

# Optimasi Multi Respon pada Proses Gurdi dengan Menggunakan Metode *Taguchi-Grey*

Yopi Y. Tanoto<sup>1,2,a,\*</sup>, Bobby O. Soepangkat<sup>1,b</sup>, Arief Wahjudi<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya  
Kampus ITS, Keputih, Sukolilo – Surabaya 60111, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra,  
Jalan Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

E-mail: yopi.tanoto@petra.ac.id<sup>a,\*</sup>, bops\_1994@me.its.ac.id<sup>b</sup>, arif\_w@me.its.ac.id<sup>c</sup>

## ABSTRAK

Proses gurdi banyak digunakan dalam dunia industri untuk proses pembuatan lubang pada suatu komponen. Parameter proses gurdi yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat yang masing-masing memiliki tiga level. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan setting faktor gurdi yang tepat untuk meminimumkan variabel respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat selama proses gurdi berlangsung. Penelitian akan dilakukan dengan menggunakan material baja S50C dan pahat *high speed steel* (HSS). Rancangan percobaan yang digunakan adalah matriks ortogonal  $L_9 (3^3)$ . Selanjutnya, metode *grey relational analysis* (GRA) yang dikombinasikan dengan Taguchi digunakan untuk mengoptimalkan karakteristik multi respon dari hasil percobaan. Hasil penelitian menunjukkan kontribusi dari faktor-faktor dalam mengurangi variasi dari respon yang diamati secara serentak, secara berurutan adalah gerak makan sebesar 61,44%, sudut ujung pahat sebesar 36,62% dan kecepatan potong sebesar 1,22%. Dari hasil optimasi yang telah divalidasi dalam eksperimen konfirmasi didapatkan kombinasi faktor yang menghasilkan nilai respon optimal, yaitu kecepatan potong pada 29,94 m/menit, gerak makan pada 0,07 mm/putaran dan sudut ujung pahat pada 134°.

**Kata kunci:** *Grey relational analysis* (GRA), proses gurdi, Taguchi.

## ABSTRACT

*Holes making is among the most important operations in manufacturing, and drilling is a major and common hole-making process. In this study, drilling parameters namely cutting speed, feed and point angle as drilling parameters. Each parameter has three levels. This paper is conducted for getting the best parameter setting for minimizing thrust force, torque, surface roughness and flank wear during drilling process. Drilling tests are carried out using high speed steel (HSS). Taguchi's  $L_9 (3^3)$  orthogonal array is used to perform drilling of S50C steel plates. Then, combination between grey relational analysis (GRA) and Taguchi's method is used for optimizing experiment result (multi response). Experiment result show the contribution of factors in minimizing variation of multiple response, i.e., feed (61.44%), point angle (36.62%) and cutting speed (1.22%). From an optimization result that has validated in confirmation experiment, optimal response is set at 29,94 m/min for cutting speed, 0,07 mm/rev for feed and 134° for point angle.*

**Keywords:** *Grey relational analysis* (GRA), drilling, Taguchi.

## PENDAHULUAN

Membuat lubang merupakan salah satu proses paling penting pada proses pemesinan, dan proses gurdi merupakan proses yang paling utama dan umum dipakai dalam pembuatan lubang [1]. Respon atau performansi yang penting dari proses gurdi pada umumnya dinyatakan oleh kekasaran per-

mukaan dan laju pengerjaan bahan. Kinerja tersebut tergantung dari parameter proses atau faktor-faktor yang digunakan, yang diantaranya adalah putaran spindle, gerak makan dan sudut ujung pahat.

Penentuan kombinasi faktor yang tepat untuk mencapai respon yang optimum telah menjadi fokus penelitian pada proses gurdi. Dalam hal ini pemilihan metode akan berkaitan langsung dengan kualitas

produk yang dihasilkan. Metode Taguchi adalah salah satu metode yang efektif untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*, yaitu usaha pengendalian atau perbaikan kualitas yang dimulai dari perancangan hingga pemrosesan produk [2]. Metode Taguchi hanya dapat mengoptimasi proses pada satu respon. Adanya metode seperti *grey relational analysis*, *fuzzy logic* dan *respon surface* membuat metode Taguchi dapat digunakan untuk melakukan optimasi terhadap beberapa respon secara serentak.

