

Optimization of Turning Process Parameters of Teflon Material for Surface Roughness Using the Taguchi Method

[Optimasi Parameter Proses Bubut Material Teflon terhadap Kekasaran Permukaan Menggunakan Metode Taguchi]

Mochammad Hafid¹⁾, Mulyadi^{*2)}

^{1),2)} Program Studi Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. *This study aims to optimize the turning process parameters of polytetrafluoroethylene (PTFE) to minimize surface roughness using the Taguchi method. The machining process was conducted on a manual lathe using a high-speed steel (HSS) cutting tool. Three process parameters were investigated, namely spindle speed at 210, 260, and 360 rpm; feed rate at 0.06, 0.10, and 0.18 mm/rev; and depth of cut at 0.20, 0.35, and 0.50 mm. The experimental design employed a Taguchi L9 orthogonal array, with each parameter combination replicated three times. Surface roughness was measured using an SRT-6210 surface roughness tester and analyzed using the signal-to-noise ratio with the smaller-the-better criterion and analysis of variance. The results showed that the optimum parameter combination was obtained at a spindle speed of 210 rpm, a feed rate of 0.18 mm/rev, and a depth of cut of 0.50 mm, producing an average surface roughness of 1.557 μm . The ANOVA results indicated that spindle speed was the most dominant and statistically significant factor, with a contribution of 92.94%, an F-value of 32.76, and a P-value of 0.030. Feed rate and depth of cut contributed 3.49% and 0.74%, respectively, and were not statistically significant. These findings demonstrate that spindle speed is the primary parameter controlling the surface quality of PTFE turned using a manual lathe and an HSS cutting tool.*

Keywords – ANOVA, HSS Cutting Tool, PTFE, Surface Roughness, Taguchi Method, Turning Process.

Abstrak. *Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter proses pembubutan material polytetrafluoroethylene (PTFE) untuk meminimalkan kekasaran permukaan menggunakan metode Taguchi. Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin bubut manual dan pahat high-speed steel (HSS). Tiga parameter proses yang diteliti meliputi kecepatan putaran spindel pada level 210, 260, dan 360 rpm; feed rate pada level 0,06, 0,10, dan 0,18 mm/rev; serta kedalaman pemotongan pada level 0,20, 0,35, dan 0,50 mm. Rancangan eksperimen menggunakan matriks ortogonal Taguchi L9 dengan setiap kombinasi parameter dilakukan sebanyak tiga kali. Kekasaran permukaan diukur menggunakan surface roughness tester SRT-6210, kemudian dianalisis menggunakan rasio signal-to-noise dengan karakteristik smaller-the-better dan analisis varians. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimum diperoleh pada kecepatan putaran spindel 210 rpm, feed rate 0,18 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,50 mm, dengan rata-rata kekasaran permukaan sebesar 1,557 μm . Hasil ANOVA menunjukkan bahwa kecepatan putaran spindel merupakan faktor paling dominan dan berpengaruh signifikan, dengan kontribusi sebesar 92,94%, F-value 32,76, dan P-value 0,030. Sementara itu, feed rate dan kedalaman pemotongan masing-masing memberikan kontribusi sebesar 3,49% dan 0,74% serta tidak berpengaruh signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran spindel merupakan parameter utama dalam mengendalikan kualitas permukaan PTFE pada pembubutan menggunakan mesin bubut manual dan pahat HSS.*

Kata Kunci – ANOVA, Pahat HSS, PTFE, Kekasaran Permukaan, Metode Taguchi, Proses Pembubutan.

I. PENDAHULUAN

Proses pembubutan merupakan salah satu proses pemesinan yang banyak digunakan untuk menghasilkan komponen berbentuk silindris dengan tingkat ketelitian dimensi dan kualitas permukaan tertentu. Pada proses ini, kualitas produk tidak hanya ditentukan oleh ketepatan dimensi, tetapi juga oleh karakteristik permukaan yang dihasilkan [1]. Kekasaran permukaan menjadi salah satu indikator penting karena berpengaruh terhadap gesekan, keausan, kemampuan penyekatan, ketahanan lelah, perpindahan panas, dan kesesuaian fungsi komponen pada saat digunakan [2]. Permukaan yang terlalu kasar dapat memperbesar gesekan, mempercepat keausan, menurunkan kemampuan komponen dalam membentuk sistem penyekatan, serta menyebabkan penyimpangan dari spesifikasi teknis yang telah ditentukan [3].

Kualitas permukaan hasil pembubutan dipengaruhi oleh interaksi yang kompleks antara parameter pemotongan, karakteristik material benda kerja, geometri dan material pahat, kekakuan sistem mesin–pahat–benda kerja, serta kondisi pemotongan [4]. Di antara berbagai faktor tersebut, kecepatan potong atau kecepatan putar spindel,

gerak pemakanan (feed rate), dan kedalaman pemotongan (depth of cut) merupakan parameter yang paling mudah dikendalikan secara langsung melalui pengaturan mesin bubut. Oleh karena itu, ketiga parameter tersebut sering digunakan sebagai variabel utama dalam optimasi proses pembubutan [5]. Pemilihan kombinasi parameter yang tidak tepat dapat menimbulkan deformasi material, getaran, pembentukan geram yang tidak stabil, peningkatan temperatur lokal, serta kerusakan permukaan benda kerja [6].

Politetrafluoroetilena atau PTFE, yang secara komersial dikenal sebagai Teflon, merupakan polimer termoplastik semi-kristalin yang memiliki koefisien gesek rendah, ketahanan kimia tinggi, sifat isolasi listrik yang baik, stabilitas termal, serta kemampuan bekerja pada lingkungan korosif [7]. Karakteristik tersebut menyebabkan PTFE banyak digunakan sebagai bahan bantalan, bushing, gasket, katup, seal, isolator listrik, komponen peralatan kimia, komponen medis, dan bagian-bagian mesin yang memerlukan sifat self-lubricating. Meskipun PTFE memiliki kemampuan pemesinan yang relatif baik dibandingkan beberapa jenis polimer lainnya, modulus elastisitasnya yang rendah, koefisien ekspansi termal yang tinggi, serta kecenderungannya mengalami deformasi elastis dan plastis menyebabkan proses pembentukan permukaan yang presisi menjadi cukup sulit [8].

