

Analisis Pengaruh Parameter Pemmesinan CNC *Milling* terhadap *Material Removal Rate* pada Dudukan Cetakan Kampas Rem

Hadi Usman^{1*}, Eko Yudo¹, Sukanto¹

¹Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

*E-mail: usmanadi230@gmail.com

Received:10 Desember 2025; Received in revised form: 10 Desember 2025;

Accepted:6 Januari 2026

Abstract

This study investigates the influence of CNC Milling parameter variations on the Material Removal Rate (MRR) of S45C steel brake lining mold holders using the Taguchi method. Three parameters—spindle speed, feed rate, and depth of cut—were tested at three levels through an L9 experimental design. Data were analyzed using the signal-to-noise ratio, ANOVA, and normality testing. Results indicate that none of the parameters significantly affect MRR at the 5% level ($F_{count} < F_{table} = 19.00$). Depth of cut showed the highest relative contribution (7.39%), while spindle speed and feed rate contributed negatively. A high error value (92.99%) suggests unobserved external factors. The optimal combination is 2388 rpm, 191 mm/min, and 2.67 mm, yielding a predicted MRR of 90.0766 (CI ± 0.4126). Normality assumptions were met ($p > 0.150$).

Keywords: CNC Milling, Material Removal Rate, ANOVA, Taguchi, Brake Pads.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi parameter CNC *Milling* terhadap *Material Removal Rate* (MRR) pada dudukan cetakan kampas rem berbahan S45C dengan metode *Taguchi*. Tiga parameter—putaran *spindle*, *feed rate*, dan *depth of cut* diuji pada tiga level menggunakan rancangan L9. Analisis dilakukan menggunakan rasio *signal-to-noise*, ANOVA, dan uji normalitas. Hasil menunjukkan bahwa ketiga parameter tidak berpengaruh signifikan pada taraf 5% ($F_{hitung} < F_{tabel} = 19,00$). *Depth of cut* memiliki kontribusi relatif tertinggi (7,39%), sementara *spindle speed* dan *feed rate* bernilai negatif. Nilai *error* yang tinggi (92,99%) menunjukkan adanya faktor lain yang tidak diamati. Kombinasi optimal adalah 2388 rpm, 191 mm/menit, dan 2,67 mm dengan MRR prediksi 90,0766 (CI $\pm 0,4126$). Data terbukti berdistribusi normal ($p > 0,150$).

Kata kunci: CNC Milling, Material Removal Rate, ANOVA, Taguchi, Kampas Rem.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur saat ini menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan, ditandai dengan meningkatnya kebutuhan produk yang memiliki geometri kompleks, tingkat presisi tinggi, serta tuntutan waktu produksi yang semakin singkat [1]. Dalam konteks industri modern, efisiensi proses dan kualitas hasil pemmesinan menjadi faktor strategis yang memengaruhi daya saing perusahaan. Di antara teknologi yang berkembang pesat tersebut, mesin *Computer Numerical Control* (CNC) *Milling* menjadi salah satu teknologi yang mengalami kemajuan substansial, karena mampu menyediakan proses pemmesinan otomatis

dengan akurasi tinggi dan fleksibilitas dalam menghasilkan bentuk yang beragam [2].

Pada pembuatan komponen teknik, seperti dudukan cetakan kampas rem, pemilihan metode pemmesinan dan pengaturan parameter proses merupakan aspek teknis yang sangat menentukan kualitas dan produktivitas hasil akhir [3]. Teknologi CNC *Milling* mendukung pembuatan kontur kompleks dengan toleransi ketat serta efisiensi waktu yang tinggi, sehingga sangat relevan dengan kebutuhan industri otomotif yang menuntut akurasi dimensi dan tingkat produksi yang optimal [4].

Efektivitas proses pemmesinan salah satunya dapat ditinjau melalui *Material*

Removal Rate (MRR), yaitu besaran volume material yang terangkat per satuan waktu [5]. Nilai MRR yang tinggi mengindikasikan proses yang efisien, namun tetap mempertimbangkan kualitas permukaan dan umur pahat agar performa pemesian tetap stabil [6]. Parameter proses seperti *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* diketahui memiliki kontribusi yang signifikan terhadap variasi nilai MRR, sebagaimana dibuktikan dalam berbagai penelitian sebelumnya [7].

