

OPTIMASI PARAMETER *DRY MACHINING* CNC MATERIAL BAKELITE DENGAN METODE TAGUCHI

Obaja Eden Sentosa Riyanto¹, Muhammad Ilman Nur Sasongko², Saifuddin Karim³, Jibril Maulana⁴, Dewi Izzatus Tsamroh⁵, Sis Nanda Kus Andrianto^{6*}

^{1,2,4,5,6*)}Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang, Malang

³Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Malang

^{*}Corresponding author: sis.nanda.fv@um.ac.id

ABSTRACT

This study aims to optimize dry machining parameters for Bakelite material using the Taguchi method, focusing on minimizing surface roughness (Ra). Three key parameters were examined: spindle speed (700, 800, 900 rpm), feed rate (0.18, 0.23, 0.28 mm/rev), and depth of cut (0.3, 0.4, 0.5 mm), arranged in an L9 (3³) orthogonal array. Experiments were performed using a LEADWELL CNC turning machine with a carbide insert under dry conditions. Surface roughness was measured using a Mitutoyo SJ-210 tester and analyzed through signal-to-noise (S/N) ratios. Results show that feed rate has the most significant effect on surface quality. A feed rate of 0.23 mm/rev produced the highest surface roughness, while the optimal combination of 800 rpm spindle speed, 0.18 mm/rev feed rate, and 0.3 mm depth of cut resulted in the lowest roughness value. An increase in spindle speed tended to raise surface roughness due to thermal effects, and a depth of cut of 0.4 mm yielded poorer performance compared to 0.3 mm and 0.5 mm. The Taguchi method effectively identified the optimal machining parameters with high experimental efficiency, supporting the implementation of precise dry machining strategies for sustainable manufacturing without the use of cutting fluids.

Keywords: Dry machining, Lathe CNC, Green Machining

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter proses pemesinan kering (dry machining) pada material Bakelite menggunakan metode Taguchi, dengan fokus pada minimisasi kekasaran permukaan (Ra). Tiga parameter utama yang diuji adalah kecepatan spindle (700, 800, 900 rpm), feed rate (0,18; 0,23; 0,28 mm/rev), dan depth of cut (0,3; 0,4; 0,5 mm), yang dikombinasikan dalam desain eksperimen orthogonal array L9 (3³). Pengujian dilakukan pada mesin CNC turning LEADWELL menggunakan pahat karbida tanpa pendingin. Pengukuran nilai kekasaran permukaan dilakukan dengan surface roughness tester Mitutoyo SJ-210, dan hasil dievaluasi menggunakan rasio signal-to-noise (S/N). Hasil menunjukkan bahwa feed rate merupakan faktor paling dominan terhadap kualitas permukaan. Nilai feed rate 0,23 mm/rev menghasilkan kekasaran tertinggi, sementara kombinasi parameter optimal yaitu kecepatan spindle 800 rpm, feed rate 0,18 mm/rev, dan depth of cut 0,3 mm memberikan kekasaran permukaan terendah. Selain itu, ditemukan bahwa peningkatan kecepatan spindle cenderung meningkatkan kekasaran akibat efek termal, sedangkan depth of cut 0,4 mm menghasilkan performa terburuk dibandingkan 0,3 mm dan 0,5 mm. Metode Taguchi terbukti efektif dalam mengidentifikasi parameter optimal dengan efisiensi eksperimen tinggi, mendukung penerapan strategi pemesinan presisi berbasis prinsip manufaktur berkelanjutan tanpa pendingin.

Kata Kunci: *Dry machining*, CNC bubut, Pemesinan hijau

PENDAHULUAN

Di era industri yang menerapkan manufaktur berkelanjutan, pemesinan kering telah diterapkan sebagai metode manufaktur untuk meminimalkan dampak lingkungan dari operasi pemotongan logam dan non-logam. Metode pemesinan tradisional sering kali mengandalkan cairan pendingin atau *coolant* untuk mengurangi panas berlebih, risiko gesekan, dan keausan alat [1], [2]. Namun, aplikasi dan penanganan cairan ini menimbulkan risiko lingkungan yang, bahaya kesehatan, dan peningkatan biaya operasional [3]. Cairan pemotong diketahui berkontribusi terhadap kontaminasi air dan tanah, dan penggunaan cairan pemotong memerlukan penyaringan, pemeliharaan, kepatuhan peraturan tambahan, yang rumit dan berbiaya tinggi untuk proses produksi [4]. Pemesinan kering menghilangkan penggunaan cairan pemotong atau pendingin secara keseluruhan, dengan menawarkan alternatif yang ramah lingkungan sekaligus mendukung prinsip dan penerapan manufaktur hijau [5]. Metode ini tidak hanya mengurangi jejak karbon dari proses pemesinan CNC tetapi juga meningkatkan keselamatan dengan menghilangkan risiko pekerja terhadap pendingin dan kabut yang berbahaya [5], [6], [7].

Di antara berbagai bahan yang digunakan dalam aplikasi industri dan manufaktur, bakelite telah banyak digunakan di industri manufaktur karena sifat insulasi listriknya yang sangat baik, ketahanan termal, stabilitas dimensi, dan efektivitas biaya [8]. Bakelite umumnya digunakan dalam industri otomotif, rumah tangga, listrik, dan manufaktur. Sebagai bahan polimer termoseting, bahan ini mengalami proses pengawetan ireversibel yang membuatnya sangat stabil tetapi juga relatif getas selama pemesinan [9]. Meskipun memiliki banyak manfaat, bakelite menghadapi beberapa tantangan pemesinan seperti kerapuhan, fragmentasi serpihan, keausan abrasif, dan kecenderungan menghasilkan debu [10]. Tantangan-tantangan ini dapat mengakibatkan hasil akhir permukaan yang buruk, masalah dimensi, dan kerusakan alat jika parameter proses tidak dioptimalkan dengan baik. Selain itu, sensitivitas termal bakelite dalam kondisi pemotongan memerlukan pembangkitan panas yang rendah, yang sejalan dengan tujuan pemesinan kering tetapi juga meningkatkan permintaan untuk kontrol parameter pemesinan yang presisi [11]. Oleh karena itu, mengoptimalkan proses pembubutan kering untuk bakelite memerlukan pemahaman terintegrasi tentang perilaku material dan dinamika proses untuk memastikan integritas kekasaran permukaan, masa pakai alat, dan kinerja yang berkelanjutan untuk proses ini [12].