Berbeda dengan material logam, material polimer dapat mengalami pelunakan, deformasi, pemulihan elastis, adhesi geram, dan perubahan bentuk akibat panas selama proses pemotongan. Kondisi tersebut dapat menghasilkan penyimpangan dimensi dan kualitas permukaan yang tidak seragam. Penelitian pada proses pengeboran PTFE menunjukkan bahwa akumulasi dan adhesi geram dapat mengganggu kontak antara mata potong dan permukaan benda kerja sehingga menghasilkan ketidakseragaman kekasaran permukaan [9]. Pada proses pembubutan, karakteristik permukaan PTFE juga dipengaruhi oleh jenis bahan pengisi, material pahat, radius ujung pahat, kecepatan potong, gerak pemakanan, dan kedalaman pemotongan [10]. Dengan demikian, parameter pembubutan yang lazim digunakan untuk material logam tidak dapat langsung diterapkan pada PTFE tanpa evaluasi eksperimental.

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menjelaskan hubungan antara parameter pemotongan dan kualitas permukaan PTFE. Fetecau dan Stan [11] meneliti pembubutan komposit PTFE menggunakan pahat polycrystalline diamond dan menemukan bahwa gaya potong dipengaruhi secara signifikan oleh gerak pemakanan, kedalaman pemotongan, serta interaksi antara keduanya. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa karakteristik permukaan PTFE sangat bergantung pada jenis bahan pengisi dan kondisi pemotongan. Ansari et al. [12] pada pembubutan PTFE yang diperkuat perunggu dan MoS_2 melaporkan bahwa perubahan parameter pemotongan memengaruhi gaya potong dan kekasaran permukaan secara langsung.

Raj et al. [13] menerapkan rancangan ortogonal Taguchi L9 dan ANOVA pada pembubutan batang PTFE. Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh kecepatan potong, gerak pemakanan, dan kedalaman pemotongan terhadap kinerja proses. Subramanian et al. juga menggunakan pendekatan ANOVA untuk mengevaluasi kekasaran permukaan pada pembubutan batang PTFE. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan bahwa metode desain eksperimen dapat digunakan untuk menentukan tingkat pengaruh parameter proses dan mengurangi jumlah percobaan dibandingkan rancangan faktorial penuh.

Sanci et al. [14] melakukan optimasi parameter pembubutan pada PTFE yang diperkuat 25% serat karbon dan 25% serat kaca. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa bahan pengisi mengubah respons material terhadap proses pemotongan sehingga kombinasi parameter optimum untuk PTFE komposit belum tentu sesuai untuk PTFE murni. Pada penelitian lain, Ramadhani et al. [23] memperoleh kekasaran permukaan PTFE terendah sebesar $3,132 \mu\text{m}$ pada kombinasi kecepatan potong yang lebih tinggi dan gerak pemakanan $0,1 \text{ mm/rev}$. Sebaliknya, kekasaran tertinggi sebesar $4,420 \mu\text{m}$ diperoleh pada gerak pemakanan $0,5 \text{ mm/rev}$. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan potong dan penurunan gerak pemakanan cenderung menghasilkan permukaan PTFE yang lebih halus.

Azzi et al. [15] melakukan pemodelan dan optimasi pembubutan PTFE dengan rancangan Taguchi L27, ANOVA, response surface methodology (RSM), artificial neural network (ANN), dan desirability function. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa gerak pemakanan memberikan kontribusi sebesar 90,02% terhadap kekasaran rata-rata R_a dan 91,81% terhadap R_z . Kombinasi parameter yang direkomendasikan untuk memperoleh kompromi antara kekasaran permukaan dan laju pembuangan material adalah kedalaman pemotongan 2 mm, gerak pemakanan $0,126 \text{ mm/rev}$, dan kecepatan potong 270 m/min . Hasil tersebut memperkuat indikasi bahwa gerak pemakanan merupakan salah satu parameter paling dominan pada pembentukan tekstur permukaan PTFE.

Meskipun penelitian mengenai pembubutan PTFE telah berkembang, hasil-hasil yang tersedia belum dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi proses. Sebagian penelitian menggunakan PTFE berpengisi karbon, serat kaca, perunggu, atau MoS_2 , sedangkan karakteristik pemotongannya berbeda dari PTFE murni. Beberapa penelitian lainnya menggunakan pendekatan RSM, ANN, algoritma genetika, atau optimasi multirespons yang memerlukan pemodelan dan jumlah data lebih kompleks. Di sisi lain, studi eksperimental pada PTFE murni masih menunjukkan perbedaan rentang kecepatan, pemakanan, kedalaman pemotongan, jenis pahat, dan kondisi mesin. Hal tersebut menyebabkan kombinasi parameter optimum dari suatu penelitian belum tentu dapat langsung diterapkan pada kondisi mesin, pahat, dan dimensi benda kerja yang berbeda [6].

Selain itu, beberapa penelitian pembubutan PTFE belum mengintegrasikan secara lengkap analisis nilai rata-rata respons, rasio S/N, ANOVA, prediksi kondisi optimum, dan eksperimen konfirmasi. Eksperimen konfirmasi diperlukan untuk membuktikan bahwa kombinasi parameter yang diperoleh dari analisis Taguchi benar-benar menghasilkan penurunan kekasaran permukaan dibandingkan kondisi awal. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut yang menggunakan rancangan Taguchi secara terstruktur untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan putar spindel, gerak pemakanan, dan kedalaman pemotongan terhadap kekasaran permukaan PTFE pada kondisi mesin dan pahat yang ditentukan [3].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter proses pembubutan material PTFE untuk meminimalkan kekasaran permukaan menggunakan metode Taguchi. Parameter kendali yang dianalisis meliputi kecepatan putar spindel, gerak pemakanan, dan kedalaman pemotongan, sedangkan respons kualitas yang digunakan adalah kekasaran rata-rata permukaan Ra. Pengolahan data dilakukan melalui analisis nilai rata-rata, rasio S/N dengan karakteristik smaller-the-better, dan ANOVA untuk menentukan tingkat signifikansi serta kontribusi setiap parameter. Kombinasi parameter optimum yang diperoleh selanjutnya perlu diverifikasi melalui eksperimen konfirmasi [11].

Kontribusi penelitian ini adalah memberikan bukti eksperimental mengenai tingkat pengaruh masing-masing parameter pembubutan terhadap kekasaran permukaan PTFE pada rentang pengujian yang digunakan, sekaligus menghasilkan rekomendasi kombinasi parameter yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kualitas permukaan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam proses pembuatan komponen PTFE, mengurangi kebutuhan percobaan berulang, menekan produk cacat, dan meningkatkan efisiensi proses pemesinan.