Penelitian yang mengangkat masalah tentang optimasi proses gurdi terhadap respon kekasaran permukaan, gaya tekan dan torsi juga telah dilakukan. Faktor yang diteliti adalah kecepatan potong, gerak makan, dan sudut ujung pahat. Masing-masing faktor yang diteliti memiliki tiga level [3]. Benda kerja dan pahat yang dipakai adalah Al/SiC (HCHCr) dan HSS *twist drill* yang dilapisi dengan TiN berdiameter 10 mm. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *orthogonal array*  $L_9$ , dan *gray relational analysis* sebagai metode lanjutan untuk optimasi multirespon. Untuk menentukan persen kontribusi dari setiap faktor yang diteliti digunakan analisis variansi (ANOVA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor sudut ujung pahat memiliki kontribusi sebesar 43,21%, kecepatan potong memiliki kontribusi sebesar 28,64%, dan gerak makan memiliki kontribusi sebesar 26,21% terhadap total variasi dari respon yang diamati secara serentak.

Studi tentang pengoptimasian gaya tekan, torsi, *entry delamination*, *exit delamination* dan kesilidrisan lubang telah dilakukan pada proses gurdi dengan menggunakan metode Taguchi *grey fuzzy*. Faktor yang divariasikan adalah kecepatan spindle, sudut ujung pahat dan laju pemakanan [4]. Benda kerja dan pahat yang digunakan adalah *carbon fiber reinforce plastic* (CFRP) dan *high speed steel* (HSS) berdiameter 6 mm. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *orthogonal array*  $L_{27}$ . ANOVA digunakan dalam perhitungan persen kontribusi. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa faktor yang memiliki prosentase kontribusi terbesar terhadap total variasi dari respon yang diamati secara serentak berturut-turut adalah laju pemakanan, kecepatan spindle, dan sudut ujung pahat. Laju pemakanan memiliki kontribusi sebesar 42,19%, kecepatan spindle memiliki kontribusi sebesar 19,05% dan sudut ujung pahat memiliki kontribusi sebesar 14,18% terhadap total variasi dari respon.

Berdasarkan evaluasi dari penelitian-penelitian yang ada, penelitian tentang optimasi penentuan seting faktor pada proses gurdi untuk mengoptimalkan beberapa respon yang dapat diamati secara serentak masih perlu dilakukan. Pada penelitian ini dilakukan suatu optimasi multi respon pada proses gurdi, Variabel tidak bebas atau respon pada penelitian ini adalah gaya tekan, torsi, kekasaran

permukaan dan keausan tepi pahat. Variabel bebas atau parameter-parameter proses pada penelitian ini adalah kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat. Rancangan percobaan menggunakan *orthogonal array*  $L_9$ . Metode optimasi multi respon yang akan digunakan adalah Taguchi yang dikombinasikan dengan *grey relational analysis*.

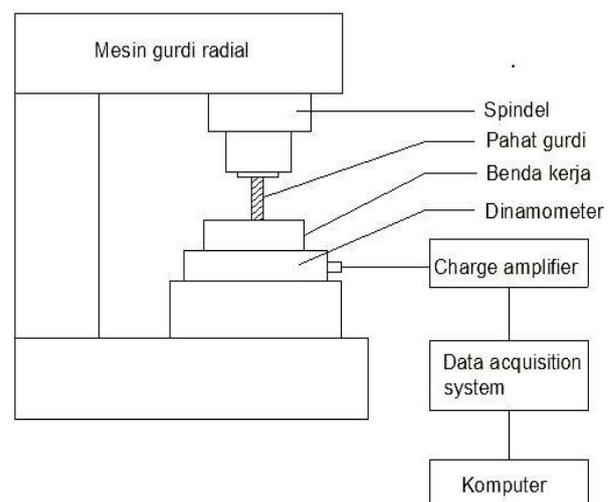
## METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah baja S50C (C 0,49; Mn 0,7; Si 0,23) yang memiliki kekerasan 24 HRC dan pahat yang digunakan adalah pahat HSS *twist drill* dengan diameter 14 mm. Mesin gurdi yang digunakan adalah mesin gurdi radial KMR-70. Proses penggurdian dilakukan sampai tembus pada benda kerja dengan tebal 25 mm. Parameter proses beserta level yang digunakan selama proses gurdi dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Parameter Proses Gurdi Beserta Levelnya