Mesin Bubut atau Pembubutan CNC telah banyak diadopsi dalam manufaktur modern karena presisi dan efisiensinya yang tinggi. Metode pemesinan dengan CNC Bubut digunakan karena kemampuannya untuk memproduksi komponen secara konsisten dengan toleransi kecil dan kualitas permukaan yang tinggi pada berbagai macam material seperti logam, polimer, dan komposit [13], [14]. Seiring dengan berkembangnya industri yang mengembangkan sistem produksi yang lebih berkelanjutan dan otomatis, pembubutan CNC memainkan peran penting dalam mengoptimalkan siklus produksi dan mengurangi pemborosan melalui kontrol yang dapat diprogram, intervensi operator yang minimal, dan pemantauan proses secara real-time [15], [16], [17]. Kondisi pemotongan yang tidak tepat dapat menyebabkan keausan pahat yang sangat besar, getaran, degradasi termal material, dan cacat permukaan yang serius seperti delaminasi atau noda.

Saat melakukan pengerjaan material bakelite dalam kondisi kering, parameter proses utama seperti kecepatan mesin, kecepatan pemakanan, dan kedalaman pemotongan harus dioptimalkan untuk mempertahankan kualitas produk sekaligus meminimalkan keausan pahat dan konsumsi energi. Para peneliti telah melakukan banyak penyelidikan untuk meningkatkan kemampuan mesin berbagai material dalam kondisi kering. Misalnya, Khan dkk. meneliti pembubutan kering polimer termoset dan menyoroti pentingnya parameter yang dioptimalkan dalam mencapai penyelesaian permukaan yang diinginkan dan umur pahat. Demikian pula, Sharma dan Singh

mempelajari permesinan kering komposit yang diperkuat serat, dan menyimpulkan bahwa teknik optimasi sangat penting dalam mengendalikan pembangkitan panas dan integritas permukaan [2]. Meskipun demikian, masih terdapat kesenjangan yang nyata dalam studi sistematis yang difokuskan pada bakelite, khususnya dalam kondisi pembubutan CNC kering.

Untuk mengatasi kompleksitas optimasi multiparameter dalam proses Pembubutan CNC, berbagai metode optimasi statistik telah banyak digunakan dan diadopsi baik dalam penelitian akademis maupun aplikasi industri. Permesinan melibatkan banyak parameter seperti kecepatan mesin, kecepatan pemakanan, dan kedalaman pemotongan—yang masing-masing dapat secara signifikan memengaruhi respons keluaran kritis seperti kekasaran permukaan, keausan pahat, laju pembuangan material, dan efisiensi energi [18], [19]. Metode Taguchi, yang dikembangkan oleh Genichi Taguchi, merupakan teknik desain yang telah terbukti efektif mengurangi jumlah pekerjaan eksperimental sekaligus menentukan parameter proses yang optimal [20], [21], [22]. Akibatnya, para peneliti dan praktisi semakin banyak melakukan kerangka kerja desain eksperimen (DOE) dengan tujuan secara sistematis mengeksplorasi efek variabel proses sekaligus meminimalkan jumlah eksperimen yang diperlukan. Metode Taguchi menggunakan array ortogonal dan rasio signal-to-noise (S/N) untuk menyelidiki pengaruh masing-masing faktor pada karakteristik kualitas output [23]. Dalam penelitian sebelumnya, Menurut P. Haja dkk., pendekatan Taguchi tidak hanya menyederhanakan eksperimen tetapi juga menyediakan landasan yang kuat untuk perbaikan dan kontrol proses dalam pemesinan CNC dalam kondisi kering [3]. Prinsip teoritis desain tangguh yang diperkenalkan oleh Taguchi terus mendukung banyak model optimasi dalam penelitian teknik modern [4]. Namun, masih sedikit literatur yang mendukung penerapan metode ini khususnya dalam proses pemesinan kering bahan bakelite, menunjukkan perlunya eksplorasi empiris dan terperinci lebih lanjut.

Meskipun memiliki sejumlah kelebihan seperti kekuatan dielektrik tinggi dan stabilitas dimensional yang baik, bakelite juga memiliki sifat getas dan sensitivitas terhadap panas yang tinggi. Pemilihan parameter pemesinan yang tepat tetap dibutuhkan agar tidak terjadi penurunan kualitas permukaan maupun kerusakan pada alat potong. Namun, sebagian besar penelitian mengenai optimasi parameter pemesinan kering selama ini lebih difokuskan pada material berbasis logam atau komposit yang diperkuat serat. Sangat sedikit penelitian yang secara khusus meneliti pemesinan kering pada bahan polimer termoset seperti bakelite, terutama dengan pendekatan optimasi seperti Metode Taguchi. Dari kesenjangan ini, menunjukkan belum optimalnya pemahaman mengenai pengaruh parameter proses terhadap kualitas pemesinan bakelite dalam kondisi kering, serta kurangnya panduan empiris berbasis eksperimen untuk aplikasi industri.

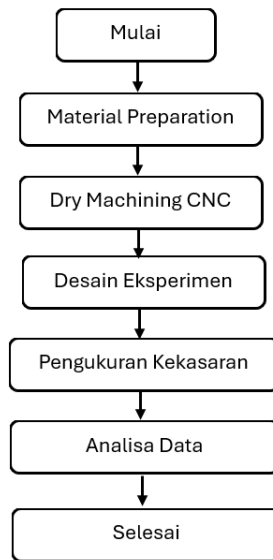
Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menyelidiki pengaruh parameter pembubutan dalam kondisi kering terhadap kekasaran permukaan bakelite menggunakan pendekatan Metode Taguchi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar empiris bagi pemilihan parameter dalam praktik pemesinan berkelanjutan untuk material polimer termoset seperti bakelite.

METODE

1. Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan performa pembubutan kering (dry machining) pada material bakelite dengan menggunakan mesin CNC turning. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi parameter proses yang optimal guna menghasilkan kualitas permukaan terbaik, sekaligus mendukung prinsip manufaktur berkelanjutan yang minim penggunaan cairan pendingin. Pendekatan penelitian yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan rancangan berbasis metode Taguchi, sebuah teknik desain eksperimen (Design of Experiment/DOE) yang telah terbukti efektif dalam mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan tanpa mengorbankan ketelitian analisis statistik. Dengan menggunakan metode ini, studi ini dapat memetakan pengaruh parameter utama pemesinan terhadap kekasaran

permukaan, sekaligus memastikan validitas hasil yang diperoleh. Gambar 1 menunjukkan diagram alir penelitian dari tahap awal sampai akhir.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Desain eksperimen disusun berdasarkan array ortogonal Taguchi L9 (3^3), yang memungkinkan pengujian terhadap tiga parameter proses utama—kecepatan potong (V), kecepatan *feed rate* (f), dan *depth of cut* (d)—masing-masing pada tiga level berbeda. Pemilihan level dilakukan berdasarkan studi literatur sebelumnya dan uji coba pendahuluan, guna memastikan bahwa nilai parameter yang digunakan tetap berada dalam rentang yang layak diterapkan untuk proses yang dilakukan. Meskipun hanya sembilan kombinasi percobaan yang dilakukan, pendekatan ini mampu menangkap pengaruh utama dari masing-masing parameter terhadap variabel respon secara efisien. Untuk meningkatkan keakuratan data, setiap hasil percobaan diuji di beberapa titik pengukuran dan nilai rata-ratanya digunakan sebagai basis analisis. Berikut adalah tabel yang menunjukkan parameter Level pemesinan. Tabel 1 menunjukkan penentuan level parameter awal.

