

OPTIMASI STRATEGI TOOLPATH CNC DENGAN GREY RELATIONAL ANALYSIS UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PEMESINAN

Sihmaulana Dwianto¹, Tunjung Genarsih² Ardianto Syaifur Rohman³

^{1,2,3}Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Politeknik Negeri Jember

Email: sihmaulana@polije.ac.id

ABSTRACT

This study aims to optimize CNC toolpath strategies using Grey Relational Analysis (GRA) to enhance machining efficiency. Five toolpath strategies—Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, One Way, and True Spiral—are systematically evaluated based on spindle speed, feed rate, depth of cut, and step over, assessing their impact on machining performance. The machining process is conducted using a 3-axis CNC milling machine equipped with a 10 mm diameter endmill tool. Data collection is performed through Mastercam software, where numerical simulations precede the application of Grey Relational Coefficient (GRC) and Grey Relational Grade (GRG) computations to determine the optimal toolpath strategy. The results indicate that the Zigzag toolpath, configured with a spindle speed of 1300 RPM, feed rate of 700 mm/min, depth of cut of 0.8 mm, and step over of 8 mm, achieves the highest GRG value, signifying superior machining efficiency. Further analysis demonstrates that optimizing toolpath parameters significantly enhances process stability, reduces energy consumption, and shortens production cycle time, contributing to increased productivity in CNC machining operations. These findings provide valuable insights for the manufacturing industry, presenting a data-driven framework for selecting optimal toolpath strategies to improve machining precision, operational cost efficiency, and sustainable production practices.

Keywords: CNC machining, toolpath optimization, Grey Relational Analysis, Grey Relational Coefficient, Grey Relational Grade, Mastercam, machining efficiency

Riwayat Artikel :

Tanggal diterima : 19-03-2025

Tanggal revisi : 27-04-2025

Tanggal terbit : 25-06-2025

DOI :

<https://doi.org/10.31949/j-ensitec.v11i02.13808>

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur modern telah mengalami transformasi signifikan dalam beberapa dekade terakhir, terutama dengan adopsi teknologi *Computer Numerical Control* (CNC) yang semakin meluas (Yao et al., 2024). Perkembangan teknologi ini telah

merevolusi proses produksi komponen mekanik dengan menawarkan tingkat presisi, konsistensi, dan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Mani and Krishnan N, 2024). Tidak hanya di manufaktur, pendekatan optimasi berbasis komputasi seperti ini juga semakin krusial

This is an open access article under the CC BY-4.0 license.



dalam bidang lain, termasuk rekayasa struktur tahan gempa, di mana efisiensi desain dan prediksi kinerja menjadi faktor penentu keselamatan. Dalam konteks ini, pemesinan CNC telah menjadi tulang punggung bagi berbagai sektor industri mulai dari otomotif, aerospace, hingga peralatan medis (Kumar et al., 2023). Namun, di balik kemajuan teknologi ini tersimpan berbagai tantangan kompleks yang memerlukan pendekatan sistematis untuk pemecahannya, khususnya dalam hal optimasi proses pemotongan.

Salah satu aspek krusial dalam pemesinan CNC adalah strategi *toolpath*, yaitu jalur pahat yang ditempuh oleh alat potong selama proses pemotongan (Koç, 2021). *Toolpath* ini pada dasarnya merupakan pola gerakan alat potong terhadap material *workpiece* selama proses pemesinan berlangsung (Liao and Huang, 2024). Pemilihan strategi *toolpath* yang tepat dapat secara signifikan mengurangi waktu pemesinan, menurunkan konsumsi energi, dan memperpendek lintasan pemotongan (Feng et al., 2021). Hal ini secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas dan efisiensi dalam proses manufaktur.