II. METODE

A. Perbandingan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan hasil kajian literatur, beberapa penelitian terdahulu yang relevan telah dirangkum dan dibandingkan. Ringkasan perbandingan tersebut disajikan pada **Tabel 1**. berikut:

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Material dan proses	Parameter yang dianalisis	Metode	Respons/temuan utama	Perbedaan dengan penelitian ini
1	Fetecau dan Stan [18]	Komposit PTFE; pembubutan menggunakan pahat PCD	Kecepatan potong, feed rate, kedalaman potong, radius pahat	Eksperimen dan analisis statistik	Feed rate dan kedalaman potong berpengaruh signifikan terhadap gaya potong dan kualitas permukaan	Menggunakan PTFE komposit dan menitikberatkan gaya potong serta pengaruh geometri pahat
2	Ansari et al. [19]	PTFE berpengisi perunggu dan MoS ₂	Kecepatan, pemakanan, kedalaman potong	Eksperimen	Parameter pemotongan memengaruhi gaya potong dan kekasaran permukaan	Benda kerja bukan PTFE murni dan tidak menerapkan optimasi Taguchi secara lengkap
3	Raj et al. [20]	Batang PTFE; pembubutan	Kecepatan potong, feed rate, kedalaman potong	Taguchi L9 dan ANOVA	Mengidentifikasi kombinasi parameter yang memengaruhi kinerja pembubutan PTFE	Fokus respons mencakup kinerja pemotongan/MRR, bukan khusus minimisasi Ra
4	Subramanian et al. [21]	Batang silindris PTFE	Kecepatan, pemakanan, kedalaman potong	Eksperimen dan ANOVA	Menunjukkan adanya pengaruh parameter terhadap kekasaran permukaan	Belum menekankan analisis S/N dan validasi kondisi optimum secara komprehensif
5	Sanci et al. [22]	PTFE dengan 25% karbon dan 25% serat kaca	Kecepatan potong, pemakanan, kedalaman potong	Optimasi dan pemodelan ANN	Kondisi optimum berbeda menurut jenis bahan pengisi	Material komposit memiliki sifat pemotongan berbeda dari PTFE murni
6	Ramadhani et al. [23]	PTFE murni; pembubutan konvensional	Putaran spindel dan feed rate; kedalaman potong tetap	Eksperimen	Ra terendah 3,132 μm pada kecepatan lebih tinggi dan feed 0,1 mm/rev	Kedalaman potong tidak divariasikan dan tidak menggunakan metode Taguchi

7	Azzi et al. [24]	PTFE murni; pembubutan	Kecepatan potong, feed rate, kedalaman potong	Taguchi L27, ANOVA, RSM, ANN, dan DF	Feed rate berkontribusi 90,02% terhadap Ra; dilakukan optimasi kualitas dan produktivitas	Menggunakan pemodelan dan optimasi multirespons yang lebih kompleks; penelitian ini difokuskan pada Ra
8	Ni et al. [25]	PTFE murni; pembubutan	Kondisi pemotongan	Analisis kemampuan pemesinan	Parameter memengaruhi MRR, energi pemotongan, dan mekanisme pembentukan geram	Tidak berfokus pada optimasi kekasaran menggunakan Taguchi
9	Ying et al. [26]	PTFE; proses pemotongan	Parameter pemotongan	Eksperimen mekanisme pemotongan	Parameter memengaruhi gaya, geram, stabilitas, dan kualitas pemesinan	Berorientasi pada karakteristik mekanisme pemotongan, bukan rancangan parameter optimum
10	Nalbant et al. [27]	Baja AISI 1030; pembubutan	Radius pahat, feed rate, kedalaman potong	Taguchi dan ANOVA	Radius pahat dan feed rate merupakan faktor dominan terhadap Ra	Material logam; digunakan sebagai dasar metodologis Taguchi

B. Posisi dan Kebaruan Penelitian

Berdasarkan hasil review terhadap jurnal-jurnal yang relevan, dilakukan analisis perbandingan untuk menentukan posisi dan kebaruan penelitian hasilnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan optimasi yang difokuskan pada kekasaran permukaan PTFE murni, bukan PTFE yang diperkuat serat, karbon, perunggu, atau bahan pengisi lainnya.
2. Mengevaluasi secara simultan pengaruh kecepatan putar spindel, gerak pemakanan, dan kedalaman pemotongan pada kondisi mesin, pahat, dan rentang parameter aktual penelitian.
3. Mengintegrasikan analisis rata-rata respons, rasio S/N smaller-the-better, ANOVA, prediksi respons optimum, dan eksperimen konfirmasi.
4. Menghasilkan rekomendasi praktis parameter pembubutan PTFE yang lebih sederhana untuk diterapkan dibandingkan pendekatan berbasis ANN, algoritma genetika, atau optimasi multirespons.
5. Menyediakan nilai kontribusi kuantitatif setiap parameter terhadap variasi kekasaran permukaan PTFE.

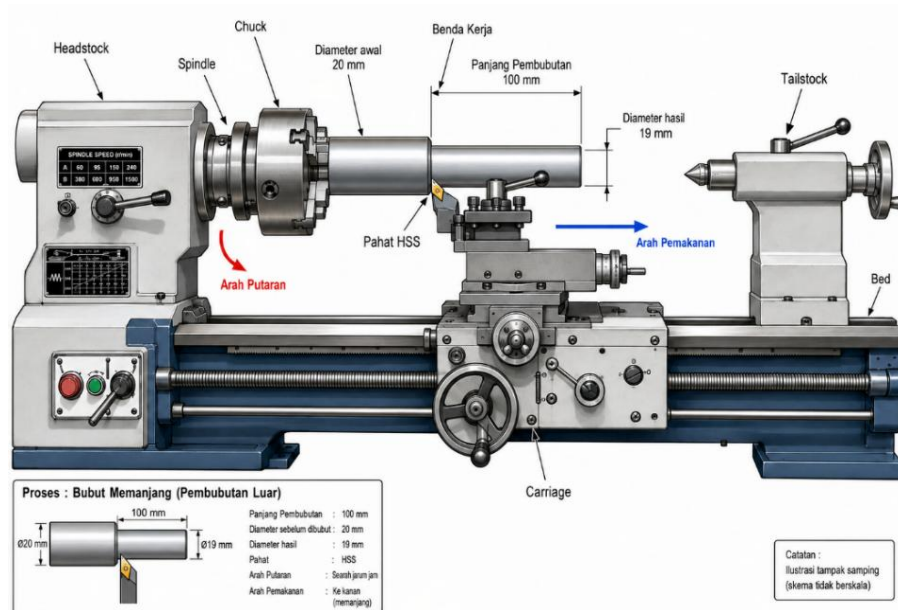
C. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis dan mengoptimalkan pengaruh parameter proses pembubutan terhadap kekasaran permukaan material polytetrafluoroethylene (PTFE). Metode Taguchi dipilih karena mampu mengevaluasi beberapa faktor proses secara simultan dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit dibandingkan rancangan faktorial penuh. Metode ini menggunakan matriks ortogonal (orthogonal array/OA) sehingga pengaruh setiap faktor dapat dianalisis secara sistematis dan efisien.