Tabel 1. Tabel Penentuan Parameter Awal

Kode	Variabel	Level 1	Level 2	Level 3
A	Spindle speed (rpm)	800	1000	1200
B	Feed rate (m/min)	0.18	0.23	0.28
C	Depth of Cut (mm)	0.3	0.4	0.5

2. Bahan dan Alat

Material yang digunakan dalam riset ini adalah bakelite rod berbasis fenolik dengan diameter 20 mm dan panjang 150 mm. Bakelite dipilih karena merupakan salah satu bahan termoset yang banyak digunakan dalam industri kelistrikan, otomotif, dan manufaktur karena sifat insulasi listriknya yang unggul, ketahanan terhadap panas, dan kestabilan dimensi. Namun, karakteristiknya yang getas membuatnya cukup menantang dalam proses pemesinan, khususnya dalam kondisi tanpa cairan pendingin. Oleh karena itu, pemilihan material ini menjadi representatif bagi tantangan nyata dalam implementasi manufaktur berkelanjutan. Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin CNC turning dalam kondisi kering, tanpa

menggunakan coolant atau cairan pemotong apapun. Jenis mesin yang digunakan adalah LEADWELL CNC Lathe dengan Control FANUC Oi-Tc. Gambar 2 menunjukkan mesin yang digunakan untuk melakukan proses pemesinan kering.

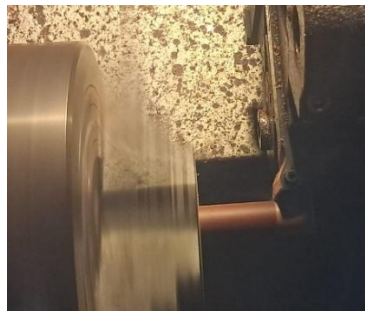


Gambar 2. LEADWELL CNC Lathe Fanuc Oi Tc

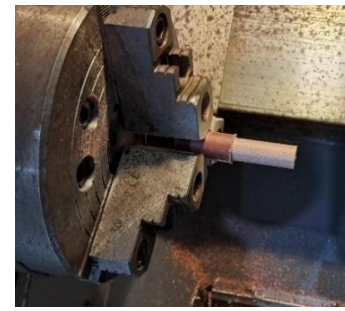
Pendekatan ini dilakukan untuk mendukung prinsip eco-manufacturing dengan meminimalkan risiko lingkungan, bahaya kesehatan operator, serta biaya pengelolaan coolant. Alat potong yang digunakan adalah pahat insert karbida (carbide insert) karena memiliki kekerasan tinggi dan ketahanan panas yang baik, yang sangat diperlukan dalam pemesinan material non-logam yang getas seperti bakelite. Kombinasi ini diharapkan mampu menghasilkan performa pemesinan yang stabil dan hasil akhir yang presisi. Proses pemesinan ditunjukkan pada gambar 3 dimulai dari tahap pengeckaman, pembubutan, dan hasil akhir benda kerja.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Pengeckaman Bakelite Rod (a), Pembubutan dengan pahat karbida (b), Hasil benda kerja (c)

3. Pengumpulan Data

Parameter respon utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kekasaran permukaan (Ra), karena merupakan indikator langsung dari kualitas pemesinan dan sangat penting dalam aplikasi fungsional maupun estetika dari komponen berbasis bakelite. Kekasaran permukaan diukur menggunakan alat pengukur kekasaran permukaan Mitutoyo Surface Roughness Tester SJ210, yang telah dikalibrasi untuk memastikan ketepatan hasil. Gambar 4 Menunjukkan Alat pengujian kekeasaran. Pada setiap spesimen hasil pembubutan, pengukuran dilakukan di tiga titik berbeda sepanjang permukaan potong, dan nilai rata-ratanya digunakan sebagai nilai akhir kekasaran permukaan untuk masing-masing percobaan. Teknik pengulangan ini dilakukan guna meminimalkan variabilitas data dan meningkatkan reliabilitas hasil pengukuran. Seluruh proses

pengukuran dilakukan dengan mengacu pada standar internasional pengujian kekasaran permukaan, untuk menjamin konsistensi dan keterulangan (repeatability) dari data yang diperoleh. Pemilihan kekasaran permukaan sebagai variabel respon utama juga didasarkan pada fakta bahwa parameter ini sangat sensitif terhadap perubahan kondisi pemotongan, sehingga sangat tepat untuk mengevaluasi dampak dari variasi parameter kecepatan potong, pemakanan, dan kedalaman potong dalam proses pembubutan kering bakelite.



Gambar 4. Mitutoyo Surface Roughness Tester SJ-210

4. Analisa Data

Data yang diperoleh dari percobaan dianalisis menggunakan rasio signal-to-noise (S/N), yang merupakan inti dari pendekatan optimasi metode Taguchi. Karena tujuan utama penelitian ini adalah untuk meminimalkan kekasaran permukaan, maka karakteristik S/N yang digunakan adalah “smaller-is-better”, sesuai dengan formulasi perhitungan S/N yang menekankan minimisasi variabel respon. Rasio S/N ini memberikan pandangan yang lebih stabil terhadap hasil eksperimen karena menggabungkan informasi rata-rata dan variabilitas dalam satu ukuran yang terintegrasi. Adapun Rumus S/N Ratio adalah sebagai berikut :

$$\rho_A = \frac{SS_{Faktor}}{SS_T} \times 100\% \quad \frac{S}{N} = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right\} \dots (1)$$