Parameter	Unit	Level		
		1	2	3
Kecepatan potong (V)	m/min	5,98	16,18	29,94
Gerak makan (f)	mm/put	0,07	0,13	0,22
Sudut ujung pahat (PA)	derajat	102	118	134

Respon yang diamati pada penelitian ini adalah gaya tekan (F, N), torsi (T, Nm), kekasaran permukaan ( $R_a$ ,  $\mu\text{m}$ ) dan keausan tepi pahat (VB,  $\mu\text{m}$ ). Selama proses gurdi berlangsung, gaya tekan dan torsi yang dihasilkan diukur dengan dinamometer KISTLER *type* 9272, *data acquisition system* KISTLER *type* 5697A dan *Charge amplifier* KISTLER *type* 5070A. Kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan Mitutoyo *surf test* 301 sedangkan keausan pahat diukur dengan menggunakan Nikon *Measurescope*.



**Gambar 1.** Skema Eksperimen Proses Gurdi

Skema dari eksperimen dapat dilihat pada Gambar 1. Rancangan eksperimen yang digunakan adalah matriks otogonal  $L_9$ . Matriks orthogonal  $L_9$  beserta respon hasil dari eksperimen ditunjukkan pada Tabel 2. Replikasi dilakukan sebanyak satu kali untuk masing-masing kombinasi. Setelah semua data respon diperoleh, barulah dilakukan proses optimasi. Berikut ini adalah langkah-langkah optimasi dengan menggunakan metode Taguchi-*grey*:

**Normalisasi Nilai Rata-Rata dari Masing-Masing Respon**

Nilai rata-rata dinormalkan menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Normalisasi dilakukan sesuai dengan karakteristik respon masing-masing, yang meliputi semakin besar semakin baik, semakin kecil semakin baik dan tertuju pada nilai tertentu. Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik semakin besar semakin baik [5] adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \tag{1}$$

**Tabel 2.** Matriks Orthogonal  $L_9$  Beserta Nilai Masing-Masing Respon

Percoba-an ke-	V	f	PA	Fz	T	Ra	VB			
1	1	1	1	2011	1922	7,29	7,81	7,61	7,25	0,17
2	1	2	2	2923	2986	11,02	11,24	4,12	3,9	0,149
3	1	3	3	4998	5051	17,06	17,18	3,28	2,96	0,086
4	2	1	2	2201	2274	7,05	7,25	6,85	6,55	0,107
5	2	2	3	2487	2672	9,93	10,53	5,90	5,7	0,082
6	2	3	1	3815	3970	17,03	17,8	6,41	5,77	0,102
7	3	1	3	1573	1539	6,21	6,45	6,19	5,97	0,102
8	3	2	1	2645	2706	10,87	11,24	8,90	7,445	0,105
9	3	3	2	3740	3714	17,14	17,26	5,83	6,57	0,065

Proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin kecil semakin baik” menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \tag{2}$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik tertuju pada nilai tertentu adalah [6]:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - X_{ob}(k)} \tag{3}$$

dengan:

- $\max_{\forall k} X_i(k)$  = nilai terbesar dari  $X_i(k)$
- $\min_{\forall k} X_i(k)$  = nilai terkecil dari  $X_i(k)$
- $X_{ob}(k)$  = nilai target dari  $X_i(k)$

**Deviation Sequence  $\Delta_{0,i}(k)$ , Grey Relational Coefficient  $\xi_i(k)$  dan GRG**

*Deviation sequence*  $\Delta_{0,i}(k)$  adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya 1 dengan data yang telah dinormalisasi. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan Persamaan 4 berikut [5]:

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \tag{4}$$

*Grey relational coefficient* (GRC) menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. GRC akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah [5]:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \tag{5}$$

dengan:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k)$$

$\zeta$  = *distinguishing coefficient*.