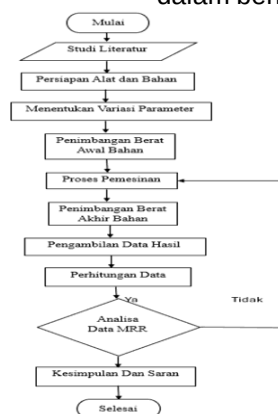
Berbagai studi telah membahas keterkaitan parameter pemesian dengan MRR. Dwi Saputra dan Yudiyanto (2024) mengemukakan bahwa pemilihan *feed rate* serta diameter pahat yang sesuai mampu meningkatkan kualitas permukaan tanpa mengurangi presisi pemotongan Dwi Saputra & Yudiyanto (2024). Nurhasanah (2025) juga menegaskan bahwa penyesuaian parameter pemesian yang tepat dapat memperpendek waktu siklus produksi dan menekan biaya proses Nurhasanah (2025). Selain itu, penelitian Pribadi dan Yulianto (2020) menggunakan metode *Taguchi* pada material AISI 1045 dan berhasil menentukan kombinasi optimal dari *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* yang menghasilkan nilai MRR tertinggi Pribadi dan Yulianto (2020).

Meskipun demikian, kajian yang secara spesifik meneliti pengaruh parameter CNC *Milling* terhadap nilai MRR pada proses pemesianudukan cetakan kampas rem berbahan baja S45C masih sangat terbatas. Material S45C sendiri merupakan material yang umum digunakan dalam industri otomotif karena karakteristik ketahanan dan kekuatannya, sehingga diperlukan pemesian yang efisien namun tetap menjaga kualitas produk [11].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* terhadap nilai MRR pada proses CNC *Milling* kedudukan cetakan kampas rem berbahan baja S45C. Fokus penelitian ini diarahkan pada komponen otomotif spesifik yang hingga kini belum banyak dikaji secara komprehensif. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam penentuan parameter pemesian yang optimal serta memberikan kontribusi bagi upaya peningkatan efisiensi dan kualitas produksi pada industri manufaktur otomotif.

2. METODE PENELITIAN

Untuk memperjelas urutan kegiatan yang dilakukan, alur metode penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Gambar tersebut menunjukkan tahapan penelitian dalam bentuk diagram alir untuk mempermudah dan memastikan alur kerja berjalan terstruktur. Proses diawali dengan identifikasi masalah melalui observasi, studi literatur, dan survei pendahuluan, sehingga rumusan masalah dapat ditetapkan secara tepat. Setelah itu, studi literatur dilakukan untuk memperkuat landasan teoritis dan referensial penelitian.

Penelitian ini menggunakan data primer hasil eksperimen dengan variabel bebas berupa *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of*

cut; variabel terikat berupa *Material Removal Rate* (MRR) serta variabel kontrol berupa pahat *end mill carbide* berdiameter 8 mm dan material baja karbon S45C. Rancangan percobaan disusun untuk mengevaluasi pengaruh parameter pemesian terhadap MRR dalam kondisi yang terkontrol.

Pengujian dilakukan menggunakan mesin CNC *Milling* Lagun MC-750. Pahat *end mill carbide* digunakan untuk menjaga akurasi, sementara jangka sorong dan timbangan digital digunakan untuk mengukur dimensi serta berat material yang terbuang. Benda

kerja dari baja karbon S45C disiapkan sesuai kebutuhan pemesinan dan perhitungan volume material.

2.1. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui sejumlah tahapan yang disusun secara sistematis. Tahap pertama adalah persiapan alat dan bahan, meliputi mesin CNC *Milling Lagun* MC-750, pahat *end mill* tipe *carbide* berdiameter 0,8 mm, jangka sorong, timbangan digital, serta benda kerja berbahan baja karbon S45C. Seluruh peralatan dipastikan berada dalam kondisi optimal dan

telah dikalibrasi guna menjamin ketelitian data hasil eksperimen.

