkan P-value pada taraf signifikansi (α) 0.05. Kriteria H_0 gagal ditolak apabila P-value > α dan apabila P-value < α maka H_0 ditolak. Dari pengujian ANOVA ini di dapatkan hasil bahwa Faktor A (*Spindle Speed*) tidak signifikan dikarenakan P-value > α, Faktor B (*Feed Rate*) signifikan dikarenakan P-Value < α, Faktor C (Kedalaman potong) signifikan dikarenakan P-Value < α, dan untuk interaksi AB, AC, BC, dan ABC semuanya signifikan terhadap respon temperature dikarenakan P-Value < α, Dapat dikatakan bahwa dari pengujian ini, laju pemakanan dan kedalaman potong merupakan dua parameter dominan yang pengaruhnya terhadap kenaikan temperatur pahat cukup besar. Meskipun secara individual kecepatan spindel tidak terlalu berpengaruh, namun interaksi antara kecepatan spindel dengan yang lainnya memainkan peran yang penting.

Hasil Perhitungan ANOVA untuk respon temperatur

Grafik main effect dan interaction dapat digunakan untuk mempermudah dalam menginterpretasikan hasil percobaan. Berikut adalah *main effect plot* dan *interaction plot* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Main Effect Plot* dan *Interaction Plot*

Berdasarkan Gambar 1 sebelah kiri yaitu *main effect plot*, semakin tinggi nilai faktor A (*spindle speed*) dan C (*depth of cut*) maka nilai temperatur pahat akan meningkat. Nilai temperatur akan menurun ketika *feed rate* meningkat. Nilai temperatur meningkat apabila kedalaman potong juga bertambah. Sedangkan Gambar 1 sebelah kanan yaitu interaction plot, ketiga faktor memiliki interaksi karena adanya titik perpotongan pada level faktor tersebut. Serta tidak ada garis parallel yang mengindikasikan tidak adanya interaksi.

Hasil Regresi Tanpa Interaksi

Hasil dari model regresi ditunjukkan pada Tabel dibawah ini. Hasil tersebut akan digunakan untuk pengujian hipotesis untuk regresi yang dibuat sudah memiliki kecukupan model atau belum.

Tabel 3. Koeffisien Regresi

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	54.41	1.17	(51.86; 56.96)	46.50	0.000	
A	0.40	1.17	(-2.15; 2.95)	0.34	0.738	1.00
B	-1.92	1.17	(-4.47; 0.63)	-1.64	0.127	1.00
C	1.13	1.17	(-1.41; 3.68)	0.97	0.351	1.00

Tabel 4. Koefisien Determinasi

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
4.68022	23.80%	4.75%	467.295	0.00%	106.19	104.05

Tabel 5. Koeffisien Regresi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	82.094	27.365	1.25	0.335
A	1	2.560	2.560	0.12	0.738
B	1	58.943	58.943	2.69	0.127
C	1	20.591	20.591	0.94	0.351
Error	12	262.854	21.904		
Lack-of-Fit	4	242.114	60.528	23.35	0.000
Pure Error	8	20.740	2.592		
Total	15	344.947			

Pada model regresi linear didapatkan model regresi awal memiliki model regresi awal yang dirumuskan sebagai berikut:

$$T=54.41+0.40A-1.92B+1.13C$$

Dimana:
T = Temperature
A = *spindle speed*
B = *feed rate*
C = Kedalaman potong

Hasil uji ANOVA terhadap model regresi ini menunjukkan bahwa model ini memiliku R^2 sebesar 23.80%, kemudian pengujian P-value pada model regresi ini mendaparkan hasil P-value > α hal tersebut menggambarkan bahwa hasil dari regresi ini

tidak berpengaruh secara signifikan, uji *lack of fit* signifikan dikarenakan P-value < α. Hal ini menyimpulkan bahwa model ini tidak cukup baik dalam memprediksi temperatur pahat karena sebagian besar variabilitas data tidak dijelaskan oleh model.

ANOVA untuk Regresi Berganda

Hasil dari model regresi ditunjukkan pada Tabel dibawah ini. Hasil tersebut akan digunakan untuk pengujian hipotesis untuk regresi yang dibuat sudah memiliki kecukupan model atau belum.