Nilai *distinguishing coefficient* yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 [7]. Nilai *grey reasoning grade* (GRG) yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut. Nilai GRG diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata dari keempat GRC yang ada.

**Pemilihan Seting Faktor yang Menghasilkan Respon yang Optimal**

Semakin besar nilai GRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi faktor tersebut. Penentuan kombinasi faktor terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Respon *Grey Fuzzy Reasoning Grade*

	Level 1	Level 2	Level j
Faktor 1	$Y_{11}$	-	$Y_{1j}$
Faktor 2	$Y_{21}$	-	$Y_{2j}$
-	-	-	-
Faktor i	$Y_{i1}$	-	$Y_{ij}$
Max-Min	$Q_1$	-	$Q_j$

$Y_{ij}$  adalah rata-rata nilai GRG yang dikelompokkan berdasarkan faktor i dan level j. Grafik respon dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level dari faktor yang menghasilkan respon yang optimal.

### ANAVA untuk Melihat Nilai Signifikansi Faktor dan Menghitung Persen Kontribusi

Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi faktor. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (db), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS) dan  $F_{hitung}$  seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Analisis Variansi

Sumber variasi	Db	SS	MS	$F_{hitung}$
Faktor A	$u_A$	$SS_A$	$MS_A$	$F_A$
Faktor B	$u_B$	$SS_B$	$MS_B$	$F_B$
Error	$u_{error}$	$SS_{error}$	$MS_{error}$	
Total	$u_T$	$SST$		

dengan:

$$u_T = \text{Derajat bebas total} = N - 1 \tag{6}$$

$$u_A = \text{Derajat bebas faktor A} = k_A - 1 \tag{7}$$

$$u_B = \text{Derajat bebas faktor B} = k_B - 1 \tag{8}$$

$$u_{error} = \text{Derajat bebas error} = u_T - u_A - u_B - u_{AB} \tag{9}$$

$$T = \text{Jumlah keseluruhan} = \sum_{i=1}^N y_i \tag{10}$$

$$CF = \text{Faktor koreksi} = \frac{T^2}{N} \tag{11}$$

$$SS_T = \text{Jumlah kuadrat total} = \sum_{i=1}^N Y_i - CF = \sum_{i=1}^N (Y_i - T)^2 \tag{12}$$

$$SS_A = \text{Jumlah kuadrat faktor A} = \left[ \sum_{i=1}^{k_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \tag{13}$$

$$SS_B = \text{Jumlah kuadrat faktor B}$$

$$= \left[ \sum_{i=1}^{k_B} \left( \frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \tag{14}$$

$$SS_E = \text{Jumlah kuadrat error} = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \tag{15}$$

$$MS_A = \text{Kuadrat tengah faktor A} = \frac{SS_A}{u_A} \tag{16}$$

$$MS_B = \text{Kuadrat tengah faktor B} = \frac{SS_B}{u_B} \tag{17}$$

$$MS_E = \text{Kuadrat tengah error} = \frac{SS_E}{u_E} \tag{18}$$

$$k_A = \text{Jumlah level faktor A}$$

$$k_B = \text{Jumlah level faktor B}$$

$$N = \text{Jumlah total percobaan}$$

$$n_{A_i} = \text{Jumlah total pengamatan faktor A}$$

$$n_{B_j} = \text{Jumlah total pengamatan faktor B}$$

Persen kontribusi digunakan untuk mengindikasikan kekuatan relatif sebuah faktor untuk mengurangi variasi yang terjadi. Persen kontribusi suatu faktor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [8]:

$$\rho = \frac{SS_A}{SST} \times 100 \% \tag{19}$$

dengan:

$$SS'_A = SS_A - u_A \cdot MS_E \tag{20}$$

dengan:

$$SS_A = \text{jumlah kuadrat dari faktor yang dihitung persen kontribusinya}$$

$$SS_T = \text{jumlah kuadrat total}$$

$$u_A = \text{derajat kebebasan dari faktor yang dihitung persen kontribusinya}$$

$$MS_E = \text{rata-rata kuadrat dari faktor error}$$

### Prediksi dari Kondisi Optimum

Nilai prediksi GRG berdasarkan kombinasi level faktor untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dihitung menggunakan Persamaan 21 [9]:

$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{y}_i - \gamma_m) \tag{21}$$

dengan:

$$\gamma_m = \text{nilai rata-rata dari keseluruhan GRG}$$

$$\bar{y}_i = \text{rata-rata GRG pada level optimal}$$

$$o = \text{jumlah faktor yang mempengaruhi respon secara signifikan}$$

Interval keyakinan (1- $\alpha$ ) 100% untuk kondisi optimum [8]

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha; k; v_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \tag{22}$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \hat{\mu}_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \tag{23}$$

dengan:

$$\hat{\mu}_{prediksi} = \text{dugaan rata-rata GFRG pada kombinasi optimal}$$

$$n_{eff} = \frac{\text{banyaknya pengamatan efektif}}{\frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata}}} \quad (24)$$

**Percobaan Konfirmasi**

Percobaan konfirmasi bertujuan untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisis, serta untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil secara aktual [8]. Percobaan ini dilaksanakan dengan menggunakan kombinasi level faktor-faktor hasil optimasi. Jumlah sampel untuk eksperimen konfirmasi harus lebih besar dari jumlah sampel pada saat eksperimen. Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil apabila rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi dan interval keyakinan dari rata-rata respon eksperimen konfirmasi berhimpit atau beririsan dengan interval keyakinan (1-α) 100% dari rata-rata respon hasil optimum. Interval keyakinan eksperimen konfirmasi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 25 dan 26 [8]:

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha,1, n_{eff}} \cdot MS_E \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (25)$$

$$\hat{\mu}_{konfirmasi} - CI_2 \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} + CI_2 \quad (26)$$

dengan:

r = jumlah pengulangan dalam eksperimen konfirmasi

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Normalisasi Nilai Rata-Rata dari Masing-Masing Respon**

Proses normalisasi semua dihitung dengan menggunakan persamaan 2, yaitu dengan karakteristik “makin kecil makin baik”. Nilai rata-rata masing-masing respon dan hasil normalisasinya dapat dilihat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Nilai Rasio S/N dan Normalisasi Rasio S/N tiap Respon

Setting faktor, kombinasi ke-	Fz	T	RA	VB	xi_Fz	xi_T	xi_Ra	xi_VB
1	1966,5	7,55	6,4125	0,17	0,200	0,174	0,670	1,000
2	2954,5	11,13	4,335	0,149	0,547	0,558	0,324	0,863
3	5024,5	17,12	3,0025	0,086	1,000	0,983	0,000	0,291
4	2237,5	7,15	4,975	0,107	0,310	0,120	0,446	0,518
5	2579,5	10,23	6,7975	0,082	0,431	0,474	0,721	0,242
6	3892,5	17,415	6,715	0,102	0,782	1,000	0,710	0,469
7	1556	6,33	7,4325	0,102	0,000	0,000	0,800	0,469
8	2675,5	11,055	9,325	0,105	0,462	0,551	1,000	0,499
9	3727	17,2	7,63	0,065	0,745	0,988	0,823	0,000

**Deviation Sequence Δ<sub>0,i</sub>(k), Grey Relational Coefficient Ξ<sub>i</sub>(k) dan GRG**

Dengan menggunakan Persamaan 4 dan 5, maka diperoleh nilai deviation sequence, GRC dan GRG seperti yang ditampilkan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Deviation Sequence, GRC dan GRG

