

OPTIMASI PARAMETER PROSES PEMESINAN ECM (*ELECTROCHEMICAL MACHINING*) SKALA LABORATORIUM DENGAN METODE TAGUCHI-*GREY RELATIONAL ANALYSIS* (GRA)

Galang Sandy Prayogo^{1*}, Nuraini Lusi¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Banyuwangi, Indonesia, 68461

ABSTRAK

Pemesinan elektrokimia (ECM) adalah metode pemesinan non konvensional yang unik dalam proses pembentukan benda kerja untuk parameter optimal karena memiliki keuntungan seperti tidak adanya keausan pada pahat (*tool*), sifat lapisan permukaan setelah pengerjaan mirip dengan bahan inti dan kualitas serta akurasi permukaan meningkat bersamaan dengan peningkatan laju pelepasan material. Keuntungan lain dari pemesinan elektrokimia, yaitu tentang ekologi sehingga menciptakan minat industri dalam berbagai elemen manufaktur yang terbuat dari bahan dengan sifat khusus seperti pada pembuatan *turbine blade*. Dalam penelitian ini akan dilakukan eksperimen tentang optimasi parameter proses pemesinan ECM seperti *voltage*, konsentrasi jenis cairan elektrolit, dan *gap width* terhadap respon kekasaran permukaan dan *material removal rate* (MRR). Metode penelitian yang digunakan adalah metode multirespon dengan DOE (*design of experiment*) Taguchi dan *Grey Relational Analysis* (GRA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *setting* kombinasi variabel-variabel proses yang signifikan untuk memaksimalkan MRR dan meminimalkan kekasaran permukaan berdasarkan hasil optimasi dengan menggunakan metode Taguchi-GRA adalah kombinasi faktor *voltage* pada 48 Volt, konsentrasi elektrolit pada 150 g/l, dan *gap width* pada 2 mm. Variabel proses yang memiliki kontribusi terbesar terhadap variasi respon adalah yaitu *voltage* sebesar 65,18%, kemudian variabel *gap width* sebesar 23,55%, dan kontribusi oleh konsentrasi elektrolit adalah sebesar 11,22%.

Kata kunci : *Electrochemical Machining (ECM); Grey relational analysis (GRA); material removal rate; surface roughness; SKD11*

ABSTRACT

This research was carried out on electrochemical machining (ECM) process using a workpiece material of SKD 11 tool steel and electrode of brass. Three process variables, i.e., voltage, electrolyte concentration and gap width with three levels for each process variables investigated. Based on the number of process variables and its level, an orthogonal array of L9 and two times replications employed in the design of the experiment. Setting a combination of significant machining parameters to maximize the material removal rate and minimize the surface roughness of the workpiece based on the results of optimization using the Taguchi method and Grey relational analysis is a combination of voltage factors at level 3 of 48 V, electrolyte concentration at level 2 of 150 g/l, and gap width at level 2 of 2 mm. Machining parameter that has the greatest contribution is a voltage of 65.18%, and the gap width is 23.55%. Then the contribution of electrolyte concentration which is 11.22%. Based on the results of confirmation experiments reveal that grey relational analysis coupled with principal component analysis can effectively acquire the optimal combination of cutting parameters.

Keywords: *Electrochemical Machining (ECM); Grey relational analysis (GRA); material removal rate; surface roughness; SKD11*

* Penulis korespondensi

Email: galangsandy@poliwangi.ac.id

Diterima 20 Januari 2021; Penerimaan hasil revisi 20 Agustus 2021; Disetujui 31 Agustus 2021