Tahap selanjutnya mencakup penetapan kombinasi parameter pemesinan yang terdiri atas *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*. Variasi parameter tersebut dirancang menggunakan metode Taguchi untuk mengetahui sejauh mana masing-masing faktor memberikan pengaruh terhadap nilai *Material Removal Rate* (MRR). Penentuan parameter bebas beserta level yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 1. dan Tabel 2.

Tabel 1. Penentuan Parameter Bebas & Level

Level	Kecepatan pemakanan (mm/menit)	Kedalaman pemakanan (mm)	Kecepatan <i>spindel</i> (mm/putaran)
1	191	1,6	2388
2	413	2,0	2587
3	668	2,67	2786

Tabel 2. Rancangan Parameter Percobaan

Level	<i>Spindle speed</i>	<i>Feed rate</i>	<i>Depth of cut</i>
1	2388	191	1,6
2	2388	413	2
3	2388	668	2,67
4	2587	191	2
5	2587	413	2,67
6	2587	668	1,6
7	2786	191	2,67
8	2786	413	1,6

Tahap selanjutnya adalah proses pemesinan. Sebanyak 27 spesimen baja S45C berukuran awal 15 mm × 58 mm disiapkan, lalu program CNC *Milling* disusun sesuai kombinasi parameter yang telah dirancang. Setiap spesimen dijepit dengan kuat pada cekam agar stabil, kemudian dilakukan pemotongan menggunakan pahat *end mill* berdiameter 8 mm. Setelah proses selesai, mesin dimatikan dan setiap spesimen

diberi nomor sebagai penanda. Selanjutnya, benda kerja ditimbang ulang dan diukur dimensinya untuk memperoleh selisih material yang terbuang dan memvalidasi hasil pemotongan. Data berupa waktu proses, berat material, dan perubahan dimensi kemudian dihimpun sebagai dasar perhitungan *Material Removal Rate* (MRR) menggunakan rumus berikut.

$$MRR = vf \times ap \times w \dots\dots\dots(1)$$

$$MRR = \frac{\text{Volume Material Yang Terbuang (mm}^3\text{)}}{\text{Waktu Proses (min)}} \dots\dots\dots(2)$$

MRR dihitung menggunakan parameter *feed rate* (*vf*) dalam satuan mm/min, *depth of cut* (*ap*) dalam satuan mm, serta lebar pemotongan atau diameter *cutter* (*w*) dalam satuan mm. Selain itu, nilai MRR dapat divalidasi dengan metode perhitungan selisih volume benda kerja sebelum dan sesudah proses pemesinan.

2.2. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung terhadap spesimen

sebelum dan sesudah proses pemesinan. Parameter yang dicatat mencakup berat awal dan akhir benda kerja menggunakan timbangan digital, serta dimensi benda kerja menggunakan jangka sorong. Selisih berat atau perubahan dimensi tersebut kemudian dikonversi menjadi volume material yang terbuang. Data hasil pengukuran disajikan pada Tabel 3 untuk memudahkan perhitungan nilai MRR.

Tabel 3. Volume Material Yang Terbuang

Sempel	Berat awal (gram)	Berat akhir (gram)	Hasil
Data awal			
1	168,36	162,92	5,44
2	159,68	152,50	7,18
3	156,04	146,57	9,47
4	148,80	141,95	6,85
5	151,19	143,09	8,1
6	147,34	142,76	4,58
7	140,60	131,55	9,05
8	138,42	133,18	5,24
9	131,81	126,93	4,88
Replikasi 1			
1	160,68	155,18	5,5
2	141,10	135,02	6,08
3	155,30	145,86	9,44
4	150,81	143,55	7,26
5	153,07	144,00	9,07
6	145,51	139,81	5,7
7	135,79	126,84	8,95
8	138,33	133,60	4,73
9	133,10	126,93	6,17
Replikasi 2			
1	160,94	154,68	6,26
2	138,93	131,10	7,83
3	148,22	137,96	10,26
4	150,32	143,33	6,99
5	153,59	144,77	8,82
6	146,34	140,78	5,56
7	136,81	127,72	9,09
8	138,13	134,00	4,13
9	130,29	124,37	5,92

2.3. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk menilai pengaruh variasi parameter pemesinan terhadap nilai *Material Removal Rate* (MRR). Tahap awal meliputi perhitungan MRR berdasarkan selisih volume material per satuan waktu pada setiap kombinasi *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*.