Tabel 6. Koeffisien Regresi Berganda

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	54.408	0.403	135.17	0.000	
A	0.40	0.403	0.99	0.349	1.00
B	-1.919	0.403	-4.77	0.001	1.00
C	1.134	0.403	2.82	0.023	1.00
A*B	-1.578	0.403	-3.92	0.004	1.00
A*C	-1.812	0.403	-4.50	0.002	1.00
B*C	-1.992	0.403	-4.95	0.001	1.00
A*B*C	2.322	0.403	5.77	0.000	1.00

Tabel 7. Koefisien Determinasi Regresi Berganda

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.61011	93.99%	88.73%	75.95%

Tabel 8. ANOVA untuk Regresi Berganda

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	324.208	27.365	17.865	0.0003
A	1	2.560	2.560	0.988	0.3494
B	1	58.943	58.943	22.736	0.0014
C	1	20.591	20.591	7.942	0.0226
A*B	1	39.841	39.841	15.368	0.0044
A*C	1	52.528	52.528	20.262	0.0020
B*C	1	63.476	63.476	24.485	0.0011
A*B*C	1	86.269	86.269	33.277	0.0004
Error	8	20.740	2.592		
Total	15	344.947			

Model regresi linier berganda berikutnya memasukkan semua interaksi dua dan tiga faktor:

$$T=54.408+0.400A-1.919B+1.134C-1.578AB-1.812AC-1.992BC+2.322ABC \quad (2)$$

Dimana:
T = Temperature
A = *spindle speed*
B = *feed rate*
C = Kedalaman potong

Hasi uji ANOVA terhadap model regresi berganda ini menunjukkan bahwa model ini memiliku R^2 sebesar 93.99%, kemudian pengujian P-value pada model regresi ini mendaparkan hasil P-value < α hal tersebut menggambarkan bahwa hasil dari regresi ini berpengaruh secara signifikan, uji *lack of fit* signifikan dikarenakan P-value < α. Hal ini menyimpulkan bahwa model mampu menjelaskan hampir seluruh variabilitas data.

Selain melakukan pengujian anova pada regresi berganda perlu juga dilakukan uji residual berganda Dimana Error atau residual pada model regresi memiliki asumsi yaitu berdistribusi normal, dan independen, dengan mean 0 dan bervariansi σ2. Untuk menguji asumsi tersebut menggunakan pengujian sebagai berikut:

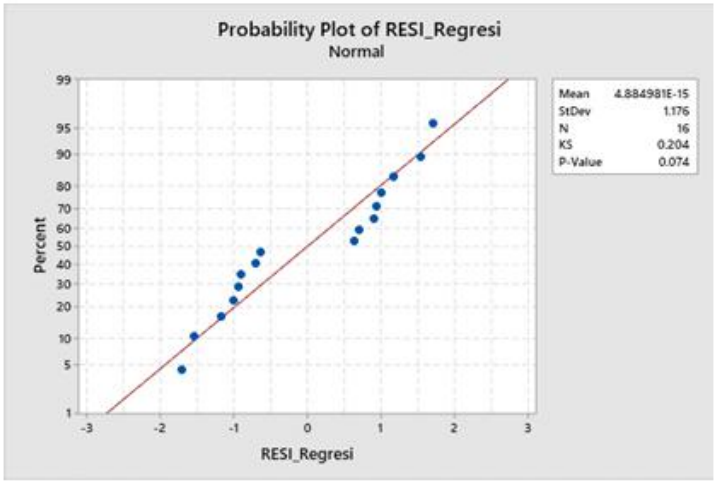
Normality Probability Plot

Normality test dilakukan untuk mengetahui apakah residual berdistribusi normal atau berdistribusi lain. Pengujian dilakukan dengan Kolmogorov-Smirnov dengan hipotesis sebagai berikut:

H_0: Residual mengikuti distribusi normal

H_1: Residual tidak mengikuti distribusi normal atau Residual berdistribusi lain

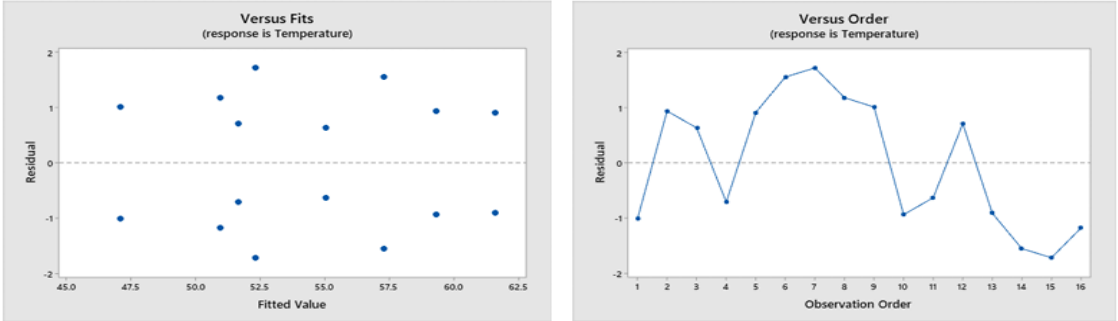
Dengan kriteria H_0 gagal ditolak apabila P-value > α, dan apabila P-value < α maka H_0 ditolak. Hasil normality test ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar tersebut diketahui bahwa P-value 0.074, maka P-value > α (0.05). Keputusan terhadap hipotesis adalah gagal tolak H_0 sehingga residual mengikuti distribusi normal.