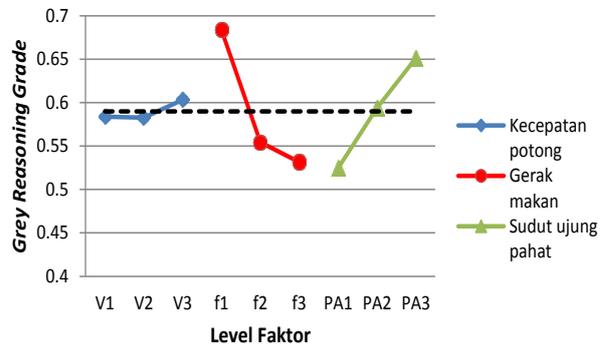
Setting faktor, kombinasi ke-	Δ_Fz	Δ_T	Δ_Ra	Δ_VB	GRC_Fz	GRC_T	GRC_Ra	GRC_VB	GRG
1	0,118	0,110	0,539	1,000	0,809	0,820	0,481	0,333	0,611
2	0,403	0,433	0,211	0,800	0,554	0,536	0,703	0,385	0,544
3	1,000	0,973	0,000	0,200	0,333	0,339	1,000	0,714	0,597
4	0,196	0,074	0,312	0,400	0,718	0,871	0,616	0,556	0,690
5	0,295	0,352	0,600	0,162	0,629	0,587	0,454	0,755	0,606
6	0,674	1,000	0,587	0,352	0,426	0,333	0,460	0,587	0,451
7	0,000	0,000	0,701	0,352	1,000	1,000	0,416	0,587	0,751
8	0,323	0,426	1,000	0,381	0,608	0,540	0,333	0,568	0,512
9	0,626	0,981	0,732	0,000	0,444	0,338	0,406	1,000	0,547

**Pemilihan Seting Faktor yang Menghasilkan Respon yang Optimal**

Untuk menentukan faktor yang menghasilkan respon yang optimal diperoleh menggunakan software Minitab. Tabel respon dapat dilihat pada Tabel 7 dan grafik respon pada Gambar 2.

**Tabel 7.** Respon GRG

Level	V	f	PA
1	0,5839	0,6838	0,5247
2	0,5827	0,5543	0,5938
3	0,6033	0,5317	0,6513
Delta	0,064	0,187	0,0927
Rank	3	1	2



**Gambar 2.** Grafik Respon GRG

**ANOVA untuk Melihat Nilai Signifikansi Faktor dan Menghitung Persen Kontribusi Masing-Masing Factor**

Tabel analisis variansi untuk GRG disusun menggunakan Persamaan 6 sampai 18 yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 8. Dari Tabel tersebut jelas bahwa gerak makan (f) memiliki kontribusi paling besar dalam menentukan variasi

yaitu sebesar 61,44% yang kemudian diikuti oleh sudut ujung pahat (PA) dan kecepatan potong (V).

Tabel 8. ANAVA pada GRG

Sumber Variasi	DF	SS	MS	F	p value	% Kontribusi
V	2	0,0008	0,0004	1,69	0,372	1,22%
f	2	0,040429	0,020215	85,4	0,012	61,44%
PA	2	0,024095	0,012048	50,9	0,019	36,62%
Error	2	0,000473	0,000237			0,72%
Total	8	0,065798				100,00%

**Prediksi dari Kondisi Optimum**

Penentuan prediksi nilai GRG yang optimal dilakukan berdasarkan nilai rata-rata GRG masing-masing level faktor yang ditunjukkan pada Tabel 7. Kombinasi dari faktor-faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap multirespon yang optimal adalah faktor V pada level 3, faktor f pada level 1 dan faktor PA pada level 3. Nilai prediksi GRG tersebut dihitung dengan menggunakan Persamaan 19 yang dijabarkan sebagai berikut:

$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{y}_i - \gamma_m)$$

$$\hat{\mu} = 0,5899 + (0,6033 - 0,5899) + (0,6838 - 0,5899) + (0,6513 - 0,5899)$$

$$\hat{\mu} = 0,7586$$

Penentuan interval keyakinan rata-rata GRG prediksi dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung banyaknya pengamatan efektif. Dari Persamaan 22, nilai pengamatan efektif ( $n_{eff}$ ) adalah 2,57. Dengan nilai  $F_{(0,05;1;2)} = 18,51$  dan  $MS_E = 0,000237$ , maka perhitungan interval keyakinan rata-rata GRG hasil optimasi dengan menggunakan Persamaan 25 dan 26 adalah sebagai berikut:

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}}$$

$$CI_1 = \pm 0,041$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% rata-rata GRG prediksi adalah  $0,7586 \pm 0,041$  atau  $0,7176 \leq GFRG_{prediksi} \leq 0,7996$ .