Variabel bebas dalam penelitian ini terdiri atas kecepatan putar spindel, gerak pemakanan (*feed rate*), dan kedalaman pemotongan (*depth of cut*). Setiap faktor ditetapkan pada tiga level. Variabel respons yang diamati adalah kekasaran rata-rata permukaan (Ra) hasil pembubutan. Optimasi dilakukan menggunakan rasio signal-to-noise (S/N) dengan karakteristik kualitas *smaller-the-better* karena tujuan penelitian adalah meminimalkan nilai kekasaran permukaan.

D. Material, Mesin, Pahat, dan Alat Ukur

Material benda kerja yang digunakan adalah polytetrafluoroethylene (PTFE), yang secara komersial dikenal sebagai Teflon. Material ini dipilih karena banyak digunakan pada komponen teknik seperti bushing, gasket, seal, bantalan, isolator listrik, dan komponen yang bekerja pada lingkungan korosif. PTFE memiliki koefisien gesek rendah dan ketahanan kimia yang baik, tetapi modulus elastisitasnya relatif rendah dan materialnya mudah mengalami deformasi selama proses pemotongan. Oleh sebab itu, pengaturan parameter pembubutan perlu dilakukan secara tepat agar diperoleh kualitas permukaan yang baik.



Gambar 1. Skema proses pembubutan

Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin bubut manual dengan pahat bubut high-speed steel (HSS). Kekasaran permukaan hasil pembubutan diukur menggunakan surface roughness tester SRT-6210. Selama pengujian, jenis material, geometri pahat, posisi pemasangan pahat, panjang penjurukan pahat, panjang pemotongan, dan metode pengukuran dipertahankan tetap untuk mengurangi pengaruh variabel yang tidak diteliti.

E. Faktor dan Level Eksperimen

Tiga faktor proses yang digunakan adalah kecepatan putar spindel, feed rate, dan kedalaman pemotongan. Masing-masing faktor memiliki tiga level sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Faktor dan level Parameter Pembubutan

Kode	Faktor Proses	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
A	Kecepatan putar spindel (N)	rpm	210	260	360
B	Feed rate (F)	mm/rev	0,06	0,10	0,18
C	Kedalaman pemotongan (Ap)	mm	0,20	0,35	0,50

Nilai 210, 260, dan 360 dinyatakan dalam rpm sehingga secara teknis disebut kecepatan putar spindel, bukan kecepatan potong. Apabila kecepatan potong dinyatakan dalam m/min, nilainya dihitung berdasarkan diameter benda kerja menggunakan persamaan berikut:

$$V_c = \frac{\pi D N}{1000}$$

Dengan V_c adalah kecepatan potong (m/min), D adalah diameter benda kerja (mm), dan N adalah kecepatan putar spindel (rpm).

F. Rancangan Eksperimen Taguchi L9

Rancangan eksperimen menggunakan matriks ortogonal Taguchi L9 (3^3). Rancangan tersebut sesuai untuk tiga faktor yang masing-masing memiliki tiga level. Penggunaan OA L9 mengurangi jumlah kombinasi eksperimen dari 27 percobaan pada rancangan faktorial penuh menjadi sembilan percobaan. Susunan kombinasi parameter ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Matriks Ortogonal Taguchi L9

No. eksperimen	Kecepatan putar spindel (rpm)	Feedrate (mm/rev)	Kedalaman pemotongan (mm)	Kekasaran permukaan (Ra)		
1	210	0,06	0,20	-	-	-
2	210	0,10	0,35	-	-	-
3	210	0,18	0,50	-	-	-
4	260	0,06	0,35	-	-	-
5	260	0,10	0,50	-	-	-
6	260	0,18	0,20	-	-	-
7	360	0,06	0,50	-	-	-
8	360	0,10	0,20	-	-	-
9	360	0,18	0,35	-	-	-

Urutan pelaksanaan sembilan eksperimen dianjurkan dilakukan secara acak untuk mengurangi pengaruh faktor gangguan, seperti perubahan temperatur lingkungan, kondisi mesin, dan perubahan ketajaman pahat. Setiap kombinasi eksperimen sebaiknya direplikasi minimal tiga kali atau setiap spesimen diukur pada minimal tiga posisi agar variasi lokal permukaan dapat terwakili dalam perhitungan nilai rata-rata dan rasio S/N.

G. Prosedur Eksperimen

1. Benda kerja PTFE dipersiapkan dengan diameter dan panjang yang seragam, kemudian permukaannya dibersihkan dari debu dan kotoran.
2. Pahat HSS diasah menggunakan geometri yang sama dan dipasang pada tool post dengan ujung pahat sejajar terhadap sumbu pusat benda kerja.
3. Benda kerja dipasang pada cekam mesin bubut dan diperiksa kesentrisannya sebelum proses pemotongan.
4. Kecepatan putar spindel, feed rate, dan kedalaman pemotongan diatur sesuai kombinasi pada matriks ortogonal Taguchi L9.
5. Proses pembubutan dilakukan pada panjang pemotongan yang sama untuk setiap eksperimen dan menggunakan kondisi pemotongan yang konsisten.
6. Setelah pembubutan selesai, permukaan benda kerja dibersihkan dari geram tanpa merusak tekstur permukaan.
7. Kekasaran permukaan diukur menggunakan SRT-6210 pada beberapa posisi sepanjang permukaan hasil pembubutan.
8. Data kekasaran dianalisis menggunakan nilai rata-rata, rasio S/N smaller-the-better, respons level faktor, dan analisis varians (ANOVA).
9. Kombinasi parameter optimum diverifikasi melalui eksperimen konfirmasi.

