

OPTIMASI PARAMETER DALAM PEMBUATAN PROFIL *MULTILAYERED MICROFILTERS* DENGAN PROSES *ELECTROCHEMICAL MACHINING* MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI

Andi Sudiarso¹, Galih P.L. Adi² dan Muslim Mahardika³

^aDepartemen Teknik Mesin dan Industri

Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2 Yogyakarta, INDONESIA

^bemail: a.sudiarso@ugm.ac.id

Abstrak

Electrochemical Machining (ECM) merupakan permesinan yang cocok diterapkan untuk benda kerja berukuran kecil, material yang relatif keras, dan berbentuk kompleks, salah satunya adalah pada pembuatan *multilayered microfilters*. Namun demikian, biaya investasi awal yang tinggi, konsumsi daya listrik, biaya operasi, pemeliharaan mesin, dan biaya perkakas yang terkait dengan penggunaan ECM membuat proses ini menjadi relatif mahal, di samping kemampuan prosesnya yang unik dan memiliki banyak kelebihan. Banyaknya proses parameter yang terlibat juga menjadikan permesinan ECM menjadi kompleks. Oleh karena itu, perlu adanya analisis lebih lanjut untuk mengetahui kombinasi nilai parameter optimal serta model matematis untuk menjadi dasar pertimbangan dalam menghasilkan proses serta hasil permesinan ECM yang optimal. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis mengenai pengaruh konsentrasi larutan elektrolit (5%, 10%, dan 15%), tegangan (11V, 12,5V, dan 14V), dan *gap* permesinan (3 mm, 4 mm, dan 5 mm) dalam memproduksi *microfilter*. Respon yang diuji dalam penelitian ini adalah *material removal rate* (MRR), *overcut*, dan *surface roughness* (Ra). Optimasi *single-objective* dilakukan menggunakan rasio S/N, sedangkan optimasi *multi-objective* dilakukan menggunakan metode *Grey Relational Analysis*. Nilai MRR, *overcut*, dan *surface roughness* optimal secara simultan didapatkan pada kombinasi 5%, 12,5V, dan 4 mm. Ketika dianalisis secara simultan, faktor konsentrasi menjadi faktor paling berpengaruh dalam menghasilkan respon yang optimal. Persamaan regresi juga dirumuskan untuk setiap responnya sehingga dapat digunakan untuk memprediksi nilai respon.

Kata kunci : *Electrochemical machining*, Taguchi, Rasio S/N, *Grey Relational Analysis*, Regresi, *Microfilters*, Optimasi

Pendahuluan

Electrochemical machining (ECM) merupakan alternatif untuk melakukan permesinan pada benda kerja yang berukuran kecil dan memiliki struktur yang kompleks tanpa mengakibatkan dampak termal dan *mechanical stress* pada benda kerja [1]. ECM juga merupakan salah satu metode permesinan yang banyak digunakan untuk memproses benda kerja berbentuk rumit dari material dengan sifat konduktor yang baik namun sulit untuk di mesin,

seperti super alloys, Ti-alloys, alloy steel, tool steel, stainless steel, dan lain lain [2].

Biaya investasi awal yang tinggi, biaya konsumsi daya listrik, biaya operasi, biaya pemeliharaan, dan biaya perkakas yang terkait dengan penggunaan ECM membuat proses ini menjadi mahal, di samping kemampuan prosesnya yang unik dan memiliki banyak kelebihan [3]. Permesinan menggunakan ECM melibatkan beberapa parameter. Hal tersebut yang nantinya akan mempengaruhi performa permesinan ECM.

Penelitian ECM sebelumnya menyimpulkan bahwa terdapat beberapa parameter yang akan mempengaruhi hasil permesinan, yaitu konsentrasi elektrolit, tegangan, dan *gap* permesinan [4] [5] [6]. Namun ketiga faktor tadi belum pernah diteliti secara bersamaan sebelumnya.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, penelitian ini akan berfokus pada optimasi tiga faktor, konsentrasi elektrolit, tegangan, dan *gap* permesinan. Respon yang diteliti adalah *material removal rate* (MRR), *overcut*, dan *surface roughness*.