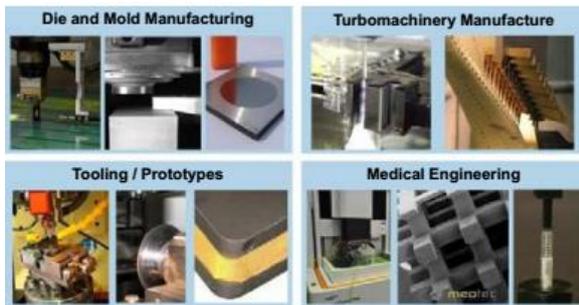
Tersedia online Maret 2022

AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin © 2022

1. PENDAHULUAN

Electrochemical machining (ECM) adalah salah satu dari proses pemesinan non konvensional yang secara luas telah digunakan di berbagai bidang industri manufaktur. ECM adalah teknologi manufaktur tingkat lanjut dengan prinsip pengikisan material secara non mekanis dan menawarkan alternatif yang lebih baik dalam menghasilkan fitur makro, mikro dan nano berbentuk 3-D dengan tingkat keakuratan yang tinggi dan bentuk komponen yang kompleks serta untuk material benda kerja yang sulit dikerjakan pada proses pemesinan konvensional (Tang & Guo, 2013).

ECM mampu melakukan proses pemesinan pada material yang bersifat konduktor dengan laju pengerjaan material yang tinggi tanpa pengaruh dari sifat mekaniknya, seperti kekerasan, elastisitas dan kerapuhan. Pada umumnya ECM digunakan untuk membuat rongga cetakan dari material hardened tool steel dengan kekerasan sangat tinggi (>55HRC) yang tidak dapat diproses dengan secara konvensional. Aplikasi ECM telah digunakan pada pembuatan *turbine blade, dies, moulding, gear*, dan implant dalam biomedik seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Aplikasi ECM dalam industri manufaktur

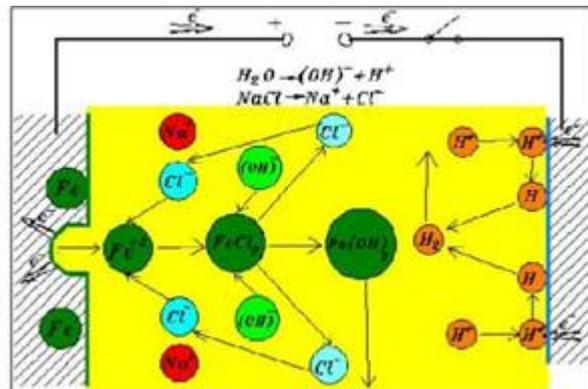
ECM adalah salah satu metode pemesinan non konvensional untuk memotong benda kerja pada bahan yang sulit dikerjakan seperti paduan titanium dan paduan berbasis nikel. ECM adalah metode alternatif untuk membuat sebuah lubang kecil karena memiliki beberapa keunggulan proses seperti tidak ada keausan pada pahat, tidak ada pengaruh terhadap sifat mekanik material, tidak ada tegangan sisa, hasil permukaan yang bagus, tidak ada bekas pemotongan, tidak ada distorsi, dan dapat membuat banyak lubang secara simultan(Li, Wei, Guo, & Sealy, 2015).

Optimasi parameter proses sangat penting untuk hasil output produksi yang tinggi, karena kompleksitas proses ECM, maka pengaturan parameter pemesinan yang optimal untuk meningkatkan kualitas output sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas akhir dari produk.

Kualitas optimal dari benda kerja pada ECM dapat dihasilkan melalui kontrol kombinasi berbagai parameter proses yang tepat (Chakradhar & Gopal, 2011).

Beberapa parameter proses pada ECM adalah *voltage, feed rate, gap width*, dan cairan elektrolit yang digunakan. Kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan karakteristik mikro geometri dari permukaan pemesinan dan merupakan faktor penting untuk mengevaluasi kualitas permukaan pemesinan. Dalam proses ECM, *voltage* yang rendah dapat mengurangi keseimbangan celah pemesinan dan menghasilkan kekasaran permukaan dan toleransi yang lebih baik. Konsentrasi elektrolit yang rendah dapat mengurangi celah pemesinan dan memberikan hasil akhir kekasaran permukaan yang lebih baik. Suhu elektrolit yang rendah juga mendorong permukaan yang lebih baik (Soni & Thomas, 2017).

