

Optimal Conditions of Tool Wear and Surface Roughness of Magnesium Workpiece in Milling Machine with Combination of Taguchi Methods, Grey Relational Analysis and Principal Component Analysis

L. Patria Giri D.^{1*}, Wahyudiyatama², Kevin Fernando Panjaitan³, Yanuar Burhanuddin^{4*}, Gusri Akhyar Ibrahim^{5*}

¹Mahasiswa Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung

²Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung

³Mahasiswa Jurusan Teknik Fakultas Teknik Universitas Lampung

⁴Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung

⁵Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung

*Corresponding author: lucius.patria1702@students.unila.ac.id, yanuar.burhanuddin@eng.unila.ac.id, gusri.akhyar@eng.unila.ac.id

Abstract. The Taguchi method is widely used to determine the optimal quality of a process with a single response. While for multiresponse cases, Grey Relational Analysis (GRA) and Principal Component Analysis (PCA) are widely used. With GRA , multiresponse can be simplified into one single response. Tool wear and surface roughness of the workpiece in the milling machining process are affected by the diameter of the tool, depth of feed, spindle speed and feeding speed. This study examines the response of tool wear and work surface roughness with three levels and four factors. For tool diameters , used 6, 8 and 10 mm. The depth of feed used 1, 1.5 and 2 mm. Spindle speeds at 910, 1280 and 1700 rpm. While the feeding speed is 75, 145 and 220 mm / minute. Optimal results obtained in conditions of 6 mm diameter, 1.5 mm depth of feeding, spindle speed of 1280 rpm and feeding speed of 75 mm / minute. The optimal response obtained is 0.059 mm for tool wear and 0.364 μ m for work surface surface roughness. The significant factor influencing is the feeding speed which influences 74,31 %.

Keywords : Grey Relational Analysis, Principal Component Analysis, Taguchi Method, Milling, Tool Wear, Roughness
© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Proses manufaktur adalah suatu cara atau proses yang diterapkan untuk merubah bentuk suatu benda. Tujuan proses manufaktur adalah untuk menghasilkan komponen-komponen yang menggunakan material tertentu dengan mempertimbangkan bentuk, ukuran dan strukturnya. Proses ini sangat berhubungan erat dengan dunia pemesinan. Industri yang terkait manufaktur yang didukung oleh proses pemesinan menjadi andalan bagi pertumbuhan industri non migas di Indonesia. Material benda kerja yang akan dibentuk dalam proses pemesinan juga berpengaruh terhadap keandalan pahat / alat potong. Material yang sedang mengalami perkembangan pesat dalam dunia Industri adalah Magnesium. Menurut Zgorniak and Grdulská [1] dalam beberapa kasus pemesinan, komponen-komponen benda kerja dibuat dari paduan Magnesium untuk mengurangi bobot dan memastikan sifat mekanik dari sifat tahan panasnya. Fakta bahwa Magnesium Alloy adalah paduan teringan menjadikannya pilihan utama untuk digunakan di beberapa industri, seperti di otomotif dan kedirgantaraan. Industri otomotif mulai memakai Magnesium Alloy di tahun 1930-an. Contoh penggunaannya oleh produsen mobil Volkswagen

atau helikopter Sikorsky di tahun 1950-an dan meluas sampai hari ini, dengan paduan Magnesium yang digunakan dalam aplikasi teknologi tinggi seperti di Formula 1 dan pesawat Boeing [2]. Magnesium Alloys digunakan sebagai bahan pembuat pesawat seperti Sikorsky S-56, the Lockheed F-80C the Convair B-36 Peacemaker and the Tupolev TU-95MS.

Meskipun material paduan magnesium memiliki beberapa kelebihan dalam sifat kimia dan fisikanya, namun dalam proses pemesinan paduan Magnesium dikenal sebagai material jenis logam yang mudah terbakar, terutama pada saat proses pemesinan dengan kecepatan tinggi [3]. Saat proses pemesinan berlangsung, terjadi gesekan antara benda kerja dan pahat potong yang dapat menimbulkan panas. Suhu yang ditimbulkan sampai titik nyala sehingga menimbulkan api. Demikian juga gesekan antara geram dan permukaan atas pahat menimbulkan panas yang tinggi. Bahkan panas yang dihasilkan dapat menyebabkan geram terbakar [4].