Metode Penelitian

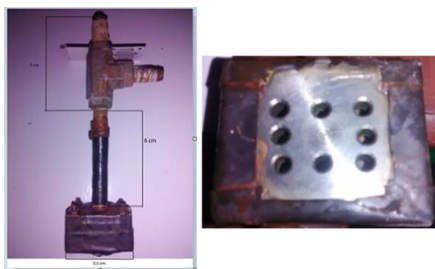
A. Benda Kerja, Elektrode, dan Proses ECM

Pada penelitian kali ini, benda kerja yang digunakan berupa material berwujud dasar *stainless steel* 204. Profil permesinan yang digunakan adalah mikrofilter, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Untuk mencapai profil tersebut, digunakan lapisan isolator dari material *vinyl* yang dilapisi pada benda kerja sebelum permesinan.



Gambar 1. Profil Mikrofilter

Elektrode yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari *stainless steel* 204. Terdapat delapan lubang untuk menyempatkan elektrolit ke benda kerja, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

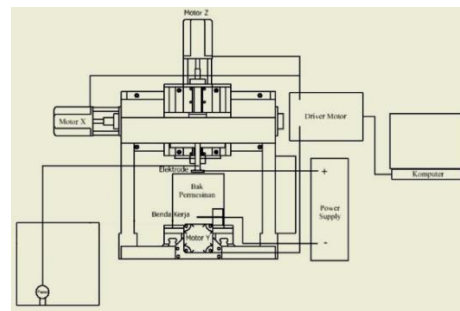


Gambar 2. Elektrode SS 204

Untuk proses permesinan, metode yang digunakan adalah metode permesinan *die sinking* statis.

ECM bekerja berdasarkan prinsip elektrolisis (Faraday). Prinsip kerja pada proses ECM yaitu dengan cara pelarutan anodis oleh elektrolit yang mengalir melalui celah antara elektroda dan benda kerja. Benda kerja yang bertindak sebagai anode akan dialiri arus bermuatan positif (DC +), sedangkan elektrode akan bertindak sebagai katode yang dialiri dengan arus bermuatan negatif (DC -).

Mesin ECM terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sistem kontrol pemakanan, sistem elektrolit, *power supply*, dan penjepit benda kerja. Setup permesinan ECM ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Setup ECM

B. Pengukuran Respon

Pada penelitian kali ini, pengukuran respon terbagi menjadi dua bagian. Pengukuran pertama adalah untuk benda kerja berlubang, sedangkan pengukuran kedua adalah untuk benda kerja tidak berlubang.

Untuk benda kerja berlubang, respon yang diukur adalah MRR dan *overcut*. MRR dihitung menggunakan Persamaan (1) [7].

$$MRR = \frac{m_1 - m_2}{t} = \frac{\Delta_m}{t} \quad (1)$$

dengan:

m_1 : massa awal benda kerja (g),
 m_2 : massa benda kerja setelah permesinan (g),
 t : waktu permesinan (s),

d : density (g/cm^3)

Overcut diukur pada beberapa titik benda kerja menggunakan Persamaan (2). Titik pengukuran *overcut* ditunjukkan oleh Gambar 4.

$$OC = d_{isolated} - d_{workpiece} \quad (2)$$

dengan:

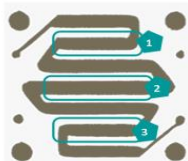
$d_{isolated}$: ukuran isolator (mm),

$d_{workpiece}$: ukuran benda kerja (mm)

Untuk benda kerja tidak berlubang, respon yang diukur adalah *surface roughness*. *Surface roughness* diukur pada tiga titik pada benda kerja, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Titik Pengukuran *Overcut*



Gambar 5. Titik Pengukuran *Surface Roughness*

C. Design of Experiment (DOE)

Pada penelitian kali ini, terdapat tiga faktor dengan tiga *level* dan replikasi sebanyak tiga kali, sehingga total jumlah eksperimen adalah 27 *run*. Faktor dan *level* yang terlibat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor dan Levelnya

Faktor		Level		
1	Konsentrasi Elektrolit (%)	1	2	3
		5	10	1
		1	12,	5
2	Tegangan (V)	1	5	4
		3	4	5
3	Gap Permesinan (mm)	3	4	5

Desain eksperimen untuk penelitian kali ini akan didesain dengan metode Taguchi. Hal

ini karena Taguchi menawarkan jumlah *run* yang tidak sebanyak *full factorial design*. *Orthogonal array* yang digunakan adalah L_9 (ditunjukkan pada Tabel 2).