Gambar 2. *Probability Plot for Normality Test*

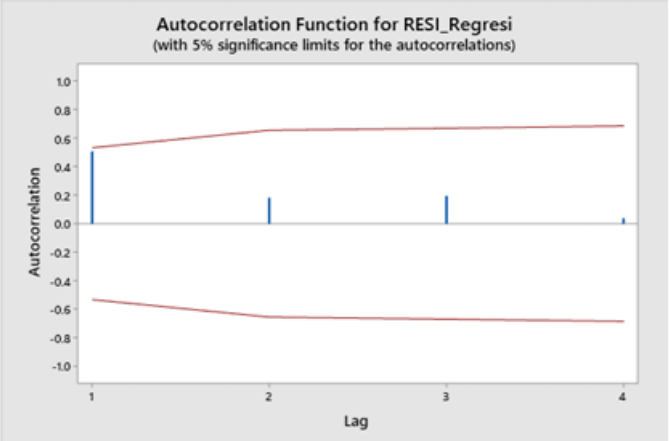
Independence* dan *Identic Assumsion

Asumsi residual independen menggunkan plot residual versus fit. Gambar 3 menunjukkan plot *residual versus fits.*



Gambar 3. *Residual Versus Fit* dan *Residual Versus Observation Order*

Berdasarkan gambar 3 terlihat data residual tersebar tanpa mengikuti pola tertentu pada rentang batas atas (1.716) dan batas bawah (-1.716). Sehingga dapat diartikan bahwa residual identik dan independen. Plot *timeseries autocorrelation* untuk mengetahui bahwa data residual tidak dipengaruhi oleh data yang lalu dan tidak mempengaruhi data yang akan datang.



Gambar 4. Plot *Autocorrelation*

Berdasarkan Gambar 4 diketahui bahwa garis biru tidak melebihi garis merah sehingga dapat dinyatakan bahwa residual independent dan tidak saling berkorelasi, hal tersebut memperkuat validitas model regresi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa suhu pahat sangat dipengaruhi oleh laju pemakanan dan kedalaman potong. Temperatur pahat turun dengan meningkatnya laju pemakanan, sementara temperatur meningkat dengan meningkatnya kedalaman potong. Hal ini menegaskan hasil Wang dkk. (2023) dalam eksperimen mereka pada AISI 5140, di mana mereka melaporkan bahwa waktu kontak pahat-benda kerja berkurang dengan meningkatkan pemakanan dan dengan demikian akumulasi panas berkurang.

Hal ini juga didukung oleh literatur internasional: Kumar dkk. (2023) dalam penelitian tentang pembubutan kering berkecepatan tinggi Inconel 800 mengakui bahwa laju pemakanan yang tinggi menurunkan temperatur secara signifikan ($p < 0,05$), dan kedalaman potong memiliki peran pendukung dalam peningkatan temperatur pada set parameter yang tinggi.

Interaksi utama (AB, AC, BC, ABC) adalah di mana efek suatu faktor dipengaruhi oleh faktor lainnya. Kecepatan pemakanan yang rendah dan kedalaman potong yang tinggi, misalnya, dapat meningkatkan akumulasi panas, tetapi ketika kecepatan pemakanan tinggi, efeknya diredam. Hal ini sejalan dengan mekanisme interaksi parameter dalam pemesinan AISI 52100 di mana interaksi kecepatan potong-laju pemakanan memiliki pengaruh non-linear terhadap temperatur dan keausan.

Model regresi linier penuh (dengan interaksi) memberikan R^2 sebesar ~94%, yang merupakan model yang sangat baik. Hal ini dibandingkan dengan model RSM (response surface methodology) pada permukaan kasar dan keausan pahat dengan R^2 >99%, tetapi dalam disiplin ilmu yang berbeda. Hal ini memvalidasi poin bahwa interaksi perlu dimasukkan dalam pemodelan untuk mendapatkan akurasi prediksi dalam disiplin ilmu termal dan mekanik.

Menurut teori usia pakai pahat Taylor, kecepatan potong merupakan variabel yang dominan, tetapi laju pemakanan dan kedalaman potong juga berpengaruh terhadap temperatur sebagai ukuran energi gesekan. Hasil penelitian Sahin dkk. (2024) menunjukkan bahwa kontrol temperatur cairan pendingin dapat memperpanjang usia

pahat, yang mengonfirmasi bahwa mengurangi akumulasi panas (misalnya melalui parameter proses) sangat penting bagi keausan dan performa pahat. Temuan Anda sejalan dengan penelitian ini: laju pemakanan dan optimasi kedalaman potong dapat menjadi metode yang tepat untuk kontrol temperatur dan umur pahat.