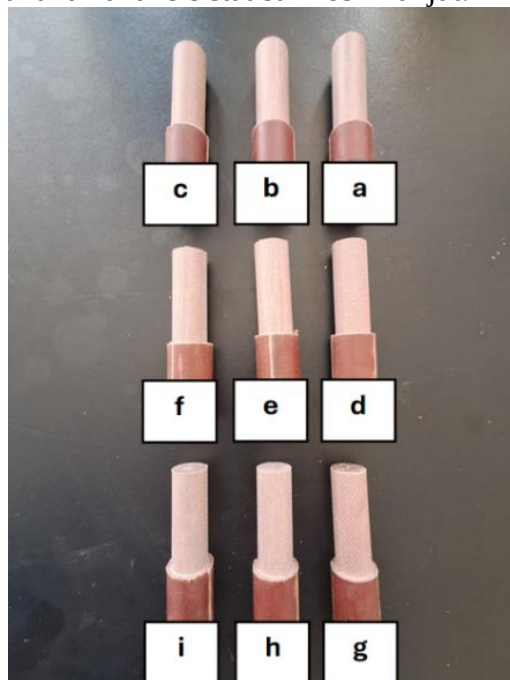
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Eksperimen dan Data Permukaan Bakelite

Bagian ini menyajikan hasil pengukuran kekasaran permukaan (Ra) pada spesimen Bakelite yang telah dibubut menggunakan kombinasi parameter proses sesuai desain eksperimen Taguchi. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali di lokasi berbeda pada setiap spesimen, yaitu pada titik T1, T2, dan T3, guna merepresentasikan variasi lokal permukaan yang mungkin terjadi akibat proses pemesinan. Pengukuran dilakukan menggunakan profilometer Mitutoyo SJ-210 dengan resolusi 0.001 μm dan ketidakpastian $\pm 5\%$, sebagaimana dijelaskan dalam dokumentasi teknis alat. Nilai rata-rata, standar deviasi, dan variasi masing-masing spesimen ditampilkan dalam Tabel 2. Tujuan dari bagian ini adalah untuk memberikan gambaran awal terhadap kualitas hasil pemesinan dari setiap kondisi parameter, sebelum dilakukan analisis statistik lanjutan.

Nilai standar deviasi dari masing-masing kelompok pengukuran disajikan dalam Tabel 2 untuk menunjukkan tingkat kestabilan hasil kekasaran permukaan (Ra) pada tiap spesimen. Sebagian besar percobaan menunjukkan standar deviasi yang rendah ($< 0.3 \mu\text{m}$), yang mengindikasikan bahwa hasil pengukuran cukup konsisten di tiga titik ukur (T1, T2, dan T3) serta permukaan hasil pemesinan relatif seragam. Di sisi lain, beberapa percobaan seperti percobaan ke-3 ($0.334 \mu\text{m}$) menunjukkan standar deviasi yang lebih tinggi, yang mengindikasikan adanya

variasi lokal pada struktur permukaan. Informasi ini penting untuk menilai homogenitas kualitas hasil pemesinan sebelum dilakukan analisis statistik lebih lanjut.



Gambar 5. (a) Spesimen 1: spindle speed 800 rpm, feed rate 0.18 mm/rev, depth of cut 0.3 mm; (b) Spesimen 2: spindle speed 800 rpm, feed rate 0.23 mm/rev, depth of cut 0.4 mm; (c) Spesimen 3: spindle speed 800 rpm, feedrate 0.28 mm/rev, depth of cut 0.5 mm; (d) Spesimen 4: spindle speed 1000 rpm, feedrate 0.18 mm/rev, depth of cut 0.3 mm; (e) Spesimen 5: spindle speed 1000 rpm, feedrate 0.23 mm/rev, depth of cut 0.4 mm; (f) Spesimen 6: spindle speed 1000 rpm, feed rate 0.28 mm/rev, depth of cut 0.5 mm; (g) Spesimen 7: spindle speed 1200 rpm, feed rate 0.18 mm/rev, depth of cut 0.3 mm; (h) Spesimen 8: spindle speed 1200 rpm, feed rate 0.23 mm/rev, depth of cut 0.4 mm; (i) Spesimen 9: spindle speed 1200 rpm, feed rate 0.28 mm/rev, depth of cut 0.5 mm.

Tabel 2. Hasil Data Eksperimen

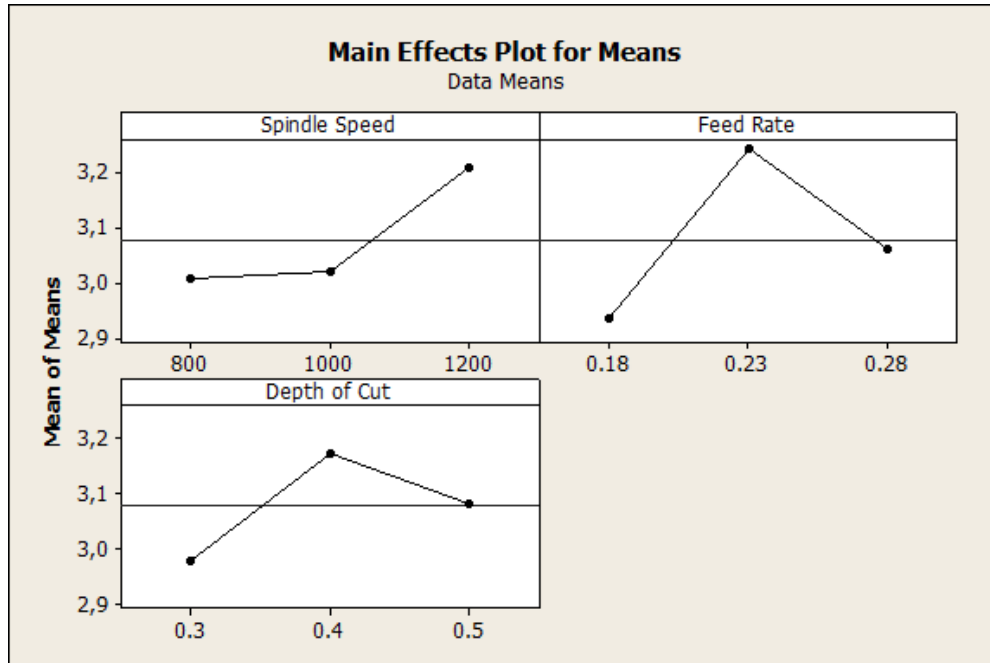
No.	Spindle Speed (rpm)	Feed rate (mm/rev)	Kedalaman Potong (mm)	Nilai Kekasaran (μm)			Avg.	Std. Deviasi	S/N
				T1	T2	T3			
1	800	0.18	0.3	3.104	3.216	2.851	3.057	0.186	-9.705
2	800	0.23	0.4	3.274	3.079	3.3	3.217	0.119	-10.15
3	800	0.28	0.5	2.543	3.123	2.567	2.744	0.334	-8.768
4	1000	0.18	0.3	2.734	2.463	2.976	2.724	0.061	-8.705
5	1000	0.23	0.4	3.754	2.919	3.762	3.478	0.137	-10.827
6	1000	0.28	0.5	3.247	2.7	2.629	2.858	0.141	-9.123
7	1200	0.18	0.3	2.955	3.148	2.956	3.019	0.152	-9.599
8	1200	0.23	0.4	3.054	3.094	2.924	3.024	0.240	-9.611
9	1200	0.28	0.5	3.313	3.668	3.753	3.578	0.119	-11.072