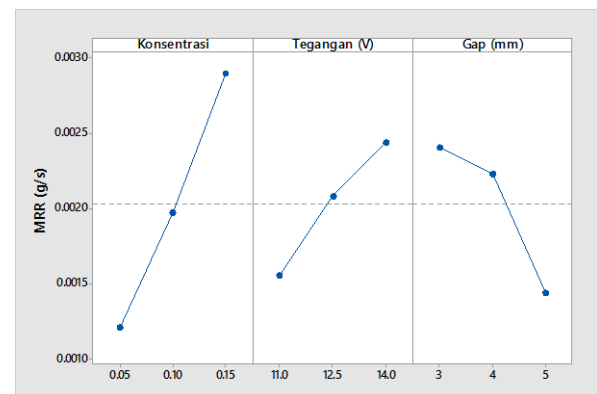
Tabel 2. *Orthogonal Array* L_9

Run	Konsentrasi elektrolit	Tegangan	Gap permesinan
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Results and Analysis

A. Analisis Hasil Percobaan

1. Analisis MRR

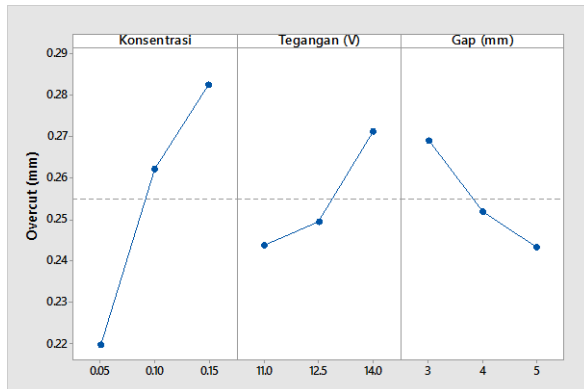


Gambar 6. Grafik Respon MRR

Gambar 6 menunjukkan bahwa MRR tertinggi didapat ketika konsentrasi elektrolit berada pada *level* tiga, yaitu 15%, tegangan pada *level* tiga, yaitu 14 volt, dan *gap* permesinan berada pada *level* satu, yaitu 3 mm. Semakin tinggi konsentrasi maka MRR akan semakin tinggi. Hal ini juga berlaku pada faktor tegangan, di mana semakin tinggi tegangan akan menghasilkan nilai MRR yang semakin tinggi pula. Untuk *gap* permesinan,

semakin dekat jarak antara elektroda dengan benda kerja, atau dengan kata lain semakin kecil *gap*, maka MRR akan semakin tinggi.

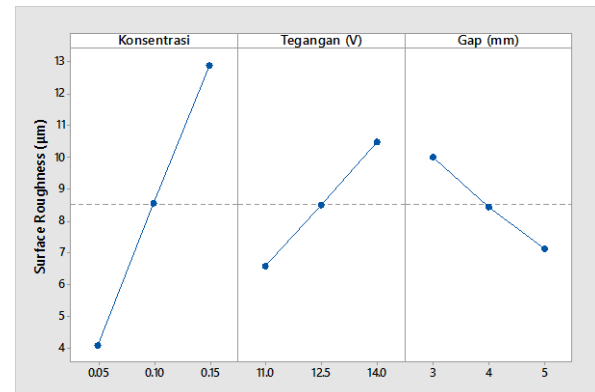
2. Analisis *Overcut*



Gambar 7. Grafik Respon *Overcut*

Gambar 7 menunjukkan bahwa *overcut* terkecil didapat ketika konsentrasi elektrolit berada pada *level* satu, yaitu 5%, tegangan pada *level* satu, yaitu 11 volt, dan *gap* permesinan berada pada *level* tiga, yaitu 5 mm. Nilai konsentrasi elektrolit dan tegangan memiliki pengaruh yang sama terhadap *overcut*, yaitu semakin tinggi nilai konsentrasi ataupun tegangan, maka *overcut* yang di hasilkan akan semakin tinggi, sedangkan untuk *gap* permesinan, semakin kecil *gap* permesinan akan berakibat semakin tinggi *overcut*. *Overcut* dihitung berdasarkan selisih waktu permesinan yang sama, sebesar 10 detik, terhadap waktu permesinan optimal. Waktu permesinan optimal adalah waktu permesinan ketika kualitas hasil permesinan dapat masuk ke dalam standar toleransi nilai *overcut* untuk mikrofilter, yaitu maksimal sebesar 0,1 mm. Penambahan waktu sebesar 10 detik disini dikarenakan penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari perubahan faktor yang terlibat terhadap *overcut*.