H. Pengukuran Kekasaran Permukaan

Respons penelitian adalah kekasaran rata-rata permukaan (Ra) dalam satuan mikrometer. Pengukuran dilakukan menggunakan SRT-6210 dengan arah lintasan stylus sejajar sumbu benda kerja atau tegak lurus terhadap arah utama bekas pemakanan. Untuk mengurangi pengaruh variasi lokal permukaan, pengukuran dilakukan pada beberapa posisi yang berbeda pada setiap spesimen. Nilai rata-rata kekasaran dihitung menggunakan persamaan:

$$\bar{R}_a = \frac{\sum_{i=1}^n Ra_i}{n}$$

Dengan $\bar{R}_a$ adalah rata-rata kekasaran permukaan (μm), R_{a_i} adalah hasil pengukuran ke-i (μm), dan n adalah jumlah pengukuran.

I. Analisis Rasio *Signal-to-Noise*

Metode Taguchi menggunakan rasio *signal-to-noise* (S/N) untuk mengevaluasi nilai respons sekaligus ketahanannya terhadap variasi yang tidak diinginkan. Karena tujuan penelitian adalah meminimalkan kekasaran permukaan, karakteristik kualitas yang digunakan adalah *smaller-the-better*. Rasio S/N dihitung menggunakan persamaan:

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

dengan S/N adalah *rasio signal-to-noise (dB)*, n adalah jumlah pengulangan atau jumlah hasil pengukuran, dan y_i adalah nilai kekasaran permukaan pada pengukuran ke- i (μm).

Apabila setiap kombinasi eksperimen hanya memiliki satu nilai respons ($n = 1$), persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$S/N = -10 \log_{10}(y^2)$$

Pada karakteristik *smaller-the-better*, kombinasi parameter optimum dipilih berdasarkan nilai rasio S/N yang paling tinggi. Nilai S/N yang lebih tinggi menunjukkan nilai kekasaran yang lebih rendah dan respons yang lebih tahan terhadap variasi gangguan. Pengaruh relatif suatu faktor dapat ditentukan melalui nilai delta, yaitu selisih antara rata-rata S/N tertinggi dan terendah pada faktor tersebut:

$$\Delta_j = (\overline{S/N})_{\max,j} - (\overline{S/N})_{\min,j}$$

Faktor dengan nilai delta terbesar ditempatkan pada peringkat tertinggi karena memberikan perubahan respons paling besar pada rentang level yang diuji.

J. Analisis Varians

Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk menentukan signifikansi statistik dan persentase kontribusi kecepatan putar spindel, feed rate, dan kedalaman pemotongan terhadap variasi kekasaran permukaan. Analisis dapat dilakukan terhadap nilai kekasaran rata-rata dan/atau rasio S/N. Jumlah kuadrat total dihitung menggunakan persamaan:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

Jumlah kuadrat faktor ke- j dihitung berdasarkan penyimpangan rata-rata respons pada setiap level terhadap rata-rata keseluruhan:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N}$$

Nilai mean square dan statistik F dihitung menggunakan:

$$MS = \frac{SS}{df}$$

$$MS = \frac{MS_{faktor}}{MS_{error}}$$

Faktor dinyatakan berpengaruh signifikan apabila p-value lebih kecil dari taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Persentase kontribusi masing-masing faktor dihitung menggunakan:

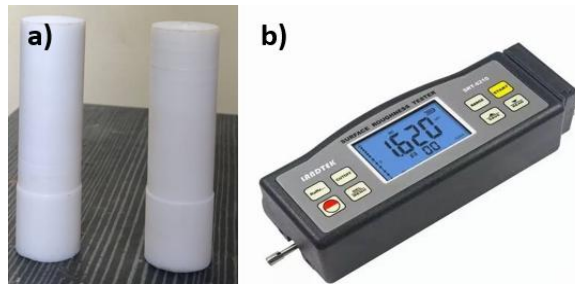
$$PC_i = \frac{SS_i}{SS_T} \times 100\%$$

Faktor dengan persentase kontribusi terbesar dinyatakan sebagai parameter paling dominan terhadap kekasaran permukaan PTFE pada rentang eksperimen yang digunakan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Proses Bubut dan Pengukuran Kekasaran

Gambar (a) menunjukkan spesimen PTFE setelah melalui proses bubut memanjang menggunakan mesin bubut manual dan pahat HSS, sehingga terbentuk bagian bertingkat dengan diameter hasil pembubutan yang lebih kecil dibandingkan diameter awal benda kerja. Permukaan hasil pembubutan selanjutnya diuji menggunakan alat ukur kekasaran permukaan digital SRT-6210 seperti ditunjukkan pada Gambar (b). Alat tersebut digunakan untuk mengukur nilai kekasaran rata-rata permukaan, Ra, dalam satuan mikrometer (μm) dengan cara menempatkan stylus pada permukaan spesimen hasil bubut. Nilai yang diperoleh kemudian digunakan sebagai respons utama dalam analisis Taguchi dan ANOVA untuk menentukan pengaruh kecepatan putar spindle, feed rate, dan kedalaman pemotongan terhadap kualitas permukaan PTFE.



Gambar 2. a). Hasil Proses Bubut b). Alat Ukur Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada sembilan kombinasi parameter proses pembubutan yang terdiri atas kecepatan putaran spindle, feed rate, dan kedalaman pemotongan pada **Tabel 4**. Pada setiap kombinasi parameter, proses pembubutan dilakukan sebanyak tiga kali sehingga diperoleh tiga spesimen atau tiga hasil pengulangan, yaitu Ra-1, Ra-2, dan Ra-3. Nilai kekasaran permukaan masing-masing hasil pembubutan kemudian diukur menggunakan alat ukur kekasaran permukaan dalam satuan mikrometer (μm). Hasil pengukuran menunjukkan adanya variasi nilai kekasaran pada setiap pengulangan, dengan rentang keseluruhan antara 0,771 μm hingga 8,374 μm . Nilai kekasaran individu terendah sebesar 0,771 μm diperoleh pada kombinasi kecepatan spindle 260 rpm, feed rate 0,18 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,20 mm, sedangkan nilai tertinggi sebesar 8,374 μm diperoleh pada kombinasi 260 rpm, feed rate 0,10 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,50 mm. Berdasarkan nilai rata-rata dari tiga pengulangan, kekasaran permukaan terendah sebesar 1,557 μm diperoleh pada kombinasi 210 rpm, feed rate 0,18 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,50 mm. Sementara itu, nilai rata-rata kekasaran tertinggi sebesar 4,694 μm diperoleh pada kombinasi 360 rpm, feed rate 0,10 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,20 mm. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa perubahan kombinasi parameter pembubutan memberikan pengaruh terhadap kualitas permukaan PTFE. Variasi yang cukup besar pada beberapa pengulangan juga menunjukkan adanya faktor lain yang mungkin memengaruhi proses, seperti ketajaman dan geometri pahat HSS, kestabilan penjepitan benda kerja, getaran mesin, deformasi elastis PTFE, serta konsistensi posisi pengukuran. Nilai dari ketiga pengulangan selanjutnya digunakan untuk menghitung rata-rata kekasaran dan rasio signal-to-noise dengan karakteristik smaller-the-better dalam analisis Taguchi dan ANOVA.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kekasaran (Ra)