Proses pemesinan dipengaruhi banyak faktor terkait keandalannya. Keausan pahat / alat potong dan panas yang dialami pahat merupakan faktor yang berpengaruh pada keandalan / umur pahat [5]. Keausan pahat juga mempengaruhi kualitas hasil pemesinan. Ersvik, et. al [6] melakukan penelitian tentang *tool wear* pada mesin *milling* konvensional dibandingkan dengan

mesin *miling* dinamik. Hasil penelitian menunjukkan laju keausan optimum didapat pada mesin *milling* dinamik. Kaining, *et.al* [7] melakukan penelitian keausan pada pahat *carbide* pada mesin *milling* dengan benda kerja AZ91D Magnesium Alloy. Keausan yang dominan terjadi adalah *flaking*, *depth of cut nose wear* dan abrasi. Secara khusus, *extensive flaking* signifikan terjadi pada kecepatan pemotongan 1600 m/menit, sedangkan *serious flank wear* dan *gross fracture* terjadi pada kecepatan pemotongan 1800 dan 2000 m / menit.

Dominic [8] melakukan penelitian pada mesin *milling* untuk memprediksi *tool wear* dengan memakai pahat *2 flute uncoated sintered tungsten carbide in cobalt binder*. Benda kerja yang dimodelkan adalah Aluminum 6061-T6 dan *commercially pure (CP) Titanium*. Hasil yang diperoleh adalah *flank wear* dan *nose wear* ditemukan pada pengujian dengan benda kerja Alumunium dan meningkat seiring dengan kecepatan makan *tool*. Sedang *nose wear* secara signifikan ditemukan saat pengujian dengan benda kerja Titanium.

Kekasaran permukaan benda kerja setelah pemesinan juga menjadi faktor yang diperhatikan. Kecepatan pemotongan, kedalaman pemotongan maupun kecepatan makan mempengaruhi hasil kekasaran permukaan benda kerja. Muralidharan, *et.al* [9] melakukan pengujian pada mesin *milling* untuk mengetahui pengaruh jenis pelapis pahat, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman makan terhadap kekasaran permukaan. Benda kerja yang digunakan adalah Magnesium *Composite*. Hasil optimum didapat pada kecepatan makan 2000 mm/menit, kecepatan putar 2500 rpm dan akan bertambah kekasarnya seiring bertambahnya kedalaman potong. Gopal, *et.al* [10] melakukan pengujian pada mesin *milling* dengan benda kerja Magnesium *Composite* untuk mengetahui pengaruh dari, kecepatan putar, kecepatan makan dan kedalaman makan terhadap kekasaran permukaan. Hasilnya kekasaran optimum didapat pada kecepatan putar 710 rpm, kecepatan makan 20 mm/menit dan kedalaman makan 0,5 mm.

Penelitian terhadap mesin *milling* untuk mengetahui keausan pahat maupun kekasaran permukaan memerlukan banyak pengujian. Semakin banyak jumlah pengujian semakin lama waktu penelitian maupun biaya penelitian. Cara untuk mengurangi jumlah eksperimen adalah dengan memakai desain eksperimen dengan metode Taguchi. Metode ini dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi. Metode ini dibagi dalam tiga tingkat yaitu desain sistem, desain parameter dan desain toleransi. Metode Taguchi merupakan metode statistik yang dipakai untuk meningkatkan kualitas produk. Proses Taguchi membantu menentukan kondisi pemotongan