3. Analisis *Surface Roughness*



Gambar 8. Grafik Respon *Surface Roughness*

Gambar 8. menunjukkan bahwa *surface roughness* terkecil didapat ketika konsentrasi elektrolit berada pada *level* satu, yaitu 5%, tegangan pada *level* satu, yaitu 11 volt, dan *gap* permesinan berada pada *level* tiga, yaitu 5 mm. Nilai konsentrasi elektrolit dan tegangan memiliki pengaruh yang sama terhadap *surface roughness*, yaitu semakin tinggi nilai konsentrasi dan tegangan maka *surface roughness* yang di hasilkan akan semakin tinggi, berbeda dengan *gap* permesinan, yaitu semakin tinggi *gap* maka nilai *surface roughness* semakin kecil.

B. Analisis Statistik

Analisis statistik bertujuan agar hasil eksperimen (sampel) layak untuk diterapkan di dunia industri (populasi).

1. Analisis Statistik MRR

Berdasarkan uji normalitas menggunakan Kolmogorov Smirnov test, didapatkan p-value sebesar 0,12 (lebih besar dari $\alpha=5\%$), sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai respon MRR terdistribusi normal. Langkah selanjutnya adalah menganalisis nilai MRR dengan *Analysis of Variance* (ANOVA), yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3.

Table 3 Anova MRR

Source of variation	DF	SS	MS	P-Value
Konsentrasi	2	0,000013	0,000006	0
Tegangan	2	0,000004	0,000002	0
Gap	2	0,000005	0,000002	0

Error	20	0,000002	0
Total	26	0,000023	

Berdasarkan analisis ANOVA, semua faktor yang terlibat dalam penelitian ini memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon ($p\text{-value} < \alpha=5\%$). Setelah menyimpulkan bahwa semua respon berpengaruh, dilakukan optimasi dengan rasio S/N untuk mengetahui *level* terbaik bagi setiap faktornya, serta mengetahui faktor mana yang paling mempengaruhi respon. Perhitungan rasio S/N menggunakan *larger is better* karena semakin besar nilai MRR maka semakin baik. Dari perhitungan rasio S/N didapatkan bahwa konsentrasi elektrolit adalah faktor yang paling mempengaruhi MRR, diikuti oleh *gap* permesinan dan tegangan. MRR tertinggi didapatkan ketika *level* faktornya adalah level tiga untuk konsentrasi dan tegangan dan level satu untuk *gap* permesinan, yang berarti merupakan kombinasi 15%, 14V, dan 3 mm. Hasil perhitungan rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 4.

Table 4 Rasio S/N MRR

Level	Konsentrasi	Tegangan	Gap
1	-58,4	-56,37	-
2	-54,34	-54,69	-
3	-51,45	-53,13	-
Delta	6,95	3,24	3,67
Rangking	1	3	2

Setelah mengetahui *level* optimal serta faktor paling berpengaruh, analisis dilanjutkan dengan analisis regresi untuk mendapatkan persamaan matematis MRR. Model matematis yang didapat dari analisis regresi adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} MRR &= -0,001437 \\ &+ (0,01687 \times \text{konsentrasi}) \\ &+ (0,000296 \times \text{tegangan}) \end{aligned}$$

$$-(0,000482 \times \text{gap})$$

Untuk meyakinkan bahwa model matematis yang dibangun adalah sesuai, maka dilakukan validasi. Tabel V menunjukkan data validasi MRR. Data validasi tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil prediksi dari model yang telah dibangun, dan didapat deviasi hanya sebesar 6,18%.