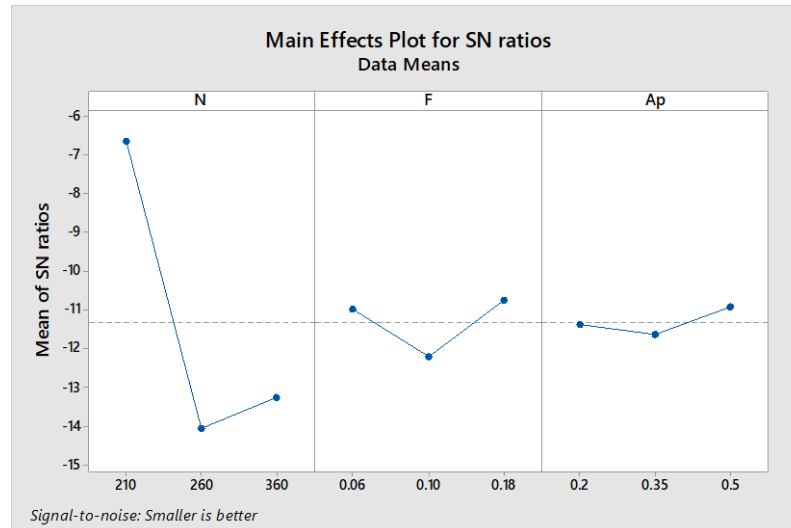
No. Spc	Kecepatan putar spindle (rpm)	Feed rate (mm/rev)	Kedalaman pemotongan (mm)	Kekasaran permukaan (Ra)			Rata-rata (Ra)	S/N Ratios
1	210	0,06	0,20	0,98	0,967	3,338	1,761667	-6,3808
2	210	0,10	0,35	0,931	0,985	4,447	2,121	-8,5759
3	210	0,18	0,50	0,918	0,993	2,76	1,557	-4,9814
4	260	0,06	0,35	7,314	1,047	3,119	3,826667	-13,3122
5	260	0,10	0,50	8,374	0,802	3,939	4,371667	-14,5880
6	260	0,18	0,20	8,032	0,771	3,886	4,229667	-14,2710
7	360	0,06	0,50	3,779	5,17	4,706	4,551667	-13,2329
8	360	0,10	0,20	3,743	5,17	5,17	4,694333	-13,5198
9	360	0,18	0,35	3,833	4,849	4,742	4,474667	-13,0600

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

B. Analisis Varians (*Analysis of Variance/ANOVA*)

Grafik *Main Effects Plot for S/N Ratios* pada **Gambar 3.** menunjukkan pengaruh rata-rata setiap parameter proses terhadap kekasaran permukaan PTFE. Analisis menggunakan karakteristik *smaller-the-better*, sehingga level parameter yang memiliki nilai rasio S/N paling tinggi atau paling mendekati nol dipilih sebagai kondisi optimum karena merepresentasikan nilai kekasaran yang lebih rendah dan respons yang lebih stabil.



Gambar 3. Grafik Plot SN Ratios Data Means

Pada faktor **kecepatan putaran spindle (N)**, nilai rasio S/N tertinggi diperoleh pada level **210 rpm**, yaitu sekitar $-6,7$ dB. Ketika putaran dinaikkan menjadi 260 rpm, nilai rasio S/N turun tajam hingga sekitar $-14,1$ dB, kemudian sedikit meningkat pada 360 rpm menjadi sekitar $-13,3$ dB. Perubahan yang sangat besar ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran spindle merupakan faktor yang paling dominan memengaruhi kekasaran permukaan. Dalam rentang pengujian ini, putaran 210 rpm memberikan hasil permukaan yang lebih baik dibandingkan 260 dan 360 rpm.

Pada faktor **feed rate (F)**, rasio S/N pada level 0,06 mm/rev berada di sekitar $-11,0$ dB, kemudian menurun pada level 0,10 mm/rev menjadi sekitar $-12,2$ dB, dan meningkat kembali pada level 0,18 mm/rev menjadi sekitar $-10,8$ dB. Oleh karena itu, level optimum berdasarkan rasio S/N adalah **feed rate 0,18 mm/rev**. Meskipun secara teori peningkatan feed rate sering meningkatkan kekasaran permukaan, hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik PTFE yang lunak dan mudah mengalami deformasi, kestabilan pemotongan, pembentukan geram, ketajaman pahat HSS, serta interaksi antara feed rate dengan kecepatan spindle dan kedalaman pemotongan.

Pada faktor **kedalaman pemotongan (Ap)**, nilai rasio S/N pada level 0,20 mm sekitar $-11,4$ dB, kemudian sedikit menurun pada level 0,35 mm menjadi sekitar $-11,6$ dB, dan meningkat pada level 0,50 mm menjadi sekitar $-10,9$ dB. Dengan demikian, kedalaman pemotongan yang memberikan nilai rasio S/N terbaik adalah **0,50 mm**. Namun, perubahan garis pada faktor kedalaman pemotongan relatif kecil, sehingga pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan lebih rendah dibandingkan pengaruh kecepatan spindle dan feed rate.

Berdasarkan kemiringan garis dan selisih nilai rasio S/N antarlevel, urutan pengaruh parameter terhadap kekasaran permukaan adalah:

1. **Kecepatan putaran spindle**, sebagai faktor paling dominan.
2. **Feed rate**, sebagai faktor dengan pengaruh menengah.
3. **Kedalaman pemotongan**, sebagai faktor dengan pengaruh paling kecil.