Nilai MRR dari tiap replikasi kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh hasil yang lebih representatif. Selanjutnya, nilai tersebut dibandingkan antar kombinasi parameter untuk melihat pola pengaruh dan efektivitas variasi pemesinan. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, serta dapat dilengkapi dengan uji statistik ANOVA untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengambilan Data Hasil Percobaan

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan dengan mengatur kombinasi variabel proses pada mesin *CNC Milling* Lagun MC-750. Variabel yang diamati mencakup kecepatan putaran *spindle* (A), kecepatan pemakanan atau *feed rate* (B),

serta kedalaman potong (*depth of cut*, C) yang diperkirakan memengaruhi respon *Material Removal Rate* (MRR).

Proses pengambilan data dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, benda kerja ditimbang sebelum pemesinan untuk memperoleh berat awal. Setiap spesimen ditimbang sebanyak tiga kali sebagai replikasi, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Kedua, waktu pemesinan dicatat sejak *cutter* mulai menyentuh permukaan benda kerja hingga proses selesai dengan dua kali replikasi dan perhitungan nilai rata-rata. Ketiga, setelah pemesinan, dilakukan penimbangan ulang untuk mendapatkan berat akhir menggunakan prosedur replikasi yang sama seperti penimbangan awal. Tahap akhir adalah menghitung nilai MRR menggunakan persamaan (2).

Perhitungan dilakukan dengan dua kali replikasi pada setiap kombinasi parameter agar hasil yang diperoleh lebih terukur dan valid. Oleh karena itu, data respon MRR dapat dianalisis secara akurat. Informasi lengkap mengenai penimbangan berat awal, berat akhir, waktu proses, serta hasil perhitungan MRR disajikan pada Tabel 4. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai MRR

tertinggi diperoleh pada kombinasi *spindle speed* 2388 rpm, *feed rate* 668 mm/min, dan *depth of cut* 2,67 mm dengan nilai MRR sebesar 9,72 mm³/min.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Eksperimen Terhadap Respon MRR

No	Spindle Speed	Feed Rate	Depth of cut	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rata-Rata
1	2388	191	1,6	5,44	5,5	6,26	5,73
2	2388	413	2	7,18	6,08	7,83	7,03
3	2388	668	2,67	9,47	9,44	10,26	9,72
4	2587	191	2	6,85	7,26	6,99	7,03
5	2587	413	2,67	8,1	9,07	8,82	8,66
6	2587	668	1,6	4,58	5,7	5,56	5,28
7	2786	191	2,67	9,05	8,95	9,09	9,03
8	2786	413	1,6	5,24	4,73	4,13	4,7
9	2786	668	2	4,88	6,17	5,92	5,65

3.2. Penentuan Kombinasi Untuk Response Optimal

Untuk menentukan kombinasi variabel respons yang paling optimal, dilakukan perhitungan nilai rata-rata pada setiap faktor

penelitian, yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*. Rincian hasil perhitungan rata-rata untuk ketiga faktor tersebut ditampilkan pada Gambar 2.

Response Table for Means

Level	Spindle speed	Feed rate	Depth of cut
1	7,493	7,263	5,237
2	6,990	6,797	6,570
3	6,460	6,883	9,137
Delta	1,033	0,467	3,900
Rank	2	3	1

Gambar 2. Nilai Rata-Rata Masing-Masing Faktor Terhadap MRR

Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata nilai *Material Removal Rate* (MRR) pada setiap level variabel yang ditampilkan pada Gambar 2. diketahui bahwa *depth of cut* (C) memberikan pengaruh terbesar terhadap MRR, diikuti oleh *feed rate* (B) dan *spindle speed* (A). Temuan ini konsisten dengan teori yang menyatakan bahwa semakin besar kedalaman potong, maka semakin besar pula

volume material yang terangkat per satuan waktu.