yang optimum untuk suatu proses. Taguchi mengembangkan suatu desain khusus berupa *orthogonal arrays* untuk mempelajari seluruh bidang parameter dengan hanya menggunakan sedikit percobaan. Hasil percobaan – percobaan tersebut kemudian ditransformasikan kedalam suatu rasio *signal-to-noise (S/N)*. Penggunaan rasio S/N sebagai suatu pengukur penyimpangan sifat-sifat kualitas atau dari nilai-nilai yang mendekati ke nilai yang diinginkan. Ada tiga kategori dari sifat-sifat kualitas dalam analisa dari rasio S/N yaitu lebih rendah lebih baik, lebih tinggi lebih baik dan nominal lebih baik [11]. Metode Taguchi digunakan untuk mendapatkan kondisi optimum untuk satu respon. Sedang untuk mengetahui kondisi optimum pada beberapa respon, metode Taguchi dapat dikombinasikan dengan pendekatan *Grey Relational Analysis (GRA)* dan *Principal Component Analysis (PCA)*. Dengan kombinasi tersebut diharapkan kesimpulan yang didapat dapat lebih efisien untuk menentukan kondisi optimum dari beberapa parameter. Melalui GRA penelitian dengan jumlah sampel sedikit dan informasi yang terbatas dapat dianalisis untuk memperoleh kondisi optimum. Sedang PCA dipakai untuk mengetahui korelasi antar respon dan menentukan nilai pembobot sehingga kombinasi antar level faktor dapat optimal. Gopal, *et.al* [10] memakai gabungan Taguchi, GRA dan PCA untuk mengetahui kondisi optimum dari proses *milling* dengan benda kerja Magnesium *Composite*. Hasil dari gabungan metode tersebut menghasilkan rekomendasi kekasaran optimum pada $0.198\mu\text{m}$ untuk kombinasi parameter pemesinan pada gaya makan 139,48N, temperatur 68,96°C. Penelitian lain yang membahas keausan pahat maupun kekasaran permukaan pada *milling* menggunakan gabungan Metode Taguchi, GRA dan PCA dilakukan oleh Taminoli, *et.al* [12] yang melakukan penelitian untuk mengetahui kekasaran optimum pada benda uji Aluminum Alloy 6082T6 pada mesin *milling* menggunakan kombinasi metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis*. Aslantas, *et.al* [13] telah meneliti multi respon optimum, yaitu *burr* dan kekasaran permukaan Ti-6Al-4V *alloy* dari proses *milling* dengan kombinasi metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis*.

Dari uraian diatas dapat diproleh informasi bahwa sudah banyak penelitian yang mengamati korelasi respon permesinan dengan faktor atau parameter permesinan. Tetapi penelitian-penelitian tersebut masih mengamati kondisi optimum untuk respon tunggal. Oleh karena itu, penelitian yang akan dilakukan penulis adalah bertujuan untuk mendapatkan kondisi proses pemesinan *dry end milling* yang optimal terhadap material paduan Magnesium AZ31 dengan respon yang diamati adalah keausan alat potong dan kekasaran permukaan benda kerja. Parameter yang diamati adalah diameter pahat, kecepatan putar, kecepatan makan dan kedalaman makan. Metode yang dipakai adalah

gabungan dari Metode Taguchi, GRA dan PCA. Dengan kata lain, empat faktor pemesinan yang diteliti akan dicari kondisi optimumnya untuk mendapatkan keausan alat potong yang minimal sekaligus mendapatkan kekasaran permukaan benda kerja yang minimal pula.

Metode Penelitian

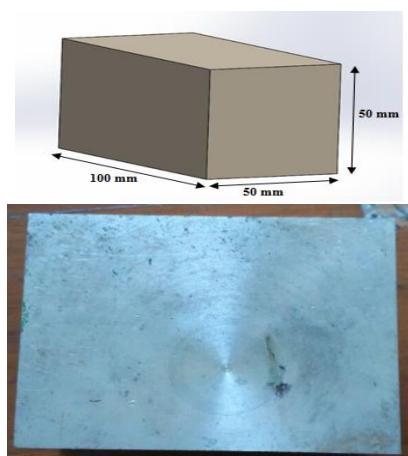
Penelitian direncanakan memakai mesin *milling* milko 12 seperti tampak pada Gambar Mesin *milling* (1) Sedangkan pahat potong yang dipakai berdiameter 6, 8 dan 10 mm, merek YG-1 dengan jenis HSS 2 flute seperti pada Gambar Pahat HSS, 2 flute (2). Bahan benda kerja yang dipakai adalah Magnesium AZ 31 seperti pada Gambar Benda kerja (3). Direncanakan akan ada empat faktor percobaan dengan tiga level dan memakai *orthogonal array L9*, tampak pada Tabel *Orthogonal Array L9* (1). Respon percobaan yang diamati adalah keausan pahat sisi dan kekasaran benda kerja.