Kompleksitas optimasi *toolpath* semakin meningkat ketika mempertimbangkan berbagai parameter pemotongan yang saling berinteraksi secara dinamis (Pajaziti et al., 2025). Parameter-parameter kunci seperti *spindle speed* (kecepatan putar), *feed rate* (kecepatan pemakanan), *depth of cut* (kedalaman pemotongan), dan *step over* (lebar penyapuan) membentuk suatu sistem multivariabel yang saling terkait. Interaksi antara parameter-parameter ini seringkali bersifat non-linear, dimana perubahan pada satu parameter bisa memberikan efek yang tidak proporsional terhadap parameter lainnya (Pangestu et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sistematis untuk menentukan kombinasi parameter yang paling efektif. Peningkatan produktivitas dalam industri juga dapat dilakukan dengan metode Objective Matrix (OMAX), yang bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh dalam efisiensi produksi dan perencanaan peningkatan kinerja (Saputra & Satoto, 2024).

Banyaknya variabel yang perlu dipertimbangkan dalam optimasi *toolpath* menuntut pendekatan analitis yang lebih canggih dibandingkan metode tradisional. Pendekatan konvensional seperti *Design of Experiments* (DoE) atau *Response Surface Methodology* (RSM) seringkali menemui keterbatasan ketika berhadapan dengan sistem yang memiliki tingkat ketidakpastian tinggi dan hubungan non-linear antara variabel input dan output. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam analisis multi-kriteria adalah Grey Relational Analysis (GRA). Metode ini memungkinkan evaluasi performa dari beberapa variabel sekaligus, bahkan dalam kondisi yang tidak sepenuhnya pasti atau linier (Chakraborty et al., 2023). Dalam penelitian ini, perangkat lunak Mastercam digunakan untuk melakukan simulasi dan memperoleh data kuantitatif terkait waktu pemesinan dan panjang lintasan (*path length*) dari berbagai strategi *toolpath*, seperti *Zigzag*, *Spiral* (*Parallel*, *Constant Overlap*, *True Spiral*), dan *One Way*. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan GRA untuk mengevaluasi hubungan antara parameter-parameter yang ada dan memberikan peringkat berdasarkan Grey Relational Grade (GRG). Selain itu, pendekatan berbasis Artificial Neural Network (ANN) juga sering digunakan dalam optimasi teknik, seperti dalam pemodelan dimensi balok dan kolom bangunan untuk meningkatkan ketahanan struktural terhadap beban dinamis (Prasetyawan, 2022).

Pemilihan GRA didasarkan pada kemampuannya dalam menangani sistem yang bersifat tidak pasti atau tidak sepenuhnya diketahui, sehingga dapat memberikan penilaian objektif terhadap alternatif strategi yang tersedia. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi strategi *toolpath* yang paling optimal berdasarkan parameter-parameter utama yang memengaruhi efisiensi pemesinan. Hasil dari studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi industri manufaktur, khususnya dalam meningkatkan efisiensi proses produksi dan menurunkan biaya operasional.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Grey Relational Analysis (GRA) untuk mengoptimalkan strategi toolpath dalam pemesinan CNC. Simulasi proses pemesinan dilakukan menggunakan perangkat lunak Mastercam untuk memvisualisasikan strategi toolpath yang diuji, seperti Zigzag, Constant Overlap Spiral, dan lainnya. Gambar 1 menunjukkan contoh tampilan toolpath pada proses pocket milling. Visualisasi ini membantu dalam memahami arah gerakan pahat terhadap benda kerja serta estimasi waktu pemesinan dan panjang lintasan. Data yang diperoleh dari simulasi inilah yang selanjutnya digunakan dalam



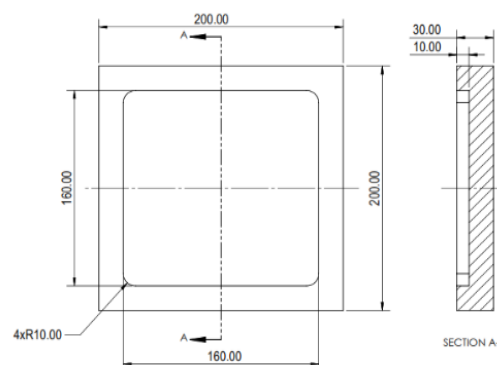
Gambar 1. Strategi Toolpath pada proses pocket milling yang disimulasikan di Mastercam.

perhitungan Grey Relational Analysis (GRA) untuk menentukan efisiensi setiap strategi.