Kombinasi level variabel yang menghasilkan nilai MRR tertinggi disajikan pada Tabel 5. Nilai optimal diperoleh pada *spindle speed* 2388 rpm, *feed rate* 191 mm/menit, dan *depth of cut* 2,67 mm yang merupakan konfigurasi parameter proses paling efektif dalam menghasilkan MRR maksimum.

Tabel 5. Variabel Response Optimal

Variabel	Tingkat Level	Nilai Level
A <i>Spindle speed</i>	1	2388
B <i>Feed rate</i>	1	191
C <i>Depth of cut</i>	3	2,67

3.3. Analisis Varian dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor proses yang memengaruhi perubahan nilai *Material Removal Rate* (MRR) pada benda kerja. Dalam penelitian ini, ANOVA diterapkan untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing variabel proses terhadap respon utama, yaitu MRR.

Untuk menilai pengaruh *spindle speed* (A), *feed rate* (B), dan *depth of cut* (C), dilakukan perhitungan derajat kebebasan, jumlah kuadrat (*sum of squares*), nilai *mean square*, serta *F-ratio* untuk setiap faktor. Hasil lengkap perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Analisis Varian Rata-Rata MRR

Sumber	V	SS	MS	F rasio
A	2	1,6264	0,8132	0,0000452
B	2	0,4170	0,2085	0,0000452
C	2	23,6866	11,8433	0,6578
Error	2	36.015,2306	18.007,6153	
Total	8	36.040,9606		

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 6. terlihat bahwa nilai F_{hitung} untuk seluruh faktor jauh lebih kecil dibandingkan F_{tabel} (19,00) pada taraf signifikansi 5%. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat faktor yang berpengaruh signifikan secara statistik terhadap nilai *Material Removal Rate* (MRR).

Analisis persen kontribusi kemudian dilakukan untuk mengetahui pengaruh relatif setiap faktor terhadap total variasi respon.

Hasil pada Tabel 7 menunjukkan bahwa faktor *error* memiliki kontribusi paling besar, yaitu 328,39%. Di antara faktor utama, *depth of cut* (C) memberikan kontribusi terbesar dengan nilai -34,21%. Sementara itu, *spindle speed* (A) dan *feed rate* (B) masing-masing berkontribusi -95,49% dan -98,77% yang mengindikasikan bahwa keduanya memiliki pengaruh sangat kecil dan tidak signifikan terhadap perubahan MRR.

Tabel 7. Persen Kontribusi

Sumber	V	SS	MS	SS'	P%
A	2	1,6264	0,8132	-34,3888	-95,49
B	2	0,4170	0,2085	-35,5982	-98,77
C	2	23,6866	11,8433	-12,3286	-34,21
Error	2	36.015,2306	18.007,6153	118,3562	328,39
Total	8	36.040,9606			100

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun tidak menunjukkan pengaruh signifikan secara statistik, *depth of cut* tetap menjadi faktor yang paling dominan dalam memengaruhi nilai *Material Removal Rate* (MRR) dibandingkan *spindle speed* maupun *feed rate*. Nilai *error* yang tinggi mengindikasikan adanya variabel lain di luar parameter yang diteliti seperti kondisi pahat, getaran mesin, atau sistem pendinginan yang memberikan kontribusi besar terhadap variasi respon.

3.4. Hasil Prediksi Nilai MRR Permukaan dan Interval Keyakinan

Prediksi nilai *Material Removal Rate* (MRR) optimal diperoleh dari kombinasi faktor yang memberikan respon terbaik sebagaimana tercantum pada Tabel 5. Hasil estimasi menunjukkan bahwa nilai MRR prediksi adalah -101,77. Selanjutnya dihitung interval keyakinan 95% untuk rata-rata MRR hasil optimasi. Dengan menggunakan nilai *mean square error* (MSE) sebesar

18.007,6153 dan nilai F pada taraf signifikansi 5% sebesar 19,00, diperoleh interval keyakinan sebesar $\pm 1.536,04$. Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata MRR hasil optimasi adalah $-101,77 \pm 1.536,04$.