Table 5 Validasi MRR

Replikasi	MRR	Rata-rata
1	0,004438	0,004042
2	0,004063	
3	0,003625	

Deviasi

$$= \frac{|MRR \text{ Eksperimen} - MRR \text{ Prediksi}|}{\text{Max}(MRR \text{ Eksperimen}, MRR \text{ Prediksi})}$$

$$\text{Deviasi} = \frac{|0,004042 - 0,003792|}{0,004042}$$

$$\text{Deviasi} = 0,0618 = 6,18\%$$

2. Analisis Statistik *Overcut*

Berdasarkan uji normalitas menggunakan Kolmogorov Smirnov test, didapatkan $p\text{-value}$ sebesar 0,99 (lebih besar dari $\alpha=5\%$), sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai respon *overcut* terdistribusi normal. Langkah selanjutnya adalah menganalisis nilai *overcut* dengan *Analysis of Variance* (ANOVA), yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 6.

Table 6 Anova *Overcut*

Source of variation	DF	SS	MS	P-Value
Konsentrasi	2	0,01846	0,00923	0
Tegangan	2	0,00382	0,00191	0,017
Gap	2	0,00309	0,00154	0,033

Error	20	0,00760	0,00038
		5	
Total	26	0,03299	
		2	

Berdasarkan analisis ANOVA, semua faktor yang terlibat dalam penelitian ini memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon ($p\text{-value} < \alpha=5\%$). Setelah menyimpulkan bahwa semua respon berpengaruh, dilakukan optimasi dengan rasio S/N untuk mengetahui *level* terbaik bagi setiap faktornya, serta mengetahui faktor mana yang paling mempengaruhi respon. Perhitungan rasio S/N menggunakan *smaller is better* karena semakin kecil nilai *overcut* maka semakin baik. Dari perhitungan rasio S/N didapatkan bahwa konsentrasi elektrolit adalah faktor yang paling mempengaruhi *overcut*, diikuti oleh tegangan dan *gap* permesinan. *Overcut* terendah didapatkan ketika *level* faktornya adalah *level* satu untuk konsentrasi dan tegangan serta *level* tiga untuk *gap* permesinan, yang berarti merupakan kombinasi 5%, 11V, dan 5 mm. Hasil perhitungan rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 7.

Table 7 Rasio S/N *Overcut*

Level	Konsentrasi	Tegangan	Gap
1	13,17	12,25	11,47
2	11,64	12,18	12,08
3	10,98	11,36	12,25
Delta	2,19	0,89	0,78
Rangking	1	2	3

Setelah mengetahui *level* optimal serta faktor paling berpengaruh, analisis dilanjutkan dengan analisis regresi untuk mendapatkan persamaan matematis *overcut*.

Model matematis yang didapat dari analisis regresi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Overcut} \\ = & 0,1285 + (0,6282 \times \text{konsentrasi}) \\ & + (0,00921 \times \text{tegangan}) \\ & - (0,01288 \times \text{gap}) \end{aligned}$$

Untuk meyakinkan bahwa model matematis yang dibangun adalah sesuai, maka dilakukan validasi. Tabel VIII menunjukkan data validasi *overcut*. Data validasi tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil prediksi dari model yang telah dibangun, dan didapat deviasi hanya sebesar 3,26%.

Table 8 Validasi *Overcut*

Replikasi	Overcut	Rata-rata
1	0,203	0,1904
2	0,196	
3	0,172	

Deviasi

$$= \frac{|OC \text{ Eksperimen} - OC \text{ Prediksi}|}{\text{Max}(OC \text{ Eksperimen}, OC \text{ Prediksi})}$$

$$\text{Deviasi} = \frac{|0,1904 - 0,19682|}{0,19682}$$

$$\text{Deviasi} = 0,0326 = 3,26\%$$

3. Analisis Statistik *Surface Roughness*

Berdasarkan uji normalitas menggunakan Kolmogorov Smirnov test, didapatkan $p\text{-value}$ sebesar 0,67 (lebih besar dari $\alpha=5\%$), sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai respon *surface roughness* terdistribusi normal. Langkah selanjutnya adalah menganalisis nilai *surface roughness* dengan *Analysis of Variance* (ANOVA), yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 9.

Table 9 Anova *Surface Roughness*

Source of variation	DF	SS	MS	P-Value
Konsentrasi	2	347,632	173,816	0
Tegangan	2	69,632	34,816	0
Gap	2	37,630	18,815	0
Error	20	33,007	1,650	
Total	26	487,901		

Berdasarkan analisis ANOVA, semua faktor yang terlibat dalam penelitian ini memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon ($p\text{-value} < \alpha=5\%$).