Gambar 1. Mesin *milling*



Gambar 2. Pahat HSS, 2 flute



Gambar 3. Benda kerja

Tabel 1. *Orthogonal array L9*

Run Order	A Diameter Pahat (mm)	B Kedalaman Makan (mm)	C Kecepatan Spindle (RPM)	D Kecepatan Makan (mm/menit)
1	6	1	910	75
2	6	1,5	1280	145
3	6	2	1700	220
4	8	1	1280	220
5	8	1,5	1700	75
6	8	2	910	145
7	10	1	1700	145
8	10	1,5	910	220
9	10	2	1280	75

Tahapan dari pengolahan data direncanakan dengan terlebih dahulu melakukan Taguchi *analysis* untuk mencari kombinasi optimal dari semua faktor untuk setiap respon, dengan mencari *Signal Noise Ratio* (SNR). SNR untuk ketiga respon tersebut sama yaitu *Smaller-the-Better* (STB). Rumus yang diapakai adalah :

- a. Menghitung SN *Ratio* sesuai dengan metode Taguchi :

$$\text{SNR STB} = -10\log[X_i(j)^2] \quad (1)$$

Dimana ;

$X_i(j)$ = nilai eksperimen ke -i pada respon ke-j

- b. Melakukan normalisasi SN *Ratio*.

Besar nilai normalisasi SNR antara 0 sampai 1. Persamaan yang dipakai untuk normalisasi adalah :

$$X_i^*(j) = \frac{X_i(j) - \min X_i(j)}{\max X_i(j) - \min X_i(j)} \quad (2)$$

Dimana :

$X_i^*(j)$ = nilai normalisasi SNR pada percobaan ke- i dan respon ke-j

$X_i(j)$ = nilai eksperimen ke -i pada respon ke-j

i = banyaknya percobaan

j = banyaknya respon

- c. Menghitung nilai delta

Menghitung jarak $\Delta o_i(j)$ yang merupakan nilai absolut dari selisih antara nilai maksimum hasil normalisasi $X_o^*(j)$ dengan data yang telah dinormalisasi $X_i^*(j)$ pada titik j.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\Delta o_i(j) = |X_o^*(j) - X_i^*(j)| \quad (3)$$

Dimana :

$X_o^*(j) = 1$ (nilai terbesar normalisasi S/N *Ratio* diinversikan sebesar 1)

- d. Menghitung nilai gamma (*Grey Relational Coefficient / GRC*). GRC menunjukkan hubungan antara kondisi terbaik dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai GRC adalah sebagai berikut :

$$\gamma_{oi} = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{maks}}{\Delta_{oi(j)} + \zeta \Delta_{maks}} \quad (4)$$

Dimana :

Δ_{min} = nilai minimum dari $\Delta_{oi(j)}$

Δ_{maks} = nilai maksimum dari $\Delta_{oi(j)}$

ζ = koefisien pembeda, biasanya diambil nilai 0,5

- e. Menghitung *Grey Relational Grade*
Rumus yang dipakai adalah :

$$\Gamma_{oi(j)} = \sum_{j=1}^n \beta_j \gamma_{oi(j)} \quad (5)$$

Dimana :

β_j menggambarkan nilai bobot ke-j dari karakteristik respon dan nilai bobot diperoleh dari nilai vektor eigen komponen utama terpilih yang dikuadratkan. Misalkan komponen utama yang terpilih adalah komponen utama 1.

$\beta_j = a_{ij}^2$, dengan $a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{ik}^2 = 1$

Sedangkan :

a11 : nilai pertama dari vektor eigen 1

a12 : nilai kedua dari vektor eigen 1

a1k : nilai ke-k dari vektor eigen 1

- f. Menghitung nilai prediksi

Nilai GRG kombinasi faktor yang tidak ada dalam kombinasi run order metode Taguchi dapat diprediksi dengan rumus :

$$\hat{y} = \bar{y}_m + \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_m) \quad (6)$$

Dimana :

\hat{y} = Nilai prediksi GRG

\bar{y}_m = Nilai total rata-rata GRG

\bar{y}_i = Nilai rata-rata GRG pada tiap optimal level

k = jumlah parameter atau faktor yang berpengaruh.

- g. Selanjutnya dilakukan ANOVA terhadap *Grey Relational Grade* untuk mengetahui faktor mana yang berpengaruh signifikan terhadap respon GRG.

Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengujian didapatkan data seperti dalam Tabel Hasil pengujian (2). Percobaan

dilakukan dengan melakukan dua replikasi untuk setiap respon. Berikutnya akan dilakukan pengolahan data untuk memperoleh nilai respon optimal dari gabungan keempat faktor percobaan tersebut.