Benda kerja yang digunakan sebagai acuan dalam proses pemesinan memiliki spesifikasi yang sesuai dengan standar yang umum diterapkan dalam industri manufaktur. Pemesinan dilakukan menggunakan endmill dengan diameter 10 mm, yang dipilih karena ketersediaannya yang luas di pasaran serta penggunaannya yang sering dalam berbagai proses machining. Endmill ini memiliki karakteristik pemotongan yang stabil, sehingga memungkinkan pengerjaan yang presisi dan efisien dalam aplikasi pocket milling.

Selain itu, pemilihan diameter ini mempertimbangkan kompatibilitas dengan parameter pemesinan yang telah ditetapkan dalam penelitian, sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara objektif dengan strategi toolpath lainnya. Dengan menggunakan tooling yang banyak digunakan dalam industri, penelitian ini dapat merefleksikan kondisi nyata dalam proses produksi dan memberikan rekomendasi yang dapat diterapkan secara praktis untuk meningkatkan efisiensi machining. Benda kerja yang digunakan dalam simulasi memiliki bentuk

geometri standar seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Model ini dirancang agar sesuai dengan



Gambar 2. Model benda kerja yang digunakan dalam simulasi pemesinan CNC.

kebutuhan pocket milling dan memudahkan pengambilan data waktu pemesinan dan lintasan untuk setiap strategi toolpath yang diuji.

Metode penelitian terdiri dari beberapa tahapan, mulai dari pengambilan data hingga analisis dan optimasi parameter pemesinan. Metode Grey Relational Analysis (GRA) dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya dalam menangani sistem abu-abu, di mana terdapat ketidakpastian dalam hubungan antar variabel. Dalam proses pemesinan CNC, faktor-faktor seperti spindle speed, feed rate, depth of cut, dan step over saling berinteraksi dengan cara yang kompleks, sehingga sulit untuk menentukan parameter optimal dengan pendekatan konvensional. GRA memungkinkan evaluasi multi-kriteria dengan membandingkan berbagai strategi toolpath berdasarkan waktu pemesinan dan path length, sehingga menghasilkan peringkat yang membantu dalam pemilihan kombinasi parameter terbaik. Dengan mempertimbangkan ketidakpastian yang ada dalam sistem ini, GRA memberikan solusi yang lebih akurat dibandingkan metode optimasi lain yang membutuhkan data yang lebih pasti dan linier.

2.1 Pengumpulan data

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data menggunakan Mastercam, yang digunakan untuk memperoleh informasi waktu pemesinan dan path length dari lima strategi toolpath: Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, One Way, dan True Spiral. Setelah data diperoleh, dilakukan normalisasi untuk memastikan semua nilai berada dalam rentang yang sama dan dapat dibandingkan secara objektif. Untuk parameter yang digunakan

dalam pengumpulan data di mastercam seperti pada tabel 1

Tabel 1. Parameter pengerjaan

No	Spindle speed	Feed Rate	Depth Of Cut	Step Over
1	1000	400	0.2	2
2	1100	500	0.4	4
3	1200	600	0.6	6
4	1300	700	0.8	8

Data yang terdapat dalam Tabel 1 akan dikombinasikan dengan berbagai strategi toolpath pemesinan, seperti Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, One Way, dan True Spiral. Setiap strategi akan dievaluasi pemilihan parameter pemesinan seperti spindle speed, feed rate, depth of cut, dan step over dalam penelitian ini didasarkan pada kombinasi nilai-nilai yang umum digunakan dalam praktik industri serta merujuk pada studi-studi sebelumnya yang relevan. (Pajaziti et al.,2025) menggaris bawahi bahwa variasi parameter-parameter ini sangat memengaruhi efisiensi waktu dan performa lintasan pada proses pemesinan CNC, khususnya dalam konteks penghematan waktu dan energi. Selain itu, studi oleh (Pangestu et al.,2021) juga menekankan bahwa pemilihan parameter pemotongan yang tepat secara signifikan dapat meningkatkan keberlanjutan proses pemesinan melalui optimalisasi lintasan dan pengurangan keausan alat. Selain itu, Chakraborty et al. (2023) menjelaskan bahwa pemilihan parameter yang tepat menjadi kunci dalam menghasilkan evaluasi multi-kriteria yang akurat melalui pendekatan Grey Relational Analysis. Oleh karena itu, parameter yang digunakan dalam simulasi—seperti kecepatan spindle berkisar antara 1000 hingga 1300 RPM, feed rate antara 400–700 mm/min, serta variasi depth of cut dan step over—dipilih untuk merepresentasikan rentang realistis yang sesuai dengan kondisi aktual di industri dan juga sejalan dengan pendekatan eksperimental dalam literatur tersebut. Dengan menganalisis hubungan antara parameter tersebut dan hasil simulasi yang diperoleh, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi yang menghasilkan waktu pengerjaan paling cepat serta path length paling pendek dalam proses pemesinan CNC