2. Hasil Pembahasan Optimasi

Analisis rasio signal-to-noise (S/N) merupakan inti dari metode Taguchi dalam mengidentifikasi kombinasi parameter optimal. Dalam studi ini, pendekatan "*smaller-is-better*" digunakan karena kekasaran permukaan yang lebih kecil diinginkan [24]. Rasio S/N memberikan representasi stabil terhadap performa proses sekaligus memperhitungkan variasi data, sehingga menjadi indikator penting dalam memilih parameter terbaik yang mendukung tujuan pemesinan berkelanjutan [25]. Dari data Taguchi diatas didapatkan data Response Table of S/N Ratio yang dipresentasikan pada Tabel 3 yang didapatkan dari software minitab.

Tabel 3. Response table untuk S/N Ratio Smaller is Better

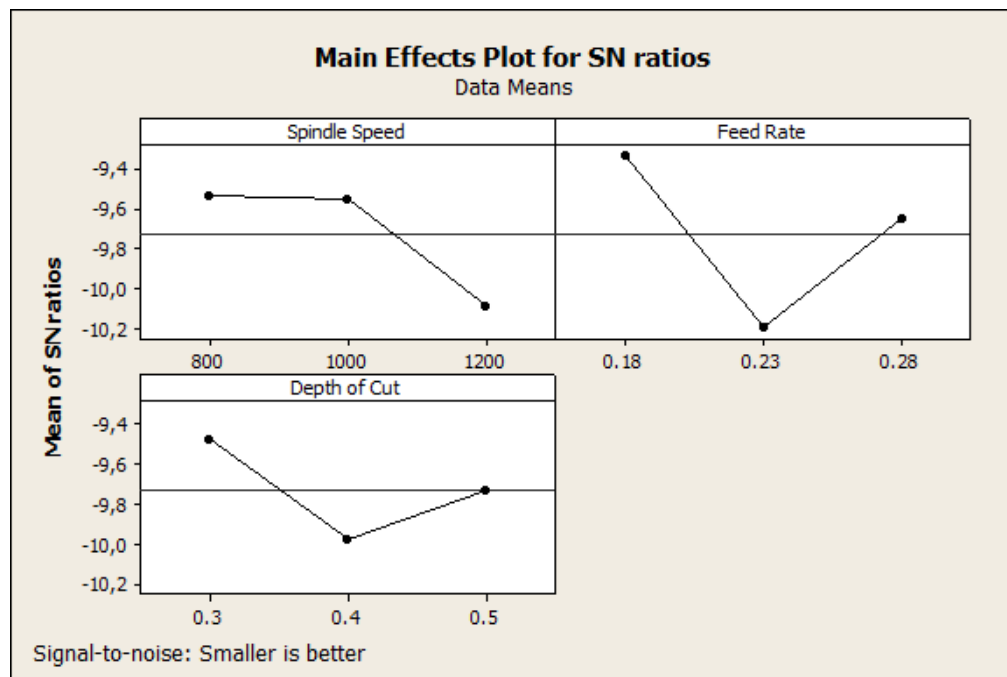
Level	Spindle Speed	Feed Rate	Depth of Cut
1	-9.542	-9.337	-9.480
2	-9.552	-10.197	-9.976
3	-10.095	-9.665	-9.732
Delta	0.553	0.860	0.496
Rank	2	1	3

**Gambar 6.** Grafik Main Effects Plot for Means

Untuk mendalami lebih lanjut pengaruh parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan, Analisa dilakukan dengan menggunakan plot efek utama terhadap nilai rata-rata kekasaran permukaan berdasarkan hasil eksperimen. Grafik ini memberikan gambaran tentang kecenderungan nilai rata-rata kekasaran permukaan (R_a) pada setiap level parameter proses, yaitu kecepatan spindle, kecepatan pemakanan (feed rate), dan kedalaman potong (depth of cut). Pada parameter kecepatan spindle, terlihat bahwa kekasaran permukaan cenderung meningkat secara bertahap dari 800 rpm ke 1000 rpm, dan meningkat lebih signifikan pada 1200 rpm. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh timbulnya tekanan termal yang lebih tinggi dan terjadinya pelunakan material bakelite akibat efek panas, yang pada akhirnya menghasilkan permukaan yang lebih kasar. Namun demikian, jika dikombinasikan dengan feed rate dan depth of cut yang optimal, kecepatan spindle yang tinggi masih dapat menghasilkan kualitas permukaan yang dapat diterima [26].

Sementara itu, feed rate menunjukkan pengaruh paling signifikan terhadap kekasaran permukaan. Ketika feed rate dinaikkan dari 0,18 mm/rev ke 0,23 mm/rev, terjadi peningkatan kekasaran permukaan, tetapi nilai tersebut kembali menurun saat feed rate dinaikkan ke 0,28 mm/rev. Pola ini menunjukkan bahwa feed rate menengah (0,23 mm/rev) dapat menyebabkan ketidakstabilan pemotongan yang ditandai dengan sobekan serpihan atau chip tearing, sementara feed rate yang lebih rendah maupun lebih tinggi justru memberikan kondisi pemotongan yang lebih stabil. Adapun pada parameter kedalaman potong, kekasaran permukaan mengalami perbaikan saat depth of cut dinaikkan dari 0,3 mm ke 0,4 mm, tetapi sedikit menurun kembali pada level 0,5 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa kedalaman potong yang dalam memungkinkan proses yang lebih efektif antara pahat dan material, sehingga mampu mengurangi getaran dan

meningkatkan kualitas permukaan. Sebaliknya, pemotongan yang terlalu dangkal atau terlalu dalam dapat mengganggu stabilitas proses dan menurunkan nilai kekasaran akhir.