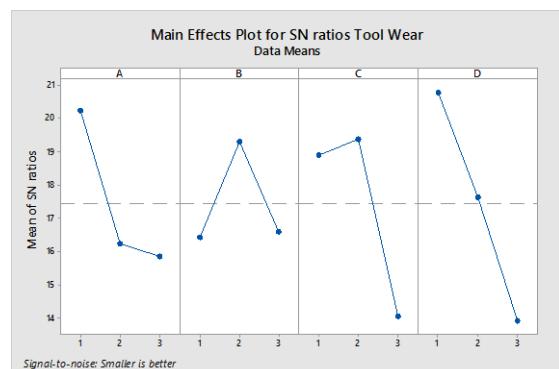
Tabel 2. Data hasil pengujian

Run Order	Keausan (mm)			Kekasaran / Ra (μm)		
	Replikasi 1	Replikasi 2	Rata-rata	Replikasi 1	Replikasi 2	Rata-rata
1	0,063	0,051	0,063	0,498	0,538	0,518
2	0,060	0,063	0,062	0,500	0,540	0,520
3	0,234	0,241	0,238	0,652	0,692	0,672
4	0,34	0,075	0,208	0,661	0,701	0,681
5	0,148	0,103	0,126	0,374	0,414	0,394
6	0,178	0,103	0,141	0,561	0,601	0,581
7	0,277	0,247	0,262	0,442	0,482	0,462
8	0,168	0,162	0,165	0,778	0,818	0,798
9	0,104	0,09	0,097	0,453	0,493	0,473

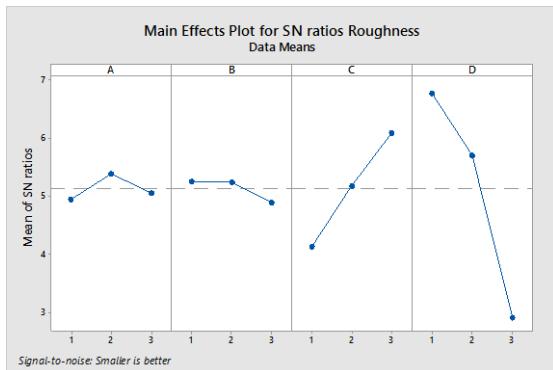
Setelah data percobaan diperoleh, selanjutnya dicari SN Ratio untuk masing-masing respon. Respon dari percobaan ini adalah keausan dan kekasaran. Karakteristik kedua respon itu adalah *smaller is better* yang dapat dihitung dengan persamaan (1). Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel SNR setiap respon (3).

Tabel 3. SNR setiap respon

Run Order	SNR (small is better) Keausan	SNR (small is better) Kekasaran
1	24,013	5.713
2	24,222	5.680
3	12,487	3.453
4	13,660	3.337
5	18,027	8.090
6	17,046	4.716
7	11,634	6.707
8	15,650	1.960
9	20,265	6.503



Gambar 4. Data means of SNR untuk keausan

**Gambar 5.** Data means of SNR untuk kekasaran

Dari perhitungan terhadap tiga respon tersebut diperoleh nilai optimal untuk masing-masing respon seperti pada Tabel Faktor optimal masing-masing respon (4).

Tabel 4. Faktor optimal masing-masing respon

Respon		Faktor optimal			
Keausan		A3	B1	C3	D3
Kekasaran		A1	B3	C1	D3

Sangat tidak mungkin mengambil kesimpulan lebih lanjut mengenai besar faktor gabungan untuk mendapatkan nilai keausan optimal sekaligus juga mendapatkan nilai kekasaran optimal. Perhitungan dengan metode Taguchi ini hanya bisa dipakai untuk memperhitungkan nilai optimal setiap faktor terhadap masing-masing respon. Pada saat semua respon digabungkan untuk mencari nilai kombinasi yang optimal maka metode Taguchi ini tidak bisa digunakan. Selanjutnya akan dilakukan penghitungan *Grey Relational Analysis*. Perhitungan normalisasi SNR dapat dilihat pada Tabel Normalisasi SNR (5), sedangkan perhitungan nilai delta dan GRC terdapat pada Tabel Delta dan GRC (6).