2.2 Normalisasi data

Normalisasi data dilakukan untuk menyelaraskan skala dari parameter yang berbeda

sehingga perbandingan antar nilai menjadi lebih akurat. Dalam penelitian ini, normalisasi diterapkan pada dua aspek utama, yaitu waktu pemesinan dan path length, guna memastikan bahwa semua data berada dalam rentang yang seragam antara 0 dan 1. Proses normalisasi ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh satuan yang berbeda serta memungkinkan evaluasi yang lebih objektif terhadap efisiensi strategi toolpath.

Metode normalisasi yang digunakan mengikuti pendekatan min-max normalization, di mana setiap nilai dalam dataset dikonversi berdasarkan selisih antara nilai maksimum dan minimum dalam kumpulan data. Normalisasi dilakukan menggunakan persamaan:

$$x_i'(k) = \frac{\max x(k) - x_i(k)}{\max x(k) - \min x(k)} \quad (1)$$

Dengan pendekatan ini, nilai terkecil dalam dataset akan bernilai 1 sebagai referensi optimal, sementara nilai terbesar dalam dataset akan bernilai 0. Sehingga, semakin kecil waktu pemesinan atau semakin pendek path length, semakin tinggi nilai normalisasi yang diperoleh, yang mencerminkan bahwa strategi toolpath tersebut lebih efisien dibandingkan yang lain.

2.3 Grey Relational Coefficient (GRC)

Grey Relational Coefficient (GRC) merupakan parameter yang digunakan dalam metode Grey Relational Analysis (GRA) untuk mengukur tingkat kedekatan antara setiap strategi toolpath dengan solusi optimal yang diinginkan. Perhitungan GRC dilakukan setelah proses normalisasi data, di mana setiap nilai dari variabel yang dianalisis telah disesuaikan agar berada dalam rentang 0 hingga 1. Nilai GRC menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu parameter terhadap hasil pemesinan CNC yang optimal, yaitu berdasarkan waktu pemesinan dan panjang lintasan (path length).

Dalam perhitungan GRC, nilai selisih absolut antara data normalisasi dengan nilai ideal harus dihitung terlebih dahulu. Rumus untuk memperoleh nilai GRC adalah sebagai berikut:

$$GRC_i = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_i + \zeta \Delta_{max}} \quad (2)$$

Semakin tinggi nilai GRC suatu strategi toolpath, semakin dekat strategi tersebut dengan parameter optimal yang menghasilkan efisiensi pemesinan terbaik. Setelah GRC dihitung untuk setiap variabel, nilai-nilai ini kemudian digunakan dalam perhitungan Grey Relational Grade (GRG) guna

menentukan peringkat toolpath berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan. Pendekatan ini memastikan bahwa pemilihan parameter dalam proses pemesinan CNC dilakukan secara sistematis dan objektif, sehingga menghasilkan kombinasi yang paling efisien dalam mengoptimalkan waktu pemesinan dan path length.