Setelah menyimpulkan bahwa semua respon berpengaruh, dilakukan optimasi dengan rasio S/N untuk mengetahui *level* terbaik bagi setiap faktornya, serta mengetahui faktor mana yang paling mempengaruhi respon. Perhitungan rasio S/N menggunakan *smaller is better* karena semakin kecil nilai *surface roughness* maka semakin baik. Dari perhitungan rasio S/N didapatkan bahwa konsentrasi elektrolit adalah faktor yang paling mempengaruhi *surface roughness*, diikuti oleh tegangan dan *gap* permesinan. *Surface roughness* terendah didapatkan ketika level faktornya adalah *level* satu untuk konsentrasi, tegangan, dan *level* tiga untuk *gap* permesinan, yang berarti merupakan kombinasi 5%, 11V, dan 5 mm. Hasil perhitungan rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 10.

Table 10 Rasio S/N *Surface Roughness*

<i>Level</i>	Konsentrasi	Tegangan	<i>Gap</i>
1	-12,05	-15,71	-
2	-18,49	-17,09	-
3	-22,03	-19,77	-
Delta	9,98	4,06	1,56
Rangking	1	2	3

Setelah mengetahui level optimal serta faktor paling berpengaruh, analisis dilanjutkan dengan analisis regresi untuk mendapatkan persamaan matematis *surface roughness*.

Model matematis yang didapat dari analisis regresi adalah sebagai berikut:

$$Ra = -10,88 + (87,89 \times \text{konsentrasi}) + (1,311 \times \text{tegangan}) - (1,444 \times \text{gap})$$

Untuk meyakinkan bahwa model matematis yang dibangun adalah sesuai, maka dilakukan validasi. Uji F dan uji T dilakukan untuk mengetahui signifikansi model. Dari uji F, didapatkan $p\text{-value} < \alpha$, sehingga dapat disimpulkan bahwa model regresi cukup signifikan untuk dijadikan acuan memprediksi nilai *surface roughness*. Dari uji T, didapatkan nilai $p\text{-value}$ yang juga lebih kecil dari $\alpha=5\%$, sehingga dapat disimpulkan bahwa semua faktor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai *surface roughness*. Validasi dilanjutkan dengan uji *goodness of fit*. Nilai prediction R-square didapatkan sebesar 90,61%, yang berarti bahwa model matematis dapat menjelaskan variasi *surface roughness* sebesar 90,61% saat model tersebut digunakan untuk melakukan prediksi respon *surface roughness*.

C. Multi-objective Optimization

Multi objective optimization bertujuan untuk mendapatkan waktu dan kualitas permesinan yang optimal, dengan mempertimbangkan MRR (waktu permesinan), *overcut* (kualitas permesinan), dan *surface roughness* (kualitas permesinan) secara simultan (bersamaan). Metode yang digunakan dalam melakukan optimasi *multi-objective* kali ini adalah *grey relational analysis*. Metode ini dapat mengoptimasi banyak respon karena mengkonversi nilai-nilai pada respon yang memiliki satuan yang berbeda ke dalam *grey relational grade*. Optimasi dicapai dengan meminimalkan *overcut* dan *surface roughness*, serta memaksimalkan MRR. Terdapat beberapa langkah dalam *grey relational analysis* :

1. Transformasi Nilai Respon Menjadi Rasio S/N

Transformasi nilai respon menjadi rasio S/N dapat menggunakan Persamaan (3) dan Persamaan (4). Persamaan (3) digunakan ketika kriteria yang digunakan adalah *larger is better*, sedangkan Persamaan (4)

digunakan ketika kriteria yang digunakan adalah *smaller is better*.

dengan:

y_{ij} = nilai respon

i = 1, 2, 3, ..., n (jumlah eksperimen)

j = 1, 2, ..., k (replikasi)

x = jumlah replikasi

Hasil transformasi nilai respon menjadi rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 11.

Table 11 Rekapitulasi Rasio S/N

Ru n	Rasio S/N		
	MRR	Overcut t	Ra
1	-58,235	13,071	-10,560
2	-58,931	13,967	-10,821
3	-58,047	12,486	-14,760
4	-54,305	11,678	-17,383
5	-56,166	12,247	-16,833
6	-52,541	11,007	-21,268
7	-56,565	12,010	-19,181
8	-48,982	10,336	-23,621
9	-48,803	10,585	-23,273

2. Normalisasi Rasio S/N

Langkah selanjutnya dalam *grey relational analysis* adalah melakukan normalisasi nilai rasio S/N menggunakan Persamaan (5), sehingga nilainya dalam rentang nol sampai satu.