3.5. Perhitungan Rasio S/N Dari Respon

Rasio *Signal-to-Noise* (S/N) digunakan untuk menggambarkan tingkat variasi hasil pengulangan percobaan. Pada penelitian ini diterapkan karakteristik *larger-the-better*, karena semakin tinggi nilai *Material Removal Rate* (MRR) maka semakin baik kualitas pemesinan. Hasil perhitungan rasio S/N untuk setiap kombinasi faktor ditampilkan pada Tabel 8. Rentang nilai S/N berada antara 11,56 dB hingga 17,97 dB dengan nilai rata-rata 14,68 dB. Nilai S/N tertinggi diperoleh pada percobaan ke-3 dengan kombinasi *spindle speed* level 1, *feed rate* level 3, dan *depth of cut* level 3 yang menghasilkan nilai 17,97 dB. Kombinasi tersebut memberikan respon MRR paling stabil sekaligus paling optimal.

Tabel 8. Rasio S/N Untuk Respon

Eksperimen	Faktor			Replikasi			S/N
	A	B	C	1	2	3	
1	1	1	1	5,44	5,5	6,26	13,36
2	1	2	3	7,18	6,08	7,83	15,04
3	1	3	3	9,47	9,44	10,26	17,97
4	2	1	2	6,85	7,26	6,99	15,18
5	2	2	3	8,1	9,07	8,82	16,96
6	2	3	1	4,58	5,7	5,56	12,56
7	3	1	3	9,05	8,95	9,09	17,35
8	3	2	1	5,24	4,73	4,13	11,56
9	3	3	2	4,88	6,17	5,92	13,15
							14,68

3.6. Pengaruh Level Dari Faktor Terhadap Variansi MRR

Analisis pengaruh level faktor dilakukan untuk menilai kontribusi masing-masing level *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* terhadap variasi rasio S/N pada nilai MRR. Hasil perhitungan rata-rata S/N yang disajikan pada Tabel 9. menunjukkan bahwa *spindle speed* memiliki nilai tertinggi pada level 1 sebesar 15,46 dB, sedangkan *feed rate* mencapai nilai tertinggi pada level 1 sebesar 15,30 dB. Parameter *depth of cut* memberikan pengaruh paling dominan dengan rata-rata S/N tertinggi pada level 3 sebesar 17,43 dB. Temuan ini menegaskan bahwa kedalaman

potong merupakan faktor yang paling berperan dalam meningkatkan stabilitas MRR dibandingkan variasi *spindle speed* maupun *feed rate*.

Analisis variansi (ANOVA) turut diterapkan pada nilai rasio S/N guna mengidentifikasi faktor yang paling memengaruhi kestabilan respon MRR. Hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 10 menunjukkan bahwa seluruh nilai *F-hitung* lebih kecil dibandingkan *F-tabel* (19,00). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat faktor yang berpengaruh signifikan secara statistik pada tingkat kepercayaan 95%.

Tabel 9. Respon Rasio S/N MRR Dari Pengaruh Faktor

	A	B	C
Level 1	15,46	15,30	12,49
Level 2	14,90	14,52	14,46
Level 3	14,02	14,56	17,43
Selisih	1,44	0,78	4,94
Ranking	2	3	1

Tabel 10. Analisis Variansi Rasio S/N MRR

Sumber	V	SS	MS	F rasio
A	2	2,8294	1,4147	0,002313
B	2	0,9586	0,4793	0,000784
C	2	36,7906	18,3953	0,03008
Error	2	2.446,1607	1.223,08035	
Total	8	464,6205		

Untuk mengetahui kontribusi relatif setiap faktor terhadap variasi rasio S/N, dilakukan perhitungan persen kontribusi seperti ditampilkan pada Tabel 11. Hasil analisis menunjukkan bahwa *depth of cut* (C) memiliki kontribusi terbesar, yaitu 7,39%, sementara *spindle speed* (A) dan *feed rate* (B)

memberikan kontribusi negatif yang relatif kecil. Nilai error yang sangat tinggi, mencapai 92,99%, mengindikasikan adanya variabel lain di luar faktor penelitian—seperti kondisi pahat, getaran mesin, maupun sistem pendinginan—yang turut memengaruhi kestabilan respon MRR.