Elektrolit adalah asam atau lebih umumnya adalah garam yang dilarutkan kedalam air. NaCl dan NaNO₃ pada ECM umumnya digunakan sebagai cairan elektrolit yang disuplai mengalir melalui celah dengan kecepatan 20-30 m/s. Cairan elektrolit yang digunakan pada proses ECM diperlukan untuk terjadinya reaksi kimia pada permukaan benda kerja. Cairan elektrolit diberikan dengan cara disemprotkan atau di *flushing* diantara benda kerja dan elektrode (pada gap) sehingga cairan elektrolit akan berfungsi sebagai media untuk membawa panas hasil reaksi dari daerah pengerjaan dan juga berfungsi untuk membawa geram yang dihasilkan keluar dari gap sehingga menghindari penempelan partikel-partikel geram hasil proses pengerjaan pada elektrode. Reaksi elektrokimia pada proses ECM ditunjukkan pada Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Diagram reaksi elektrokimia dari besi dengan elektrolit NaCl

Penentuan konsentrasi dan jenis cairan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi proses pemesinan.

Studi tentang pengaruh parameter proses ECM dengan respon MRR (*material removal rate*) dan kekasaran permukaan pada material aluminium alloy dan mild steel (Bisht, Vimal, & Chaturvedi, 2013). Parameter yang divariasikan adalah voltage, electrolyte flow rate, tool feed rate dan current. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa electrolyte flow rate adalah parameter signifikan untuk meningkatkan MRR dan mengurangi kekasaran permukaan.

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. Metode Taguchi biasa digunakan untuk optimasi proses pada satu respon. Namun, adanya olaborasi dengan metode optimasi lain seperti grey relational analysis (GRA), fuzzy logic, dan weighted principal components analysis (WPCA) memungkinkan metode Taguchi dapat digunakan untuk melakukan optimasi terhadap beberapa respon secara serentak.

Penelitian terhadap variabel ECM pada MRR dan Ra yang berbeda pada baja perkakas EN31 menggunakan teknik optimisasi multirespon Taguchi dan Grey Relational Analysis (GRA) telah . Kesimpulan yang didapatkan yaitu bahwa konsentrasi elektrolit memiliki peranan penting dan berpengaruh pada respons MRR dan Ra (Das, Kumar, Barman, & Sahoo, 2014). Metode Taguchi dan gabungan metode neuro fuzzy-PCA digunakan dalam penentuan kombinasi parameter pemesinan ECM terhadap respon material removal rate (MRR), surface roughness (SR), dan radial overcut (ROC) (Sohrabpoor, Khanghah, Shahraki, & Teimouri, 2016). Parameter yang divariasikan adalah electrolyte concentration, electrolyte flow rate, applied voltage, dan feed rate. Hasil yang diperoleh adalah kombinasi parameter proses yang menghasilkan respon optimum secara serentak adalah electrolyte concentration pada 20,68 g/l, flow rate pada 20 l/min, voltage pada 14,17 V, dan feed rate pada 0,8 mm/min. Respon MRR yang optimum yang didapatkan adalah 0,681 mg/min, SR dengan nilai 5,386 μm , dan ROC dengan nilai 0,326 mm.

Berdasarkan hal-hal yang telah dijelaskan, maka akan dilakukan suatu penelitian tentang penentuan setting parameter pada ECM untuk mengoptimalkan respon MRR dan kekasaran permukaan yang diamati secara serentak dengan tujuan menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang rendah dan proses pengerjaan yang cepat. Material yang akan digunakan dalam penelitian proses ECM ini adalah tool steel. Parameter proses yang akan divariasikan adalah voltage, electrolyte concentration, gap width, dan ampere. Metode optimasi yang akan digunakan pada penelitian ini adalah metode Taguchi untuk analisis

dan optimasi single response dan selanjutnya digunakan metode GRA sebagai metode optimasi multi respon.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Neraca Digital

Neraca digital digunakan untuk mengetahui massa benda kerja, baik sebelum maupun sesudah proses perautan dengan menggunakan ECM. Pada penelitian ini digunakan neraca digital dengan ketelitian 0,01 gram.

b. Mikrometer

Mikrometer digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja dan elektrode baik sebelum maupun sesudah proses perautan. Mikrometer yang digunakan adalah MITUTOYO dengan kecermatan 0,01 mm.

c. Surface roughness tester

Pengukuran angka kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo SurfTest seperti ditunjukkan oleh Gambar 3. Alat ini memiliki kecermatan sebesar 0,001 μm .