2.4 Grey Relational Grade (GRG)

Grey Relational Grade (GRG) merupakan parameter yang digunakan untuk menentukan tingkat keterkaitan antara setiap alternatif dengan kondisi optimal yang telah ditetapkan dalam analisis Grey Relational Analysis (GRA). GRG dihitung berdasarkan nilai Grey Relational Coefficient (GRC) yang telah diperoleh dari setiap variabel yang dianalisis, seperti waktu pemesinan dan path length. Nilai GRG yang lebih tinggi menunjukkan bahwa suatu kombinasi parameter memiliki hubungan yang lebih kuat dengan referensi optimal dibandingkan dengan alternatif lainnya. Dengan demikian, GRG berfungsi sebagai indikator utama dalam pemilihan strategi yang paling efisien dalam pemesinan CNC.

Dalam perhitungan GRG, setiap nilai GRC dirata-ratakan untuk mendapatkan satu nilai tunggal yang merepresentasikan kinerja keseluruhan dari setiap kombinasi parameter. Rumus untuk menghitung GRG adalah sebagai berikut:

$$GRG = (1/n) \times \sum GRC_i \quad (3)$$

Proses ini dilakukan untuk memberikan bobot yang sama terhadap seluruh faktor yang memengaruhi pemesinan, sehingga keputusan dapat diambil berdasarkan evaluasi yang objektif. Jika suatu strategi toolpath memiliki GRG tertinggi, maka strategi tersebut dianggap sebagai pilihan terbaik karena memiliki tingkat kedekatan paling tinggi dengan nilai referensi yang diinginkan.

Nilai GRG yang diperoleh dalam analisis ini dapat digunakan untuk menentukan parameter optimal dalam pemesinan CNC, sehingga memungkinkan peningkatan efisiensi produksi, pengurangan waktu pemesinan, serta minimisasi konsumsi energi dan biaya. Oleh karena itu, metode ini menjadi pendekatan yang sistematis dan akurat dalam pemilihan parameter pemesinan berdasarkan evaluasi multi-kriteria

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengambilan data dilakukan menggunakan software Mastercam, yang digunakan untuk mensimulasikan berbagai strategi toolpath dalam pemesinan CNC. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, diperoleh data terkait waktu pemesinan dan panjang lintasan (path length) untuk masing-masing parameter yang diuji. Data tersebut kemudian dianalisis guna menentukan kombinasi parameter yang memberikan efisiensi pemesinan terbaik. Hasil dari seluruh percobaan terdapat dalam tabel 2, yang menampilkan perbandingan antara berbagai strategi toolpath berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Hasil simulasi

No	Para meter	Toolpath Strategy	Waktu (.. H..m)	Path Length
1	1	Zigzag	48 H 12 m	1154508.098
2	2	Zigzag	10 H 36 m	316370.12
3	3	Zigzag	06 H 01 m	156039.14
4	4	Zigzag	02 H 15 m	93040.6
5	1	Constant Overlap spiral	43 H 56 m	1052016.73
6	2	Constant Overlap spiral	10 H 25 m	310812.09
7	3	Constant Overlap spiral	04 H 34 m	162586.67
8	4	Constant Overlap spiral	02 H 24 m	99325.19
9	1	Paralel Spiral	48 H 37 m	1164926.36
10	2	Paralel Spiral	10 H 43 m	319800.108
11	3	Paralel Spiral	04 H 26 m	157958.29
12	4	Paralel Spiral	02 H 17 m	94299.94
13	1	One Way	54 H 42 m	1228968.09
14	2	One Way	12 H 14 m	335610.12
15	3	One Way	05 H 08 m	165039.14
16	4	One Way	02 H 41 m	98170.46
17	1	True spiral	71 H 31 m	1714239.344
18	2	True spiral	15 H 20 m	458270.993

19	3	True spiral	06 H 12 m	221266.57
20	4	True spiral	03 H 07 m	129492.557

Berdasarkan data yang telah diperoleh dalam Tabel 2, langkah awal yang akan dilakukan adalah proses normalisasi menggunakan MATLAB. Normalisasi seperti pada tabel 3 ini bertujuan untuk menyelaraskan skala setiap variabel sehingga memungkinkan perbandingan data yang lebih objektif dan akurat.