Tabel 11. Persen Kontribusi Rasio S/N

Sumber	V	SS	MS	SS'	P%
A	2	2,8294	1,4147	-0,3833	-0,0825
B	2	0,9586	0,4793	-1.487,5607	-0,3201%
C	2	36,7906	18,3953	34,3444	7,39%
Error	2	3.991,9785	1.995,9893	432,1474	92,99%
Total	8	464,6205			100

Prediksi rasio *S/N* optimal diperoleh dari kombinasi *spindle speed* level 1 (2388 rpm), *feed rate* level 1 (191 mm/min), dan *depth of cut* level 3 (2,67 mm) dengan nilai prediksi 90,08 dan interval kepercayaan 95% sebesar $\pm 0,41$ (rentang 89,67–90,49). Hasil ANOVA pada Tabel 12 menunjukkan bahwa seluruh faktor memiliki F -hitung lebih kecil dari F -tabel

(19,00), sehingga tidak berpengaruh signifikan secara statistik. Namun, *depth of cut* tetap memberikan kontribusi terbesar (7,39%), sedangkan *spindle speed* dan *feed rate* berkontribusi negatif. Kontribusi error yang tinggi (92,99%) mengindikasikan adanya faktor lain di luar variabel penelitian yang memengaruhi MRR.

Tabel 12. Hasil ANOVA

Sumber	Df	SS	MS	Fhitung	SS'	Kontribusi (%)
A	2	2,829	1,4147	0,00231	-0,3833	-0,08
B	2	0,958	0,4793	0,00078	-1,487,5	-0,32
C	2	36,790	18,3953	0,0300	34,344	7,39
Error	2	3.991,9	1.995,9	-	432,14	92,99
Total	8	464,620	-	-		100

Pengujian hipotesis nol (H_0) untuk tiap faktor menunjukkan bahwa *spindle speed* (A), *feed rate* (B), dan *depth of cut* (C) tidak berpengaruh signifikan terhadap MRR karena

seluruh nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$. Ringkasan hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 13.

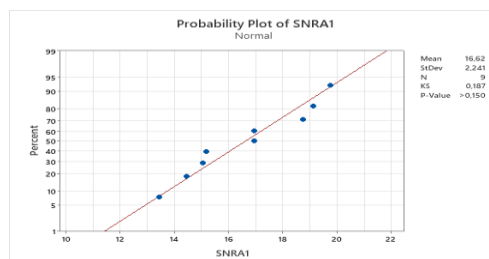
Tabel 13. Kondisi Hipotesis Nol Terhadap Respon MRR

Sumber Variabel	Kondisi H_0
A - Putaran <i>Spindel</i>	Gagal ditolak ($F = 0,002313 < 19,00$)
B - <i>Feed Rate</i>	Gagal ditolak ($F = 0,000784 < 19,00$)
C - Kedalaman Pemotongan	

Berdasarkan tabel di atas, ketiga variabel utama proses CNC *Milling* putaran *spindel* (A), *feed rate* (B), dan kedalaman pemakanan (C) tidak berpengaruh signifikan terhadap MRR karena seluruh nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$. Faktor C tetap menjadi yang paling dominan dengan kontribusi 7,39%, sedangkan faktor A dan B sangat kecil. Kontribusi *error* yang tinggi, yaitu 92,99%, menunjukkan adanya variabel lain di luar penelitian, seperti kondisi pahat, getaran mesin, atau variasi material yang turut memengaruhi MRR.

3.7. Uji Kenormalan Data (Menggunakan Uji *Kolmogorof-Smirnov*)

- Hipotesis uji kenormalan data adalah:
 H_0 : data berdistribusi
 H_1 : data tidak berdistribusi normal
- Dengan kriteria penolakan sebagai berikut:
Tolak H_0 : jika nilai $P\text{-value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$



Gambar 3. *Probability Plot of MRR*

Hasil uji kenormalan terhadap data SNRA1 menunjukkan $p\text{-value} > 0,150$, lebih tinggi dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis nol bahwa data berdistribusi normal tidak ditolak. Secara visual, plot probabilitas juga memperlihatkan titik-titik yang mengikuti garis diagonal tanpa penyimpangan berarti. Nilai uji

Kolmogorov-Smirnov sebesar 0,187 masih dalam batas yang dapat diterima, sehingga data SNRA1 dapat dinyatakan berdistribusi normal.

4. SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan MRR tertinggi diperoleh pada putaran *spindel* 2388 rpm, *feed rate* 191 mm/menit, dan *depth of cut* 2,67 mm dengan prediksi MRR $90,0766 \pm 0,4126$ pada taraf kepercayaan 95%. Nilai S/N tertinggi pada eksperimen ke-3 menegaskan bahwa kedalaman pemakanan (C) menjadi faktor paling dominan dalam meningkatkan MRR. Meskipun hasil ANOVA menunjukkan ketiga faktor tidak signifikan secara statistik ($F_{hitung} < F_{tabel}$), kedalaman pemakanan tetap memberikan kontribusi relatif terbesar, yaitu 7,39%, sehingga perannya lebih menonjol dibandingkan dua faktor lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada seluruh civitas akademika, pembimbing, dan rekan-rekan atas dukungan, arahan, serta partisipasi yang telah memungkinkan penyelesaian penelitian ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Moshat, S. Datta, A. Bandyopadhyay, and P. Pal, "Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 92-102, 2010, doi: 10.4314/ijest.v2i1.59096.
- [2] J. M. Lim et al., "Recent Advances in CNC Technology: Toward Autonomous and Sustainable Manufacturing," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2025, doi: 10.1007/s12541-025-01334-2.
- [3] S. Lubis, "Studi Eksperimental Dampak Dari Proses Pemotongan Pada Side Milling Dan Face Milling Terhadap Tingkat Kekerasan Pada Permukaan Logam," *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 128-135, 2024, doi: 10.51510/sinergipolmed.v5i1.1549.
- [4] A. S. F. Alves, S. Kokare, J. P. Oliveira, and R. Godina, "Environmental Comparison of Wire and Arc Additive Manufacturing and CNC Milling on Steel Produced Parts," *Procedia Comput Sci*, vol. 253, pp. 3025-3036, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.02.027.
- [5] P. Bismantolo, F. P. Utama, and A. Kurniawan, "Prediksi kekasaran permukaan baja S45C terhadap parameter pemesinan dan getaran pada proses bubut menggunakan metode artificial neural network," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 13, no. 1, p. 31, 2023, doi: 10.29303/dtm.v13i1.605.
- [6] K. Satyanarayana et al., "Optimization Of Machining Parameters of CNC Milling Operation for Material Removal Rate and Surface Roughness on En-24 Steel Using Taguchi Method," *E3S Web of Conferences*, vol. 391, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202339101011.
- [7] N. A. Miftah, D. Sukma, E. Atmaja, and A. Oktafiani, "Optimasi Multi-Objektif Proses Pemesinan Milling dengan Metode Taguchi Kolaborasi Grey Relational Analysis," *Jurnal Sistem Cerdas*, vol. 05, no. 02, pp. 117-127, 2022.
- [8] L. Dwi Saputra and E. Yudiyanto, "Analisis Performa Mesin CNC Milling Mini 3 Sumbu Terhadap Akurasi Gerak Pemotongan," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 1-11, 2024, doi: 10.47134/jme.v1i3.3117.
- [9] A. Nurhasanah, S. Rahayu, and H. Windyatri, "Analisis penerapan lean manufacturing untuk menurunkan cycle time pada proses produksi dengan menggunakan metode PDCA di PT XYZ," *Jenius (Jurnal Terapan Teknik Industri)*, vol. 6, pp. 57-69, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.37373/jenius.v6i1>
- [10] J. S. Pribadi, Y. Yulianto, and B. A. Girawan, "Optimasi Parameter Pemesinan Menggunakan Metode Taguchi Untuk Meningkatkan Kualitas Kebulatan Pada Pembubutan Internal Material S45C," *Infotekmesin*, vol. 11, no. 1, pp. 31-36, 2020, doi: 10.35970/infotekmesin.v11i1.104.
- [11] Y. Handoyo, A. Surahto, and B. T. Wibowo, "Analisis Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Spindle Dan Variasi Pendingin Terhadap Kekasaran Permukaan Baja S45C Pada Proses Cnc Milling Doosan Dnm 500," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 85-88, 2022, doi: 10.33558/jitm.v10i2.4549.