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n)}{\max(y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n) - \min(y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n)} \quad (5)$$

Hasil normalisasi rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 12.

Table 12 Normalisasi Rasio S/N

Run	Normalisasi		
	MRR	Overcut	Ra
1	0,069	0,753	1,000
2	0,000	1,000	0,980
3	0,087	0,592	0,678

4	0,457	0,370	0,478
5	0,273	0,526	0,520
6	0,631	0,185	0,180
7	0,234	0,461	0,340
8	0,982	0,000	0,000
9	1,000	0,069	0,027

3. Menghitung Grey Relational Coefficient

Setelah mendapatkan normalisasi nilai rasio S/N,

$$S/N_{(LB)} = -10 \log_{10} \left[\left(\frac{1}{x} \right) \times \left(\sum \frac{1}{y_{ij}^2} \right) \right] \quad (3)$$

$$S/N_{(SB)} = -10 \log_{10} \left[\sum \frac{y_{ij}^2}{n} \right] \quad (4)$$

data tersebut ditransformasi kembali menjadi nilai *grey relational coefficient* menggunakan Persamaan (6). Namun untuk mendapatkan nilai *grey relational coefficient* harus terlebih dahulu mencari *deviation sequence*. *Deviation sequence* didapatkan melalui Persamaan (7).

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta \min + \varphi \times \Delta \max}{\Delta 0_i(k) + \varphi \times \Delta \max} \quad (6)$$

$$\Delta 0_i(k) = \|y_0(k) - y_i(k)\| \quad (7)$$

dengan:

$\varepsilon_i(k)$ = Grey Relational Coefficient

$\Delta 0_i(k)$ = deviation sequence

$\Delta \min = \min \min \|y_0(k) - y_j(k)\|$

$\Delta \max = \max \max \|y_0(k) - y_j(k)\|$

φ = distinguishing coefficient (0,5)

Hasil perhitungan *deviation sequence* ditunjukkan pada Tabel 12.

Table 12 Deviation Sequence

Run	Deviation Sequences		
	MRR	Overcut	Ra
1	0,931	0,247	0,000
2	1,000	0,000	0,020
3	0,913	0,408	0,322
4	0,543	0,630	0,522
5	0,727	0,474	0,480
6	0,369	0,815	0,820
7	0,766	0,539	0,660
8	0,018	1,000	1,000
9	0,000	0,931	0,973

Hasil perhitungan *grey relational coefficient* ditunjukkan pada Tabel 13.

Table 13 Grey Relational Coefficient

Run	Grey Relational Coefficient		
	MRR	Overcut	Ra
1	0,349	0,670	1,000
2	0,333	1,000	0,962
3	0,354	0,551	0,609
4	0,479	0,442	0,489
5	0,408	0,514	0,510
6	0,575	0,380	0,379
7	0,395	0,481	0,431
8	0,966	0,333	0,333
9	1,000	0,349	0,339

4. Menghitung Grey Relational Grade

Nilai *grey relational grade* menunjukkan urutan kombinasi faktor yang menghasilkan nilai respon paling optimal. Nilai *grey relational grade* merupakan nilai rata-rata dari setiap kombinasi yang didapatkan menggunakan Persamaan (8).

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (8)$$

Hasil dari *grey relational grade* dan ranking setiap kombinasinya dirangkum pada Tabel 14.

Table 14 Grey Relational Grade

Run	A (%)	B (V)	C (mm)	Grey Relational Grade	Rank
1	5	11	3	0,673	2

2	5	12,5	4	0,765	1
3	5	14	5	0,504	5
4	10	11	4	0,470	7
5	10	12,5	5	0,477	6
6	10	14	3	0,445	8
7	15	11	5	0,436	9
8	15	12,5	3	0,544	4
9	15	14	4	0,563	3

*A adalah konsentrasi elektrolit, B adalah tegangan, dan C adalah gap permesinan

Tabel 14 tidak menggambarkan semua kemungkinan kombinasi dari faktor. Hal ini dikarenakan metode desain eksperimen yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah Taguchi, yang tidak menjalankan semua kombinasi. Selain itu, belum diketahui faktor mana yang paling mempengaruhi respon. Pada Tabel 15 ditunjukkan *grey relational grade* dan ranking dari semua faktor dan level.