Kombinasi parameter optimum berdasarkan grafik rasio S/N adalah:

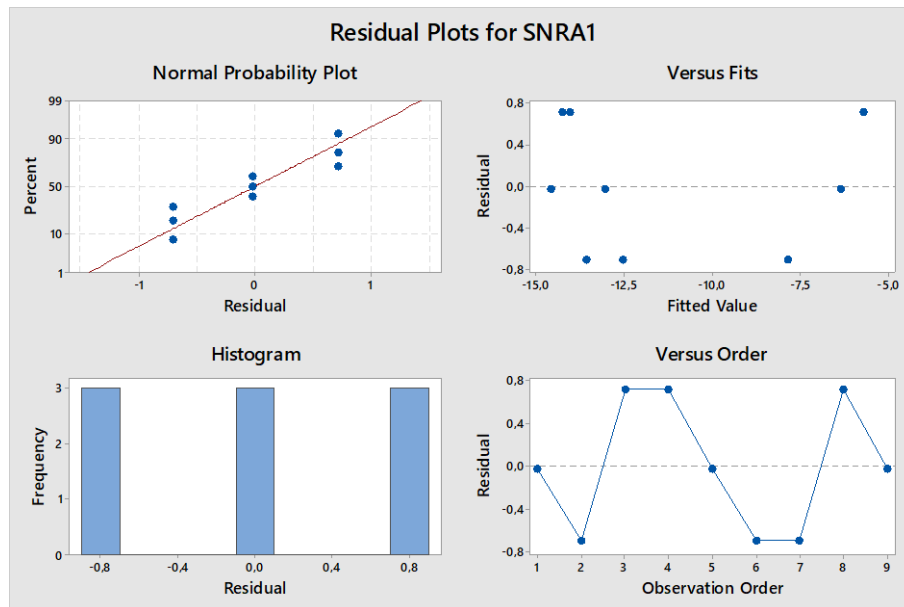
- kecepatan putaran spindle: **210 rpm**;
- feed rate: **0,18 mm/rev**; dan
- kedalaman pemotongan: **0,50 mm**.

Kombinasi tersebut identik dengan percobaan ketiga dalam matriks Taguchi dan menghasilkan rata-rata kekasaran sekitar **1,557 μm** . Meskipun demikian, kondisi optimum dari grafik efek utama perlu diperkuat melalui hasil ANOVA dan eksperimen konfirmasi. Hal ini penting karena grafik efek utama hanya menunjukkan pengaruh

rata-rata masing-masing faktor dan belum menjelaskan signifikansi statistik maupun kemungkinan interaksi antarparameter.

C. Analisis Varians (*General Linier Model*)

Berdasarkan residual plots dari analisis ANOVA menggunakan *General Linear Model* pada **Gambar 4**, model yang digunakan secara umum menunjukkan kecocokan yang cukup baik.



Gambar 4. Grafik Plot Anova General Linier Model

Pada normal probability plot, titik-titik residual berada relatif dekat dengan garis lurus, sehingga residual dapat dianggap mendekati distribusi normal. Grafik residual versus fits memperlihatkan penyebaran residual yang relatif acak di sekitar garis nol dan tidak membentuk pola tertentu, yang menunjukkan bahwa varians residual cenderung konstan. Grafik residual versus order juga tidak menunjukkan kecenderungan naik, turun, atau pola berurutan yang sistematis, sehingga residual dapat dianggap saling independen. Dengan demikian, asumsi dasar ANOVA berupa normalitas, homogenitas varians, dan independensi residual secara umum telah terpenuhi. Namun, karena jumlah eksperimen hanya sembilan, interpretasi perlu dilakukan secara hati-hati dan kesimpulan mengenai parameter yang signifikan tetap harus didasarkan pada nilai F-value dan p-value pada tabel ANOVA.

Tabel 5. Hasil ANOVA Rasio S/N Kekasaran Permukaan

Sumber variasi	DF	Seq SS	Kontribusi (%)	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value	Interpretasi
Kecepatan putaran spindel, N	2	99,430	92,94	99,4301	49,7151	32,76	0,030	Berpengaruh signifikan
Feed rate, F	2	3,734	3,49	3,7338	1,8669	1,23	0,448	Tidak signifikan
Kedalaman pemotongan, Ap	2	0,787	0,74	0,7869	0,3934	0,26	0,794	Tidak signifikan
Galat (error)	2	3,035	2,84	3,0353	1,5176	—	—	Variasi yang tidak dijelaskan model
Total	8	106,986	100,00	—	—	—	—	—

Hasil analisis varians pada **Tabel 5**, menunjukkan bahwa kecepatan putaran spindel merupakan faktor yang berpengaruh signifikan terhadap rasio S/N kekasaran permukaan PTFE. Faktor tersebut menghasilkan F-value sebesar 32,76 dan P-value sebesar 0,030, lebih kecil daripada taraf signifikansi 0,05. Kecepatan putaran spindel memberikan kontribusi sebesar 92,94% terhadap total variasi respons, sehingga menjadi faktor paling dominan dalam menentukan kualitas permukaan hasil pembubutan. Sementara itu, *feed rate* menghasilkan kontribusi sebesar 3,49%, F-value sebesar 1,23, dan P-value sebesar 0,448, sehingga pengaruhnya tidak signifikan secara statistik. Kedalaman pemotongan juga tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan, dengan kontribusi sebesar 0,74%, F-value sebesar 0,26, dan P-value sebesar 0,794. Komponen galat memberikan kontribusi sebesar 2,84%, yang menunjukkan bahwa

sebagian kecil variasi respons berasal dari faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model. Berdasarkan hasil tersebut, urutan pengaruh parameter terhadap kekasaran permukaan adalah kecepatan putaran spindel, *feed rate*, dan kedalaman pemotongan. Kombinasi parameter yang menghasilkan rasio S/N tertinggi adalah kecepatan spindel 210 rpm, *feed rate* 0,18 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,50 mm.

D. Pembahasan

Hasil analisis Taguchi menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimum untuk memperoleh kekasaran permukaan PTFE yang rendah adalah kecepatan putaran spindel **210 rpm**, *feed rate* **0,18 mm/rev**, dan kedalaman pemotongan **0,50 mm**. Kombinasi tersebut menghasilkan rata-rata kekasaran sebesar **1,557 μm** . Berdasarkan ANOVA, kecepatan putaran spindel menjadi faktor paling dominan dengan kontribusi **92,94%**, F-value 32,76, dan P-value 0,030. Sementara itu, *feed rate* dan kedalaman pemotongan masing-masing hanya memberikan kontribusi 3,49% dan 0,74%, serta tidak signifikan secara statistik.