Tabel 5. Normalisasi SNR

Run order	Nomalisasi SNR	
	Keausan	Kekasaran
1	0,983	0,612
2	1,000	0,607
3	0,068	0,243
4	0,161	0,225
5	0,508	1,000
6	0,430	0,450
7	0,000	0,774
8	0,319	0,000
9	0,686	0,741

Tabel 6. Delta dan GRC

Run order	Grey Relational Coefficient (GRC)			
	Delta		Grey Relational Coefficient (GRC)	
	Keausan	Kekasaran	Keausan	Kekasaran
1	0,017	0,388	0,968	0,563
2	0,000	0,393	1,000	0,560
3	0,932	0,757	0,349	0,398
4	0,839	0,775	0,373	0,392
5	0,492	0,000	0,504	1,000
6	0,570	0,550	0,467	0,476
7	1,000	0,226	0,333	0,689
8	0,681	1,000	0,423	0,333
9	0,314	0,259	0,614	0,659

Pembobotan nilai GRC dilakukan dengan *Principal Component Analysis* memakai bantuan software perhitungan. Nilai *principal component* yang didapat adalah :

Principal Component Analysis: AUS; Ra

Eigenanalysis of the Correlation Matrix

Eigenvalue 1,3328 0,6672

Proportion 0,666 0,334

Cumulative 0,666 1,000

Variable	PC1	PC2
AUS	0,707	0,707
Ra	0,707	-0,707

Berdasarkan hasil tersebut diperoleh bahwa proporsi PC1 yang terbesar yaitu sebesar 1,3328 atau dapat menjelaskan sebesar 66,6 % dari total varian. Nilai dari komponen *eigen vector* PC1 yang akan dipakai sebagai pembobotan. Hasil pembobotan dapat dilihat pada Tabel Pembobotan *principal component* (7), sedangkan hasil perhitungan GRG dapat dilihat pada Tabel GRG (8).

Tabel 7. Pembobotan *principal component*

Faktor	PC 1	Bobot PC1 Kuadrat
Keausan	0,707	0,500
Kekasaran	0,707	0,500

Tabel 8. GRG

Run order	GRG	Rank
1	0,765	2
2	0,780	1
3	0,373	9
4	0,383	7
5	0,752	3
6	0,472	6
7	0,511	5

Run order	GRG	Rank
8	0,378	8
9	0,636	4

Dari tabel diatas dapat diketahui nilai GRG terbesar ada di *run order* kedua, sehingga *initial parameter* ada pada kombinasi faktor **A1 B2 C2 D2**. Selanjutnya dapat dicari nilai rata-rata GRG untuk menentukan kondisi optimal tiap faktor. Hasil perhitungan nilai rata-rata GRG dapat dilihat pada Tabel Nilai optimal GRG (9).

Tabel 9. Nilai optimal GRG

Level	Faktor			
	A	B	C	D
level 1	0,6395	0,5530	0,5384	0,718
level 2	0,5353	0,6366	0,5995	0,587
level 3	0,5085	0,4937	0,5454	0,378
Max	0,6395	0,6366	0,5995	0,718
Min	0,5085	0,4937	0,5384	0,378
Diff	0,1310	0,1429	0,0611	0,340
Rank	3	2	4	1

Dari tabel dapat diketahui nilai optimal dari semua respon dapat dicapai jika faktor percobaan diseting pada **A1 B2 C2 D1**. Setelah GRG dan nilai optimal dari faktor gabungan didapatkan, dilakukan ANOVA untuk mengetahui signifikansi atau pengaruh paling besar dari faktor-faktor tersebut. Dengan bantuan software Minitab didapat hasil seperti di dalam Tabel ANOVA untuk GRG (10).

Tabel 10. ANOVA untuk GRG

Faktor	Adj SS	Percentase Kontribusi		F-value
		Kontribusi	F-value	
A	0,0186	6,79%	1,85	
B	0,04166	15,22%	4,13	
C	-	-	-	
D	0,20344	74,31%	20,18	
Error	0,01008	3,68%		
Total	0,27378	100%		

Dengan $F_{tabel} = F(0,05; 2; 2) = 19$, dari data diatas terlihat bahwa faktor berpengaruh signifikan terhadap respon GRG hanya faktor kecepatan pemakanan (berpengaruh sebesar 74,31 %), sedangkan diameter pahat (sebesar 6,79%) kedalaman makan (sebesar 15,22 %) tidak signifikan berpengaruh terhadap GRG karena F_{value} -nya lebih kecil dari F_{hitung} .

Dari GRA didapat nilai optimal A1 B2 C2 D1. Untuk mengetahui prediksi nilai GRA dari kombinasi tersebut dapat dilakukan dengan memakai persamaan (6). Selanjutnya dilakukan

confirmation test untuk kombinasi faktor A1 B2 C2 D1.