KESIMPULAN

Penelitian ini membahas pengaruh parameter proses pembubutan terhadap temperatur pahat pada operasi pembubutan dengan menggunakan pendekatan Design of Experiment (DoE) dan analisis statistik, yaitu ANOVA dan regresi linier berganda. Kecepatan spindel, laju pemakanan, dan kedalaman potong adalah tiga variabel utama yang dipertimbangkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari ketiga parameter tersebut, kedalaman potong dan laju pemakanan secara signifikan mempengaruhi temperatur pahat, tetapi kecepatan spindel tidak memberikan dampak apapun dengan sendirinya. Interaksi seperti antara kecepatan spindel dan laju pemakanan, dan di antara ketiganya (ABC) ditemukan memberikan kontribusi yang penting terhadap kenaikan atau penurunan suhu.

Analisis regresi juga dilakukan dalam dua langkah, yaitu tanpa interaksi dan dengan interaksi. Model tanpa interaksi memberikan hasil yang kurang baik dengan nilai R-squared yang rendah. Namun demikian, model regresi linier berganda yang menyertakan interaksi antar faktor menghasilkan nilai R-squared sebesar 93,99%, yang merupakan pertanda yang jelas bahwa model tersebut memiliki kekuatan prediksi yang sangat baik untuk suhu alat. Pengujian terhadap residual model juga memenuhi asumsi statistik utama seperti normalitas, independensi, dan tidak ada autokorelasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa pengaturan parameter pemesinan yang tepat, dan terutama laju pemakanan dan kedalaman potong, sangat penting untuk menjaga temperatur pahat. Hal ini dapat bermanfaat untuk diketahui selama proses manufaktur untuk meningkatkan efisiensi proses, memperpanjang usia pakai pahat, dan menjaga kualitas hasil pemesinan. Model regresi yang dibangun juga dapat berfungsi sebagai alat prediksi dalam kontrol proses yang lebih akurat dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

Abou-El-Hossein, K. & Kops, N. (2017). Investigation on the use of cutting temperature and tool wear in the turning of mild steel bars. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 11(4), 3038–3045.

Ahmed, R., & Rehman, A. (2023). Modeling cutting temperature under various machining conditions: A review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126(3), 1425–1437.

Airao, J. & Nirala, C. K. (2023). Finite element modeling and experimental validation of tool wear in hot-ultrasonic-assisted turning of Nimonic 90. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 11, 3687–3705.

Das, A., Das, S. R., Panda, J. P., Dey, A., & Gajrani, K. K. (2022). Machine learning based modelling and optimization in hard turning of AISI D6 steel with newly developed AlTiSiN coated carbide tool. ArXiv Preprint.

Kumar, P., & Singh, A. (2021). Analysis of cutting temperature in turning process: A review. Journal of Manufacturing Processes, 68, 674–685.

Minh Duc, P., Le Hieu Giang, L., & Nguyen, V. T. (2025). Analyzing cutting temperature in hard-turning technique with standard inserts. Applied Sciences, 15(2), 983.

Oghenekohwo, T. S., Abdulkareem, S., & Aweda, J. O. (2024). Experimental investigation of the effects of coolant temperature on cutting tool wear. Machines, 12(10), 677.

Priatna, M. A. (2022). Analisis pengaruh variasi gerak makan terhadap temperatur pahat. Institut Teknologi Kalimantan.

Rahman, M., Khan, M. A., & Al-Badour, F. (2022). Cutting temperature prediction in turning operations: A regression approach. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 179, 103917.

Ramírez-Núñez, M. A., López, J. R., & Reyes, G. (2024). Real-Time cutting temperature measurement in turning of AISI 1045 steel through an embedded thermocouple. Manufacturing, 7(1), 50.

Saravanakumar, S., Harti, J. I., Jadhav, P. R., & Vijaysekar, K. S. (2024). Comparative study on the effect of tool wear on turning mild steel and stainless steel with a ceramic tool insert using Taguchi method. Journal STEAM Engineering, 6(3), 48–59.

Tang, S., Liu, P., Wang, R., Niu, Q., Yang, G., Liu, W., & Liu, Q. (2022). Study on the cutting temperature of the textured tool by 3D FEA simulation. Mechanical Engineering Science, 1(2), 1658.

Valizadeh Sotubadi, S., Liu, R., & Neguyen, V. (2023). Explainable AI for tool wear prediction in turning. ArXiv Preprint.

Wang, H., Chen, J., & Li, Q. (2020). Optimization of cutting parameters to minimize cutting temperature and surface roughness. Procedia Manufacturing, 48, 93–100.

Zhang, Y., Zhao, W., & Zhou, H. (2019). A study on the effect of tool wear and cutting parameters on cutting temperature in turning. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 141(2), 021002.