Gambar 3. Surface roughness tester

d. Spesifikasi Mesin ECM Skala Laboratorium

Mesin ECM yang digunakan adalah mesin ECM skala laboratu (*portable*) yang dapat diatur voltasenya, kedalaman pemakanan, arus listrik, lebar gap/celah, suhu larutan elektrolit, serta lama pemakanan. Spesifikasi mesin ECM yang dipakai pada pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 1. berikut ini.

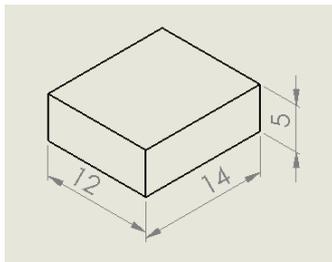
Tabel 1. Spesifikasi Mesin ECM Portable

Tegangan (Voltage)	Listrik	24-48 V
--------------------	---------	---------

Cairan elektrolit	NaCl
Konsentrasi elektrolit	10,15,20% NaCl
Suhu Eelektrolit	0-50°C
Dimensi	80 cmx60cmx60cm
Arus	Low, medium, high
Controller	Arduino UNO

e. *Workpiece*

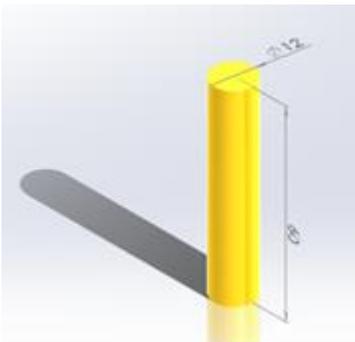
Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja SKD 61. Bentuk dan dimensi dari benda kerja yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Dimensi benda kerja

f. Pahat

Pahat yang digunakan adalah jenis pahat kuningan yang dibuat sedemikian rupa untuk memudahkan pengukuran.



Gambar 5. Dimensi pahat (tool)

2.2 Variabel Penelitian

Variable proses dalam penelitian ini adalah tegangan (24 V, 36 V, dan 48 V), kemudian gap width (1 mm, 2 mm, 3 mm), arus konsentrasi elektrolit sebesar 100, 150 dan 200 gl/l NaCl pada proses pemesinan ECM. Masing-masing variable proses memiliki tiga level sehingga dengan mempertimbangkan jumlah variabel yang terlibat, metode desain eksperimen Taguchi dipilih untuk menentukan urutan eksperimen. Variable proses dan level yang terlibat dalam penelitian ini dijelaskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variabel Proses dan level penelitian

Variabel Proses	Level		
	1	2	3

Tegangan (v)	24	36	48
Konsentrasi Elektrolit (g/l)	100	150	200
Gap width (mm)	1	2	3

Berdasarkan jumlah variabel pada masing-masing level, maka *design of experiment* (DOE) yang digunakan adalah matriks ortoghonal L₉ dengan urutan *run* seperti yang di tunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Matriks Orthogonal L₉

Run	Tegangan (Volt)	Konsentrasi Elektrolit (g/l)	Gap Width (mm)
1	24	100	1
2	24	150	2
3	24	200	3
4	36	100	2
5	36	150	3
6	36	200	1
7	48	100	3
8	48	150	1
9	48	200	2

Inti dari OA terletak pada pemilihan kombinasi level dari input desain parameter untuk setiap percobaan. Metode Taguchi melibatkan identifikasi faktor kontrol yang tepat untuk mendapatkan hasil proses yang optimal. OA digunakan untuk melakukan serangkaian eksperimen dan hasil dari eksperimen ini digunakan untuk menganalisis data dan memprediksi kualitas komponen yang dihasilkan (Athreya & Venkatesh, 2012).

2.3 Metode Taguchi-GRA

Dalam metode Taguchi, optimasi hanya dapat dilakukan untuk satu respon saja. Untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi dan *grey relational analysis* (GRA). Metode GRA diawali dengan teori *grey system* yang dibuat oleh Dr. Julong Deng pada tahun 1982, yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan. GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey*.

Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode Taguchi-Grey adalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai rasio S/N untuk masing-masing respon.
2. Normalisasi rasio S/N dari masing-masing respon.
3. Menghitung *grey relational coefficient*

4. Menghitung *grey relational grade*
5. Analisis Variansi (ANAVA)
6. Menentukan kombinasi variabel optimum.
7. Melakukan eksperimen konfirmasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel proses yang terdapat pada mesin ECM yang diduga memiliki pengaruh terhadap respon laju pengerjaan bahan, dan kekasaran permukaan. Variable proses tersebut yaitu *voltage* (*v*), konsentrasi elektrolit, dan *gap width* (*mm*). Data yang dapat diambil pertama kali adalah waktu pengerjaan yang diambil pada saat proses pemotongan berlangsung, kemudian dilanjutkan dengan pengambilan data kekasaran permukaan. Eksperimen dilakukan dengan dua replikasi dan setiap replikasi dilakukan pengambilan data waktu pengerjaan dan kekasaran permukaan. Pengambilan data untuk respon kekasaran permukaan dilakukan setelah semua proses pemotongan selesai. Pengambilan data kekasaran permukaan pada tiap spesimen dilakukan sebanyak tiga kali. Adapun langkah-langkah pengambilan data hasil eksperimen:

- 1) Pengambilan data berat awal benda kerja. Pengambilan data berat awal benda kerja dilakukan sebelum proses ECM, dengan cara menimbang setiap benda kerja masing-masing dilakukan dua kali replikasi. Setelah proses penimbangan selesai, selanjutnya data berat awal benda kerja tersebut diambil nilai rata-rata.
 - 2) Pengambilan data waktu proses pengerjaan benda kerja. Pengambilan data waktu proses pengerjaan benda kerja dilakukan saat elektroda pertama kali menyentuh benda kerja dan waktu saat elektroda selesai melakukan proses ECM. Waktu proses pengerjaan benda kerja adalah selisih antara waktu saat elektroda menyentuh benda kerja dikurangi dengan waktu elektroda selesai melakukan proses ECM.
 - 3) Pengambilan data berat akhir benda kerja setelah proses ECM. Pengambilan data berat akhir benda kerja setelah proses ECM, dilakukan dengan cara menimbang kembali benda kerja tersebut. Penimbangan dilakukan pada setiap benda kerja dan masing-masing dilakukan dua kali replikasi. Langkah selanjutnya berat benda kerja tersebut kemudian diambil nilai rata-rata.
 - 4) Pengambilan data MRR. Berdasarkan data yang telah didapatkan dari hasil percobaan dapat dihitung *material remove rate* (MRR) atau laju pembuangan material dengan menggunakan rumus:

$$MRR = \frac{\text{Volume Material yang Terbuang}}{\text{Waktu Pengerjaan}} \quad (1)$$

Data hasil perhitungan MRR dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Hasil Eksperimen MRR

Run	Voltage (Volt)	Konsentrasi elektrolit	Gap Width (mm)	MRR (mm ³ /min)
1	24	100	1	0,067
2	24	150	2	0,080
3	24	200	3	0,060
4	36	100	1	0,052
5	36	150	2	0,070
6	36	200	3	0,053
7	48	100	1	0,069
8	48	150	2	0,153
9	48	200	3	0,070
 - 5) Pengambilan data kekasaran permukaan. Pengambilan data kekasaran permukaan benda kerja dilakukan dengan menggunakan alat ukur *surface roughness tester* yang memiliki kecermatan sebesar 0,001 μm. Data hasil kekasaran permukaan dapat dilihat pada Tabel 5.
- Tabel 5. Data Hasil Kekasaran Permukaan
- | Run | Voltage (Volt) | Konsentrasi elektrolit | Gap Width (mm) | Kekasaran permukaan (μm) |
|-----|----------------|------------------------|----------------|--------------------------|
| 1 | 24 | 100 | 1 | 1,992 |
| 2 | 24 | 150 | 2 | 2,367 |
| 3 | 24 | 200 | 3 | 3,449 |
| 4 | 36 | 100 | 1 | 2,728 |
| 5 | 36 | 150 | 2 | 3,562 |
| 6 | 36 | 200 | 3 | 4,24 |
| 7 | 48 | 100 | 1 | 4193 |
| 8 | 48 | 150 | 2 | 4,271 |
| 9 | 48 | 200 | 3 | 4,828 |
- Untuk memperoleh kombinasi parameter proses yang menghasilkan nilai MRR yang optimal, maka harus dicari harga rasio S/N (*signal to noise*) dengan karakteristik semakin besar semakin baik. Adapun untuk menghitung harga S/N digunakan rumus sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \quad (2)$$