Confirmation test dilakukan dengan tiga replikasi. Hasil dari *confirmation test* dapat dilihat pada Tabel Hasil *confirmation test* (11). Hasil lengkap nilai optimal dari prediksi maupun *confirmation test* dapat dilihat pada Tabel Nilai faktor optimal (12).

Tabel 11. Hasil *confirmation test*

Respon	Rata-rata		
	Replikasi 1	2	3
Keausan (mm)	0,088	0,04	0,049
Kekasaran (μm)	0,371	0,352	0,369
GRG	0,958	0,910	0,958

Tabel 12. Nilai faktor optimal

Faktor	Desain Optimal		
	Initial	Prediksi	Experimen
A1 B1 C1 D1	A1 B2 C2 D1	A1 B2 C2 D1	A1 B2 C2 D1
Keausan (mm)	0,062		0,059
Kekasaran (μm)	0,520		0,364
GRG	0,780	0,910	0,958
Selisih GRG		17,79%	22,82%

Hasil dari *confirmation test* menunjukkan adanya perbaikan nilai GRG maupun respon. GRG meningkat 22,82 % dari GRG awal. Hal ini mengkonfirmasi bahwa perhitungan nilai kombinasi dari empat faktor yang optimal untuk menghasilkan keausan pahat optimal sekaligus juga kekasaran benda kerja yang optimal sudah benar.

Kesimpulan

Dari pembahasan dalam bab sebelumnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan *Grey Relational Analysis* didapatkan kombinasi optimal dari faktor percobaan adalah **A1 B2 C2 D1** atau diameter pahat 6 mm, kedalaman makan 1,5 mm, kecepatan spindle 1280 rpm dan kecepatan pemakanan 75 mm/minit.
2. Dari kombinasi faktor optimal **A1 B1 C2 D1** didapatkan nilai respon optimal untuk keausan sebesar 0,059 mm serta kekasaran permukaan sebesar 0,364 μm
3. Hasil *Grey Relational Grade* (GRG) dari faktor optimal **A1 B2 C2 D1** adalah 0,958. Nilai itu meningkat sebesar 22,82 % dari nilai GRG awal.

Referensi

- [1] P. Zgórniak and A. Grdulska, "Investigation of temperature distribution during milling process of AZ91HP magnesium alloys," *Mech. Mech. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 33–40, 2012.
- [2] R. Pereira, "Mechanical behaviour of AZ31B Magnesium alloy subjected to in-plane biaxial fatigue experimental methods," no. May, pp. 1–10, 2016.
- [3] S. R. Sulistiyyanti, et. al, "Characterization of Cutting Temperature and Ignition Phenomena of Magnesium Chip Using Infrared Imaging," *Adv. Mater. Res.*, vol. 588–589, pp. 1744–1747, 2012.
- [4] T. Childs, et. al, "Metal machining—theory and applications," *Arnold, London*, p. 416, 2000.
- [5] H. A.-G. El-Hofy, *Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes*. 2013.
- [6] E. Ersvik, "Milling in hardened steel - a study of tool wear in conventional- and dynamic milling," no. June, 2015.
- [7] K. Shi, J. Ren, et. al, "Tool wear behaviors and its effect on machinability in dry high-speed milling of magnesium alloy," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, no. 9–12, pp. 3265–3273, 2017.
- [8] T. Dominic, "Modeling of tool wear and tool fracture in micromilling," no. December, 2011.
- [9] S. Muralidharan, et. al, "A study on machinability characteristic in end milling of magnesium composite," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 455–462, 2017.
- [10] P. M. Gopal and K. Soorya Prakash, "Minimization of cutting force, temperature and surface roughness through GRA, TOPSIS and Taguchi techniques in end milling of Mg hybrid MMC," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 116, pp. 178–192, 2018.
- [11] S. V Alagarsamy, et. al, "Optimization of Machining Parameters for Turning of Aluminium Alloy 7075 Using Taguchi Method," no. January, pp. 316–322, 2016.
- [12] N. Tamiloli, et. al, "A grey-fuzzy modeling for evaluating surface roughness and material removal rate of coated end milling insert," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 84, pp. 68–82, 2016.
- [13] K. Aslantas, et. al, "Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 128, pp. 419–427, 2018.