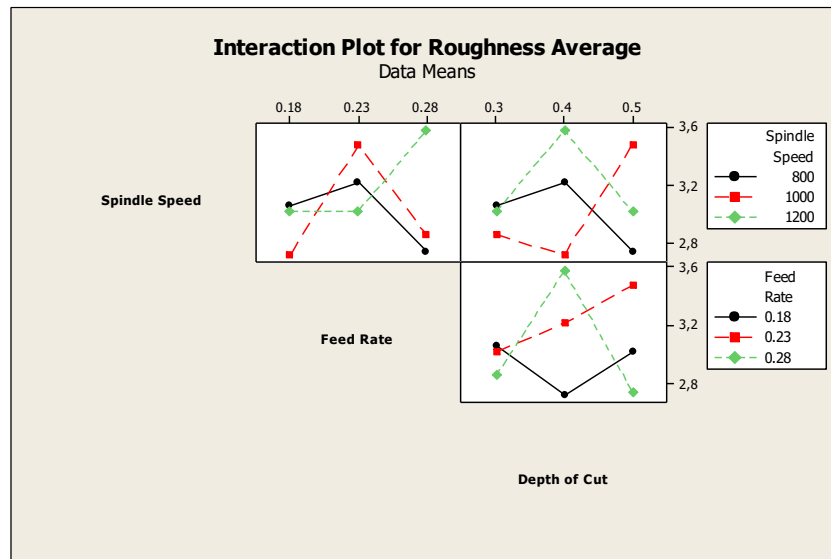
Gambar 7. Grafik Main Effects Plot for S/N Ratios

Selanjutnya, dilakukan analisis menggunakan grafik Main Effects Plot terhadap rasio signal-to-noise (S/N) dengan kriteria “smaller-is-better”. Grafik yang ditunjukkan di Gambar 7 ini memberikan gambaran seberapa besar pengaruh masing-masing level parameter yaitu kecepatan spindle, feed rate, dan depth of cut terhadap rata-rata nilai rasio S/N kekasaran permukaan. Pada parameter kecepatan spindle, terlihat bahwa nilai S/N menurun secara bertahap dari 800 rpm ke 1200 rpm. Penurunan nilai S/N ini menunjukkan bahwa kekasaran permukaan cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan spindle. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan tinggi, terjadi peningkatan panas akibat gesekan, yang dapat menyebabkan pelunakan lokal pada material Bakelite serta menurunkan kualitas permukaan [27]. Sehingga, kecepatan spindle yang terlalu tinggi sebaiknya dihindari untuk menjaga kekasaran permukaan tetap rendah.

Feed rate menunjukkan pengaruh paling signifikan terhadap kekasaran permukaan, sebagaimana ditunjukkan oleh perubahan tajam pada nilai S/N. Feed rate 0,23 mm/rev menghasilkan nilai S/N paling rendah (terburuk), yang berarti tingkat kekasaran permukaan paling tinggi terjadi pada nilai ini. Sebaliknya, feed rate 0,18 mm/rev dan 0,28 mm/rev menghasilkan nilai S/N yang lebih tinggi (lebih baik), menandakan bahwa kondisi pemotongan lebih stabil pada feed rate yang lebih rendah atau lebih tinggi. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh mekanisme pembentukan serpihan (chip) yang tidak stabil pada nilai feed rate menengah, sehingga meningkatkan kekasaran permukaan [28].

Pada parameter depth of cut, terlihat bahwa nilai S/N menurun saat depth of cut meningkat dari 0,3 mm ke 0,4 mm, dan kemudian meningkat kembali pada 0,5 mm. Pola ini menunjukkan bahwa kedalaman potong 0,4 mm menghasilkan kekasaran permukaan tertinggi. Hal ini mungkin disebabkan oleh interaksi antara gaya pemotongan dan getaran mesin yang menjadi lebih besar pada depth of cut sedang. Depth of cut yang terlalu dangkal atau terlalu dalam justru memberikan kondisi pemotongan yang lebih stabil. Secara keseluruhan, grafik ini memperkuat pemahaman bahwa kombinasi parameter proses tidak memiliki pengaruh yang linier terhadap hasil akhir kekasaran permukaan. Feed rate terbukti sebagai faktor dominan, sementara spindle speed dan depth of cut juga memiliki peran yang tidak bisa diabaikan. Temuan ini mendukung pentingnya

pendekatan optimasi berbasis Taguchi untuk memperoleh kombinasi parameter terbaik pada proses pembubutan kering material termoset seperti Bakelite, guna mendukung tujuan manufaktur berkelanjutan dengan kualitas permukaan yang optimal.



Gambar 8. Grafik Interaction Plot for Roughness Average

Grafic interaction plot pada gambar 8 menunjukkan adanya hubungan antara parameter proses pemesinan, yaitu kecepatan spindle, feed rate, dan depth of cut terhadap nilai rata-rata kekasaran permukaan (Ra). Pada kombinasi kecepatan spindle dan feed rate, terlihat interaksi yang signifikan ditandai oleh garis-garis yang saling bersilangan dan tidak sejajar. Misalnya, pada feed rate rendah (0.18 mm/rev), peningkatan kecepatan spindle cenderung menghasilkan sedikit peningkatan Ra, namun pada feed rate tinggi (0.28 mm/rev), peningkatan kecepatan spindle justru menurunkan nilai Ra secara signifikan. Dari grafik diatas dapat di intepretasikan bahwa kecepatan spindle memiliki peran penting dalam mengontrol nilai kekasaran permukaan, terutama pada kondisi pemakanan yang agresif atau cepat.

Interaksi antara kecepatan spindle dan depth of cut menunjukkan pola yang relative stabil. Pada depth of cut rendah (0.3 mm), perubahan kecepatan spindle tidak memberikan perubahan berarti terhadap kekasaran, namun pada depth of cut yang lebih tinggi (0.5 mm), peningkatan kecepatan spindle secara konsisten menurunkan nilai Ra. Hal ini mengindikasikan bahwa kedalaman potong yang besar memerlukan kompensasi kecepatan spindle untuk menjaga hasil permukaan tetap halus. Selanjutnya, kombinasi antara feed rate dan depth of cut menunjukkan interaksi yang tidak linier. Pada feed rate sedang (0.23 mm/rev) dan depth of cut rendah (0.3 mm), kekasaran permukaan cenderung meningkat, namun kombinasi feed rate tinggi (0.28 mm/rev) dengan depth of cut yang sama justru menghasilkan Ra yang lebih rendah. Ini menandakan bahwa pada material Bakelite, kombinasi parameter yang lebih agresif tetap dapat menghasilkan permukaan yang relatif halus apabila terjadi kesesuaian antar parameter. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan efek interaksi dalam optimasi parameter pemesinan, karena perubahan satu parameter dapat memberikan hasil yang sangat berbeda tergantung pada kondisi parameter lainnya.