Tabel 3. Normalisasi waktu dan path lenght

No	Waktu (. H..m)	Path Lenght	Waktu Normalisa si	Path lenght Normalisas i
1	48 H 12 m	1154508.098	0.33662	0.34526
2	10 H 36 m	316370.12	0.87945	0.86224
3	06 H 01 m	156039.14	0.94562	0.96114
4	02 H 15 m	93040.6	1	1
5	43 H 56 m	1052016.73	0.39822	0.40848
6	10 H 25 m	310812.09	0.8821	0.86567
7	04 H 34 m	162586.67	0.96655	0.9571
8	02 H 24 m	99325.19	0.99783	0.99612
9	48 H 37 m	1164926.36	0.33061	0.33883
10	10 H 43 m	319800.108	0.87777	0.86013
11	04 H 26 m	157958.29	0.96848	0.95996
12	02 H 17 m	94299.94	0.99952	0.99922
13	54 H 42 m	1228968.09	0.24278	0.29933
14	12 H 14 m	335610.12	0.85587	0.85038
15	05 H 08 m	165039.14	0.95837	0.95559
16	02 H 41 m	98170.46	0.99374	0.99684
17	71 H 31 m	1714239.344	0	0
18	15 H 20 m	458270.993	0.81112	0.77472
19	06 H 12 m	221266.57	0.94297	0.92091
20	03 H 07 m	129492.557	0.98749	0.97752

Dengan menerapkan teknik normalisasi, setiap nilai dalam dataset akan dikonversi ke dalam rentang 0 hingga 1, sehingga faktor-faktor dengan skala berbeda dapat dianalisis secara seimbang. Proses ini sangat penting dalam analisis Grey Relational Analysis (GRA), karena memastikan bahwa tidak ada variabel yang mendominasi hasil hanya karena memiliki satuan atau nilai yang lebih besar dibandingkan variabel lainnya. Dengan menggunakan pendekatan matematis, normalisasi ini akan memberikan fondasi yang lebih kuat dalam proses evaluasi dan optimasi parameter pemesinan yang sedang dikaji.

Setelah dilakukan normalisasi data, langkah selanjutnya adalah perhitungan GRC seperti pada

tabel 4, yang digunakan untuk mengevaluasi keterkaitan antara setiap kombinasi parameter pemesinan dengan hasil yang optimal. GRC akan menentukan sejauh mana masing-masing strategi toolpath mendekati kondisi ideal berdasarkan waktu pemesinan dan panjang lintasan.

Tabel 4. Grey Relational Coefficient (GRC)

No	Toolpath Strategy	GRC Waktu Pemesina	GRC Path Length
<i>n</i>			
1	Zigzag	0.42978	0.433
2	Zigzag	0.80574	0.784
3	Zigzag	0.90191	0.92789
4	Zigzag	1	1
	Constant	0.45381	0.45808
5	Overlap spiral		
	Constant	0.80919	0.78824
6	Overlap spiral		
	Constant	0.9373	0.92098
7	Overlap spiral		
	Constant	0.99569	0.99231
8	Overlap spiral		
9	Paralel Spiral	0.42757	0.4306
10	Paralel Spiral	0.80356	0.78141
11	Paralel Spiral	0.9407	0.92585
12	Paralel Spiral	0.99904	0.99845
13	One Way	0.3977	0.41643
14	One Way	0.77624	0.76968
15	One Way	0.92315	0.91842
16	One Way	0.98764	0.99371
17	True spiral	0.33333	0.33333
18	True spiral	0.72581	0.68939
19	True spiral	0.89762	0.86342
20	True spiral	0.97559	0.95697

Dari data yang diperoleh pada tabel 4, dapat dianalisis bahwa strategi toolpath dengan nilai GRC tertinggi memiliki hubungan paling kuat dengan solusi optimal yang diinginkan dalam pemesinan CNC. Nilai-nilai ini kemudian digunakan untuk menentukan Grey Relational Grade (GRG), yang akan memberikan peringkat

akhir terhadap masing-masing kombinasi parameter dan mengidentifikasi strategi paling efisien.