Table 15 Grey Relational Grade Setiap Faktor dan Level

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3	Delta	Rank
A	0,647	0,464	0,514	0,183	1
B	0,526	0,595	0,504	0,091	3
C	0,554	0,599	0,472	0,127	2

*A adalah konsentrasi elektrolit, B adalah tegangan, dan C adalah gap permesinan

Dari tabel XV terlihat bahwa konsentrasi elektrolit merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam mendapatkan nilai respon yang optimal, diikuti oleh gap permesinan dan tegangan. Kombinasi optimal dari setiap level faktor didapat ketika *grey relational grade* nya maksimal sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi faktor untuk mendapat nilai MRR, *overcut*, dan *surface roughness* optimal adalah level satu untuk konsentrasi, level dua untuk tegangan, dan level dua untuk gap permesinan, yaitu 5%, 12,5V, dan 4 mm.

Kesimpulan

Nilai MRR tertinggi didapatkan pada kombinasi: 15% konsentrasi elektrolit, 14 volt tegangan, dan 3 mm *gap* permesinan. Untuk nilai *overcut* terendah didapatkan pada kombinasi: 5% konsentrasi elektrolit, 11 volt tegangan, dan 5 mm *gap* permesinan. *Surface roughness* terendah didapatkan pada kombinasi: 5% konsentrasi elektrolit, 11 volt tegangan, dan 5 mm *gap* permesinan.

Nilai kombinasi respon MRR, *overcut*, dan *surface roughness* optimal didapatkan pada kombinasi nilai factor: 5% konsentrasi elektrolit, 12,5 volt tegangan, dan 4 mm *gap*.

Faktor yang paling berpengaruh bagi respon MRR adalah konsentrasi elektrolit, diikuti oleh *gap* permesinan dan tegangan. Untuk respon *overcut*, faktor yang paling berpengaruh adalah konsentrasi elektrolit, kemudian diikuti oleh tegangan dan *gap* permesinan sedangkan faktor paling berpengaruh untuk respon *surface roughness* adalah konsentrasi elektrolit, diikuti oleh tegangan dan *gap* permesinan.

Faktor yang paling berpengaruh untuk menghasilkan kombinasi respon MRR, *overcut*, dan *surface roughness* optimal adalah konsentrasi elektrolit, diikuti oleh *gap* permesinan dan tegangan.

References

- [1] Bhattacharyya, B., Mitra, S., Boro, K, A., 2002, Electrochemical Machining: new possibilities for micromachining, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, no. 18, pp. 283-289..
- [2] Das, M.K., Kumar, K., Barman, T.K., Sahoo, P., 2014, Optimization of Surface Roughness and MRR in Electrochemical Machining of EN31 Tool Steel Using Grey-Taguchi Approach, *Procedia Materials Science* 6, pp 729 – 740.
- [3] Jain, N.K. & Jain, V.K., 2007, Optimization Of Electro-Chemical Machining Process Parameters Using Genetic Algorithms, *Machining Science and Technology*, vol. 11, pp. 235-258
- [4] Goswami, R., Chaturvedi, V., & Chouhan, R., 2013, Optimization of Electrochemical Machining Process Parameters Using Taguchi Approach, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, vol. 5, no. 5, pp. 999 – 1006.
- [5] Satryana, W, F., 2014, *Karakteristik Proses Permesinan Electrochemical Machining Dalam Pembuatan Multilayered Microfilters dengan Metode Die Sinking*, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin Dan Industri FT UGM, Yogyakarta.
- [6] Aladiat, A.A., 2015, *Study on Characteristics of Electrochemical Machining to Produce Multilayered Micro-Filters*, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin Dan Industri FT UGM, Yogyakarta.
- [7] A. Sudiarso, N.L.F. Ramdhani, and M. Mahardika, “Material Removal Rate on Electrochemical Machining of Brass, Stainless Steel, and Aluminium using Brass Electrodes”, *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME)*, vol. 1, no. 1, pp. 14-17, 2013.