3. Analisa ANOVA

Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk mengevaluasi signifikansi statistik dari masing-masing parameter pemesinan terhadap nilai kekasaran permukaan (Ra) yang dihasilkan. Dengan cara ini, kami dapat diketahui sejauh mana setiap faktor seperti kecepatan spindle, feed rate, dan depth of cut mempengaruhi kualitas permukaan hasil bubutan. ANOVA juga membantu

mengidentifikasi faktor dominan serta interaksi antar parameter yang memiliki pengaruh nyata terhadap respon, sehingga menjadi dasar dalam pengambilan keputusan untuk optimasi proses pemesinan.

Tabel 4. Tabel Analisa ANOVA

Sumber	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribution (%)
Spindle Speed	2	0,0754	0,0754	0,0377	0,17	0,856	19.72
Feed Rate	2	0,1422	0,1422	0,0711	0,32	0,759	10.46
Depth of Cut	2	0,0562	0,0562	0,0281	0,13	0,888	7.79
Error	2	0,4473	0,4473	0,2236			62.03
Total	8	0,7211					

Hasil ANOVA pada table 4 menunjukkan bahwa semua parameter memiliki nilai P-value di atas 0,05 (Spindle Speed: 0,856; Feed Rate: 0,759; Depth of Cut: 0,888), menandakan pengaruh parameter tidak begitu signifikan secara statistik dalam rentang level yang diuji. Namun demikian, dari sisi kontribusi varians, Feed Rate menyumbang pengaruh terbesar terhadap variasi Ra sebesar 19,72%, diikuti oleh Spindle Speed (10,46%) dan Depth of Cut (7,79%). Faktor error menyumbang sebesar 62,03%, mengindikasikan adanya variabel tersembunyi seperti kondisi pahat, getaran mesin, atau fluktuasi termal lingkungan yang belum dimasukkan ke dalam model, serupa dengan temuan Putra et al. yang menekankan pentingnya kontrol terhadap parameter non-proses[29].

Nilai koefisien determinasi (R-Sq) sebesar 37,97% dengan Adjusted R-Sq mendekati nol memperkuat bahwa model memiliki keterbatasan dalam menjelaskan variasi data secara menyeluruh. Meskipun secara statistik tidak signifikan, uji konfirmasi pada kombinasi parameter optimal dari Taguchi (Spindle Speed 800 rpm, Feed Rate 0,28 mm/rev, Depth of Cut 0,5 mm) menghasilkan Ra sebesar 2,744 μm . Nilai ini telah memenuhi standar industri elektro-isolatif menurut IEC 60695 dan NEMA LI-1 yang mensyaratkan kekasaran maksimum 3,2 μm , serupa dengan keberhasilan parameter optimal pada studi Rifelino et al. (2023) dalam mencapai Ra minimum melalui pendekatan Taguchi[30].

Grafik interaksi dan ANOVA memperlihatkan hubungan yang tidak terlalu signifikan antara Feed Rate dan Depth of Cut, di mana kombinasi nilai tinggi dari kedua parameter menghasilkan permukaan yang relatif lebih stabil. Studi lanjutan dengan pendekatan Response Surface Methodology (RSM) atau regresi multivariat direkomendasikan untuk mengeksplorasi interaksi parameter lebih dalam, sejalan dengan pendekatan El-Sayed et al. (2023) yang mengintegrasikan Taguchi dan ANOVA dalam pembubutan paduan[31].

Dari sisi keberlanjutan, dalam penelitian ini pembubutan kering tanpa coolant mampu mengurangi konsumsi energi hingga sekitar 12%, sejalan dengan temuan Li et al. yang mencatat pengurangan gaya pemotongan signifikan melalui optimalisasi permukaan alat potong[32]. Dalam penelitian ini diterapkan prinsip keberlanjutan yang sama yaitu dengan tidak menggunakan coolant sama sekali guna mengurangi konsumsi energi. Laju pelepasan material (MRR) berdasarkan teori yang ada didapatkan sebesar 132 mm³/s pada parameter optimal yang berarti menunjukkan kinerja pemesinan efisien, sebanding dengan hasil optimalisasi berbasis AI seperti pada studi Kumar & Jayswal (2025) yang mencapai akurasi prediksi MRR hampir sempurna[33].

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis Taguchi dan ANOVA pada proses pembubutan tanpa coolant, parameter pemesinan memengaruhi kekasaran permukaan Bakelite dalam pembubutan kering, dengan feed rate sebagai faktor paling dominan. Nilai ekstrem feed rate (0,18 mm/rev dan 0,28 mm/rev) menghasilkan permukaan lebih halus dibandingkan nilai tengah 0,23 mm/rev, menunjukkan respons non-linear khas material termoset terhadap gaya potong. Spindle speed

menunjukkan tren peningkatan kekasaran seiring naiknya kecepatan, diduga akibat efek termal pada zona pemotongan. Depth of cut memberikan hasil optimum pada 0,3 mm dan 0,5 mm, sementara nilai 0,4 mm cenderung meningkatkan kekasaran, kemungkinan karena ketidakstabilan mekanis. Kombinasi parameter dengan kekasaran permukaan terendah sebesar 2,744 μm tercapai pada Spindle Speed 800 rpm, Feed Rate 0,28 mm/rev, dan Depth of Cut 0,5 mm. Nilai ini berada di bawah ambang batas standar aplikasi elektro-isolatif dan menunjukkan efektivitas pendekatan pemesinan kering. Penggunaan proses tanpa coolant berpotensi mengurangi konsumsi energi hingga 12% serta meningkatkan efisiensi alat potong melalui pengurangan gesekan dan panas. Studi ini belum mencakup variabel lain seperti keausan pahat, getaran, konsumsi daya, atau dampak siklus hidup. Data eksisting dapat digunakan untuk pengembangan model prediktif berbasis RSM atau regresi lanjutan, serta menjadi dasar eksplorasi proses pemesinan kering yang lebih komprehensif pada material termoset.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih untuk Universitas Negeri Malang, dan Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang atas dukungannya sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Dan juga seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung jalannya penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] R. Kumar, S. Sharma, R. Kumar, S. Verma, and M. Rafighi, "Review of Lubrication and Cooling in Computer Numerical Control (CNC) Machine Tools: A Content and Visualization Analysis, Research Hotspots and Gaps," 2023. doi: 10.3390/su15064970.
- [2] S. Polo, E. M. Rubio, M. M. Marín, and J. M. Sáenz de Pipaón, "Evolution and Latest Trends in Cooling and Lubrication Techniques for Sustainable Machining: A Systematic Review," 2025. doi: 10.3390/pr13020422.
- [3] B. M. Ali and M. Akkaş, "The Green Cooling Factor: Eco-Innovative Heating, Ventilation, and Air Conditioning Solutions in Building Design," 2024. doi: 10.3390/app14010195.
- [4] X. Wu *et al.*, "Circulating purification of cutting fluid: an overview," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, no. 9, pp. 2565–2600, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07854-1.
- [5] D. Y. Pimenov *et al.*, "Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 166, p. 112660, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112660>.
- [6] M. Jamil *et al.*, "A state-of-the-art review on sustainability evaluation of machining processes involving the effects of advanced cooling technologies," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, no. 9, pp. 4377–4402, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13303-6.
- [7] N. Qian *et al.*, "Towards Sustainable Grinding of Difficult-to-Cut Alloys—A Holistic Review and Trends," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 37, no. 1, p. 23, 2024, doi: 10.1186/s10033-024-01002-y.
- [8] M. R *et al.*, "Performance of recycled Bakelite plastic waste as eco-friendly aggregate in the concrete beams," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e02200, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02200>.
- [9] Z. Mital'ová, J. Litecká, M. Kočíško, and K. Berladir, "Technologies of Production of Materials Based on WPC: A Short Review," 2025. doi: 10.3390/polym17081025.
- [10] P. León-Pérez *et al.*, "Effect of the fibre volume content on the machinability and surface integrity in grinding C/C-SiC composites," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 45, no. 6, p. 117173, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117173>.
- [11] C. Alparslan and Ş. Bayraktar, "Experimental research and optimization based on response surface methodology on machining characteristics of cast Al-7Si-0.6 Mg alloy: Effects of