Setelah perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dilakukan, tahap selanjutnya adalah analisis Grey Relational Grade (GRG) untuk menentukan peringkat akhir dari setiap strategi toolpath berdasarkan efisiensi pemesinan. GRG memberikan gambaran keseluruhan mengenai performa masing-masing strategi dengan mempertimbangkan kedekatannya terhadap nilai optimal yang telah ditetapkan.

Hasil perhitungan GRG memungkinkan evaluasi yang lebih sistematis terhadap setiap kombinasi parameter pemesinan. Strategi toolpath yang memiliki nilai GRG tertinggi dapat diidentifikasi sebagai strategi yang paling efisien dalam meningkatkan efektivitas proses machining. Dengan demikian, GRG berperan sebagai indikator utama dalam proses pemilihan parameter terbaik yang dapat diterapkan untuk meningkatkan produktivitas dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya.

Tabel 5. Grey Relational Grade (GRG)

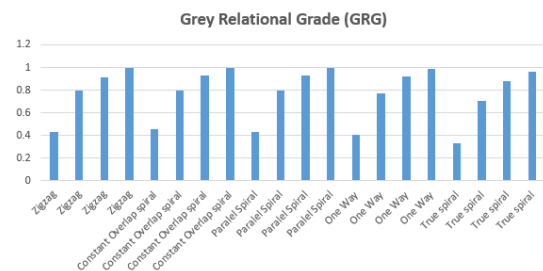
No	Toolpath Strategy	GRG
1	Zigzag	0.43139
2	Zigzag	0.79487
3	Zigzag	0.9149
4	Zigzag	1
5	Constant Overlap spiral	0.45594
6	Constant Overlap spiral	0.79871
7	Constant Overlap spiral	0.92914
8	Constant Overlap spiral	0.994
9	Paralel Spiral	0.42909
10	Paralel Spiral	0.79248
11	Paralel Spiral	0.93327
12	Paralel Spiral	0.99874
13	One Way	0.40707
14	One Way	0.77296
15	One Way	0.92078
16	One Way	0.99068
17	True spiral	0.33333
18	True spiral	0.7076
19	True spiral	0.88052
20	True spiral	0.96628

Dari hasil perhitungan Grey Relational Grade (GRG) seperti pada tabel 5 untuk masing-masing

strategi toolpath, terlihat bahwa Zigzag dengan parameter ke-4 memiliki nilai GRG tertinggi, yaitu 1, menunjukkan bahwa strategi ini memiliki hubungan paling kuat dengan solusi optimal dalam pemesinan CNC. Setelah dilakukan normalisasi data, perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC), dan analisis Grey Relational Grade (GRG), hasil yang diperoleh menunjukkan bagaimana setiap strategi toolpath berkontribusi terhadap efisiensi pemesinan CNC.

Proses normalisasi data bertujuan untuk menyelaraskan skala parameter pemesinan sehingga setiap nilai dapat dibandingkan secara objektif. Dengan normalisasi min-max, perbedaan antar variabel seperti waktu pemesinan dan path length dikonversi ke skala yang sama, memungkinkan analisis yang lebih akurat. Dalam tahap perhitungan GRC, setiap strategi toolpath dievaluasi berdasarkan kedekatannya dengan nilai optimal yang telah ditentukan. GRC membantu memahami bagaimana parameter pemotongan mempengaruhi efisiensi machining, dengan nilai GRC yang lebih tinggi menunjukkan hubungan yang lebih kuat dengan hasil terbaik.

Dari hasil analisis GRG pada gambar 3,



Gambar 3. Grafik GRG

terlihat bahwa strategi toolpath tertentu memiliki nilai yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang digunakan menghasilkan efisiensi pemesinan yang lebih optimal. Strategi dengan nilai GRG tertinggi dapat diidentifikasi sebagai pendekatan terbaik untuk meningkatkan produktivitas dan mengoptimalkan parameter pemotongan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pemilihan strategi toolpath memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi pemesinan CNC. Melalui metode Grey Relational Analysis (GRA), kombinasi parameter pemesinan seperti spindle speed, feed rate, depth of cut, dan step over telah

dievaluasi untuk menentukan strategi yang paling optimal. Proses normalisasi data memastikan bahwa semua variabel memiliki skala yang seragam, sehingga memungkinkan perbandingan yang objektif dalam menentukan performa tiap strategi toolpath.