**Percobaan Konfirmasi**

Eksperimen atau percobaan konfirmasi dilakukan sebanyak tiga replikasi, dan hasil dari masing-masing respon pada eksperimen konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 9.

Dengan nilai  $n_{eff} = 2,57$ ,  $F_{(0,05;1;2)} = 18,51$ ,  $MS_E = 0,000237$  dan  $r = 3$ , menggunakan Persamaan 25 dan 26, maka nilai intervalnya keyakinannya dapat dihitung.

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_2 = \pm 0,056$$

Tabel 9. Hasil Respon Eksperimen Konfirmasi dengan Menggunakan Kombinasi Optimum

Seting faktor	Gaya tekan (N)	Torsi (Nm)	Kekasaran permukaan ( $\mu m$ )	Keausan tepi pahat ( $\mu m$ )
Kombinasi optimum	1630	6,59	5,71	0,102
	1688	6,62	5,39	0,101
	1615	6,58	5,62	0,099
rata-rata	1644,3	6,6	5,6	0,101

Dengan demikian, interval keyakinannya 95% rata-rata GRG eksperimen konfirmasi adalah  $0,7411 \pm 0,056$  atau  $0,6851 \leq GFRG_{konfirmasi} \leq 0,7971$ . Dari nilai GRG hasil optimasi yang berada dalam interval GRG eksperimen konfirmasi, dapat disimpulkan bahwa seting kombinasi level faktor pada kondisi optimum yang telah didapat adalah valid.

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil eksperimen, proses optimasi, eksperimen konfirmasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa kontribusi dari faktor-faktor yang signifikan untuk meminimumkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat secara serentak adalah kecepatan potong sebesar 1,22%, gerak makan sebesar 61,44% dan sudut ujung pahat sebesar 36,62%. Seting kombinasi faktor-faktor yang signifikan untuk meminimumkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat secara serentak adalah kecepatan potong pada 29,94 m/menit gerak makan pada 0,07 mm/putaran dan sudut ujung pahat pada 134°.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, Sixth Edition, Pearson, New York, 2009.
- [2] Soejanto, I., *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2009.
- [3] Haq, A.N., Marimuthu, P., dan Jeyapaul, R., Multi Respon Optimization of Machining Parameters of Drilling Al/SiC Metal Matrix Composite using Grey Relational Analysis in the Taguchi Method, *International Journal Advance Manufacture Technology*, 37, 2009, pp. 250–255.
- [4] Khrisnamoorthy, A., Boopathy, S., Palanikumar, K., and Davim, J., Application of Grey Fuzzy Logic for the Optimization of Drilling Parameters for

- CRP Composites with Multiple Performance Characteristic, *Measurement*, 45, 2012, pp. 1286–1296.
- [5] Datta, S. and Mahapatra, S.S., Modeling, Simulation and Parametric Optimization of Wire EDM Process using Response Surface Methodology Coupled with Grey-Taguchi Technique, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(5), 2010, pp. 162-183.
- [6] Huang, J.T. and Liao, Y.S., Optimization of Machining Parameters of Wire-EDM based on Grey Relational and Statistical Analyses, *International Journal of Production Research*, 41, 2003, pp. 1707–1720.
- [7] Tosun, N., Cogun, C., and Tosun, G., A Study on Kerf and Material Removal Rate in Wire Electrical Discharge Machining based on Taguchi Method, *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 2004, pp. 316-322.
- [8] Ross, P.J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw Hill Companies, Inc., Taiwan, 2008.
- [9] Lin, J.L. and Lin, C.L., The Use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 2002, pp. 237–244.