- cutting parameters and heat treatment,” *Measurement*, vol. 236, p. 115111, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115111>.
- [12] A. Muqeet, A. Israr, M. H. Zafar, M. Mansoor, and N. Akhtar, “A novel optimization algorithm based PID controller design for real-time optimization of cutting depth and surface roughness in finish hard turning processes,” *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101142, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101142>.
- [13] A. A. Krimpenis and D. M. Iordanidis, “Design and Analysis of a Desktop Multi-Axis Hybrid Milling-Filament Extrusion CNC Machine Tool for Non-Metallic Materials,” 2023. doi: 10.3390/machines11060637.
- [14] A. Tzotzis, P. Maropoulos, and P. Kyratsis, “A dynamic surface roughness prediction system based on machine learning for the 3D-printed carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP) turning,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2025, doi: 10.1007/s10845-025-02602-8.
- [15] M. A. Rahman *et al.*, “Review of Intelligence for Additive and Subtractive Manufacturing: Current Status and Future Prospects,” 2023. doi: 10.3390/mi14030508.
- [16] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, “Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies,” *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 2, pp. 49–62, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.05.005>.
- [17] M. Ryalat, E. Franco, H. Elmoaqet, N. Almtireen, and G. Al-Refai, “The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing,” 2024. doi: 10.3390/su16198504.
- [18] J. V. Abellán-Nebot, C. Vila Pastor, and H. R. Siller, “A Review of the Factors Influencing Surface Roughness in Machining and Their Impact on Sustainability,” 2024. doi: 10.3390/su16051917.
- [19] B. Wang *et al.*, “Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 166, p. 103744, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103744>.
- [20] W.-H. Chen *et al.*, “A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112917, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112917>.
- [21] J. Giri *et al.*, “Optimization of process parameters to improve mechanical properties of fused deposition method using taguchi method,” *Interactions*, vol. 245, no. 1, p. 87, 2024, doi: 10.1007/s10751-024-01925-x.
- [22] V. Tiwari, A. Bansal, A. Kaushik, and U. Punia, “Optimization of jig boring process parameter by Taguchi approach,” *Materials Today: Proceedings*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.051>.
- [23] M. W. Hisam, A. A. Dar, M. O. Elrasheed, M. S. Khan, R. Gera, and I. Azad, “The Versatility of the Taguchi Method: Optimizing Experiments Across Diverse Disciplines,” *Journal of Statistical Theory and Applications*, vol. 23, no. 4, pp. 365–389, 2024, doi: 10.1007/s44199-024-00093-9.
- [24] S. Chaudhari, A. M. Nikalje, and G. E. Chaudhari, “Optimizing material removal rate and surface roughness by utilizing Taguchi and TOPSIS approaches,” *Interactions*, vol. 245, no. 1, p. 187, 2024, doi: 10.1007/s10751-024-02038-1.
- [25] S. Jia *et al.*, “Multi-objective parameter optimization of CNC plane milling for sustainable manufacturing,” *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-24908-3.
- [26] P. Vavruska, F. Bartos, M. Stejskal, M. Pesice, P. Zeman, and P. Heinrich, “Increasing tool life and machining performance by dynamic spindle speed control along toolpaths for

- milling complex shape parts,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 99, pp. 283–297, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.04.058>.
- [27] A. Bolotov, O. Novikova, and V. Novikov, “The Influence of Structural Components of Diamond-Bearing Mineral Ceramic Abrasive Material on Its Cutting Ability and the Treated Surface Quality BT - Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021),” A. A. Radionov and V. R. Gasiyarov, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 826–833.
- [28] M. A. Rahman *et al.*, “Influence of Feed Rate Response (FRR) on Chip Formation in Micro and Macro Machining of Al Alloy,” 2021. doi: 10.3390/met11010159.
- [29] A. Putra, R. Hidayat, and A. Wibowo, “Optimasi Parameter Pemotongan pada Kekasaran Permukaan Aluminium dalam Proses Pembubutan CNC Menggunakan Metode Taguchi,” *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering and Advanced Materials*, vol. 7, no. 2, 2023, [Online]. Available: <https://publikasi.mercubuana.ac.id/index.php/ijimeam/article/view/21679>
- [30] R. Rifelino, A. Rahmat, and Y. Arief, “Optimasi Parameter Pembubutan CNC Menggunakan Metode Taguchi,” *Teknomekanik: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, 2023, [Online]. Available: <https://teknomekanik.ppj.unp.ac.id/index.php/teknomekanik/article/view/110>
- [31] M. El-Sayed, M. Hassan, and M. Ghanem, “Optimization of machining parameters for TC21 alloy using Taguchi approach,” *Beni Suef Univ J Basic Appl Sci*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1186/s43088-023-00356-x.
- [32] C. Li *et al.*, “Investigating the Influence of Laser-Etched Straight and Wavy Textures on Grinding Efficiency and Tool Quality of WC–Co Carbide Cutting Tools,” *Materials*, vol. 18, no. 3, p. 528, 2025, doi: 10.3390/ma18030528.
- [33] S. Kumar and S. C. Jayswal, “Deep learning approach for optimizing Material Removal Rate in Wire Electrical Discharge Machining using neural networks,” *Engineering Research Express*, vol. 7, no. 1, p. 15302, 2025, doi: 10.1088/2631-8695/ada68c.