Setelah dilakukan perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC), ditemukan bahwa beberapa strategi memiliki keterkaitan yang lebih kuat terhadap kondisi optimal dibandingkan lainnya. Analisis Grey Relational Grade (GRG) menunjukkan bahwa strategi Zigzag dengan parameter ke-4 memiliki nilai tertinggi, menandakan bahwa kombinasi parameter tersebut merupakan pilihan terbaik dalam meningkatkan efisiensi machining. Strategi Constant Overlap Spiral dan Parallel Spiral juga menunjukkan performa yang baik, meskipun berada di bawah Zigzag. Sebaliknya, strategi True Spiral cenderung kurang optimal dalam konteks efisiensi pemesinan.

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi industri manufaktur, khususnya dalam pemilihan strategi toolpath yang lebih efisien untuk menghemat waktu pemesinan dan mengurangi biaya operasional. Kedepannya, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan variabel lain seperti keausan alat, konsumsi energi, atau kualitas permukaan, serta membandingkan metode optimasi lain seperti Taguchi atau algoritma evolusioner guna memperoleh solusi yang lebih komprehensif dan aplikatif di lingkungan produksi yang kompleks.

5. REFERENSI

- [1] Prasetiawan, J. (2022). Prediksi optimasi dimensi balok kolom bangunan masjid dengan metode Artificial Neural Network. *J-ENSISTEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology)*, 8(2), 682-690.
- [2] Chakraborty, S., Datta, H. N., & Chakraborty, S. (2023). Grey Relational Analysis-Based Optimization of Machining Processes: a Comprehensive Review. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 7(4), 609-639. doi:10.1007/s41660-023-00311-4
- [3] Feng, C., Chen, X., Zhang, J., Huang, Y., & Qu, Z. (2021, September 3). Minimizing the Energy Consumption of Holes Machining Integrating the Optimization of Tool Path and Cutting Parameters on CNC Machines. doi:10.21203/rs.3.rs-859774/v1
- [4] Koç, Ö. (2021). Evaluation of Tool Path Strategies in CNC Woodworking Machines and A Case Study. *Wood Industry and Engineering*, 3(2), 1-11. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/wie>
- [5] Kumar, R., Sharma, S., Kumar, R., Verma, S., & Rafighi, M. (2023, March 1). Review of Lubrication and Cooling in Computer Numerical Control (CNC) Machine Tools: A Content and Visualization Analysis, Research Hotspots and Gaps. *Sustainability (Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi:10.3390/su15064970
- [6] Liao, J., & Huang, Z. (2024). Data model-based toolpath generation techniques for CNC milling machines. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10. doi:10.3389/fmech.2024.1358061
- [7] Mani, V., & Krishnan N. (2024). THE ROLE OF CNC MACHINES IN MODERN INDUSTRIAL AUTOMATION Venkatesh Mani. *International Journal of Advance Scientific Research*. Retrieved from <http://sciencebring.co>
- [8] Pajaziti, A., Tafilaj, O., Gjellaj, A., & Berisha, B. (2025). Optimization of Toolpath Planning and CNC Machine Performance in Time-Efficient Machining. *Machines*, 13(1), 65. doi:10.3390/machines13010065
- [9] Pangestu, P., Pujiyanto, E., & Rosyidi, C. N. (2021). Multi-objective cutting parameter optimization model of multi-pass turning in CNC machines for sustainable manufacturing. *Heliyon*, 7(2). doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06043
- [10] Saputra, M. A. E., & Satoto, H. F. (2024). Upaya peningkatan produktivitas UMKM pembuatan kerupuk Bu Tutik menggunakan metode Objective Matrix (OMAX). *J-ENSISTEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology)*, 10(2), 1022-1029.
- [11] Yao, K. C., Chen, D. C., Pan, C. H., & Lin, C. L. (2024). The Development Trends of Computer Numerical Control (CNC) Machine Tool Technology. *Mathematics*, 12(13). doi:10.3390/math12131923