Dominannya pengaruh kecepatan spindel dapat dikaitkan dengan karakteristik PTFE yang memiliki modulus elastisitas rendah, mudah mengalami deformasi, dan sensitif terhadap kenaikan temperatur pemotongan. Pada putaran yang lebih tinggi, panas dan gesekan di daerah pemotongan dapat meningkat sehingga memicu pelunakan lokal, deformasi elastis, adhesi material pada pahat, dan ketidakstabilan pembentukan geram. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan kekasaran permukaan. Oleh karena itu, pada kondisi mesin bubut manual dan pahat HSS yang digunakan, putaran 210 rpm menghasilkan proses pemotongan yang lebih stabil.

Hasil penelitian ini berbeda dengan studi Azzi *et al.* yang melaporkan bahwa *feed rate* merupakan faktor paling dominan pada pembubutan PTFE. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan jenis mesin, pahat, rentang parameter, diameter benda kerja, serta penggunaan kecepatan potong dalam m/min. Beberapa penelitian lain juga menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan potong dan penurunan *feed rate* dapat memperbaiki kualitas permukaan PTFE. Namun, hasil tersebut tidak selalu dapat diterapkan langsung karena sifat pemesinan PTFE sangat dipengaruhi oleh deformasi elastis, panas, pembentukan geram, dan kestabilan sistem mesin–pahat–benda kerja. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa parameter optimum bersifat spesifik terhadap kondisi eksperimen. Kombinasi 210 rpm, 0,18 mm/rev, dan 0,50 mm dapat direkomendasikan dalam rentang pengujian penelitian ini, tetapi tetap perlu diverifikasi melalui eksperimen konfirmasi. Variasi hasil antarulangan juga menunjukkan bahwa kondisi pahat, getaran mesin, penjepitan benda kerja, dan posisi pengukuran perlu dikendalikan dengan lebih ketat agar hasil kekasaran lebih konsisten.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa variasi kecepatan putaran spindel, *feed rate*, dan kedalaman pemotongan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kekasaran permukaan PTFE. Hasil analisis Taguchi dengan karakteristik smaller-the-better menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimum diperoleh pada kecepatan putaran spindel 210 rpm, *feed rate* 0,18 mm/rev, dan kedalaman pemotongan 0,50 mm. Kombinasi tersebut menghasilkan rata-rata kekasaran permukaan sebesar 1,557 μm .

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa kecepatan putaran spindel merupakan faktor yang paling dominan dan berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan, dengan kontribusi sebesar 92,94%, F-value 32,76, dan P-value 0,030. Sementara itu, *feed rate* dan kedalaman pemotongan masing-masing memberikan kontribusi sebesar 3,49% dan 0,74%, serta tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan pada taraf signifikansi 5%. Dengan demikian, hipotesis bahwa parameter proses pembubutan memengaruhi kekasaran permukaan PTFE dapat diterima, terutama untuk faktor kecepatan putaran spindel.

Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan kecepatan spindel menjadi aspek utama dalam pengendalian kualitas permukaan PTFE pada penggunaan mesin bubut manual dan pahat HSS. Namun, kombinasi parameter optimum yang diperoleh hanya berlaku pada rentang kondisi eksperimen yang digunakan. Penelitian selanjutnya perlu melakukan eksperimen konfirmasi, menambah jumlah pengulangan, serta mempertimbangkan faktor lain seperti geometri dan keausan pahat, temperatur pemotongan, getaran mesin, dan jenis pahat untuk meningkatkan keandalan hasil optimasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada keluarga tercinta atas doa, kasih sayang, dan dukungan yang tiada henti, serta kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, khususnya Program Studi Teknik Mesin dan Laboratorium Teknik Mesin, atas bimbingan, fasilitas, serta kesempatan yang diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada teman-teman seangkatan yang telah memberikan semangat, kebersamaan, dan dukungan sehingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] B. Griffiths, "Manufacturing surface technology: Surface integrity and functional performance," *Journal of Tribology*, vol. 123, no. 4, pp. 765–772, 2021.
- [2] M. P. Groover, "Fundamentals of modern manufacturing processes," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 123, no. 3, pp. 594–595, 2021.
- [3] B. Davoodi and A. H. Tazehkandi, "Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid," *Journal of Cleaner Production*, vol. 68, pp. 234–242, 2021.
- [4] M. Y. Noordin, V. C. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting, and A. Abdullah, "Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 145, no. 1, pp. 46–58, 2024.
- [5] D. I. Lalwani, N. K. Mehta, and P. K. Jain, "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, no. 1–3, pp. 167–179, 2022.
- [6] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, and J. P. Davim, "Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 204, no. 1–3, pp. 459–464, 2022.
- [7] A. M. Zain, H. Haron, and S. Sharif, "Prediction of surface roughness in the end milling machining using artificial neural network," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 2, pp. 1755–1768, 2022.
- [8] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde, and G. L. Samuel, "Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 33, pp. 75–86, 2023.
- [9] M. Kaladhar, K. V. Subbaiah, and C. S. Rao, "Optimization of surface roughness and tool flank wear in turning of AISI 304 austenitic stainless steel with CVD-coated tool," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 165–176, 2023.
- [10] S. Ranganathan, T. Senthilvelan, and G. Sriram, "Evaluation of machining parameters of hot turning of stainless steel Type 316 by applying ANN and RSM," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, no. 10, pp. 1131–1141, 2024.
- [11] P. J. Davim, V. N. Gaitonde, and S. R. Karnik, "Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 205, no. 1–3, pp. 16–23, 2025.
- [12] P. J. Rae and D. M. Dattelbaum, "The properties of poly(tetrafluoroethylene) in compression," *Polymer*, vol. 45, no. 22, pp. 7615–7625, 2024.
- [13] J. A. Conesa and R. Font, "Polytetrafluoroethylene decomposition in air and nitrogen," *Polymer Engineering and Science*, vol. 41, no. 12, pp. 2137–2147, 2025.
- [14] X. Huang, V. J. Martinez, and D. Malec, "Morphological evolution of polytetrafluoroethylene in extreme temperature conditions for aerospace applications," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 3, Art. no. 39841, 2024.
- [15] L. J. van Rooyen, H. Bissett, M. C. Khoathane, and J. K. Kocsis, "Gas permeation properties of compression-moulded PTFE," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, no. 20, Art. no. 43369, 2025.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.