Untuk respon kekasaran permukaan kan dicari harga rasio S/N dengan karakteristik semakin kecil semakin baik. Adapun untuk menghitung harga rasio S/N kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n (1/y_i^2)}{n} \right] \quad (3)$$

Data hasil perhitungan rasio S/N untuk masing-masing respon dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Hasil Kekasaran Permukaan

Run No.	MRR (mm ³ /min)	S/N	Ra (µm)	S/N
1	0,067	-23,479	1,992	-11,097
2	0,08	-21,938	2,367	-7,484
3	0,06	-24,437	3,449	-10,754
4	0,052	-25,680	2,728	-8,717
5	0,07	-23,098	3,562	-11,034
6	0,053	-25,514	4,24	-10,555
7	0,069	-23,223	4,193	-7,952
8	0,153	-16,306	4,271	-12,002
9	0,07	-23,098	4,828	-6,188

Tahapan selanjutnya adalah proses normalisasi rasio S/N masin-masing respon. Normalisasi bertujuan untuk mengubah nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1 berdasarkan karakteristik kualitas respon. Karakteristik kualitas dari rasio S/N dalam semakin besar semakin baik. Karakteristik kualitas ini berlaku untuk semua rasio S/N dari masing-masing respon. Normalisasi rasio S/N dihitung dengan persamaan berikut:

$$X_i^* = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}, \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, 18, \quad k = 1, 2, 3.$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N masing-masing respon untuk setiap kombinasi faktor dapat dilihat pada Tabel 8 berikut ini.

Tabel 8. Normalisasi rasio S/N dari respon

Run No.	Rasio S/N MRR	X_i^*	Rasio S/N Kekasaran Permukaan	X_i^*
---------	---------------	---------	-------------------------------	---------

1	-23,479	0,2349	-11,097	0,1557
2	-21,938	0,3992	-7,484	0,7771
3	-24,437	0,1326	-10,754	0,2147
4	-25,679	0,0000	-8,717	0,5651
5	-23,098	0,2754	-11,034	0,1665
6	-25,514	0,0177	-10,555	0,2489
7	-23,223	0,2621	-7,952	0,6967
8	-16,306	1,0000	-12,002	0,0000
9	-23,098	0,2754	-6,188	1,0000

Seluruh $x_0(k)$ kemudian dikonversi menjadi *grey relational coefficient* (GRC) dengan menggunakan persamaan sabagai berikut :

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

Dimana $\Delta_{0i} = \|x_0(k) - x_i(k)\|$ adalah perbedaan nilai absolute antara $x_0(k)$ dan $x_i(k)$; ζ dan *distinguishing coefficient*; $\Delta_{min} = \forall j^{min} \in i \forall k^{min} \|x_0(k) - x_j(k)\|$ adalah nilai terkecil dari Δ_{0i} ; dan $\Delta_{max} = \forall j^{max} \in i \forall k^{max} \|x_0(k) - x_j(k)\|$ adalah nilai terbesar dari Δ_{0i} .

GRC dari masing-masing karakteristik respon diubah menjadi satu keluaran sebagai multi-respon yang disebut *grey relational grade* (GRG). GRG merupakan perhitungan rata-rata dari masing-masing GRC dari nilai laju pengerjaan bahan dan nilai kekasaran permukaan. Untuk nilai GRC dan GRG setiap kombinasi variable respon dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. GRC dan GRG

Run No.	GRC		GRG
	Material Removal Rate	Ra	
1	0,3952	0,3719	0,3836
2	0,4542	0,6917	0,5730
3	0,3657	0,3890	0,3773
4	0,3333	0,5348	0,4341
5	0,4083	0,3750	0,3916
6	0,3373	0,3996	0,3685
7	0,4039	0,6224	0,5132
8	1,0000	0,3333	0,6667
9	0,4083	1,0000	0,7042

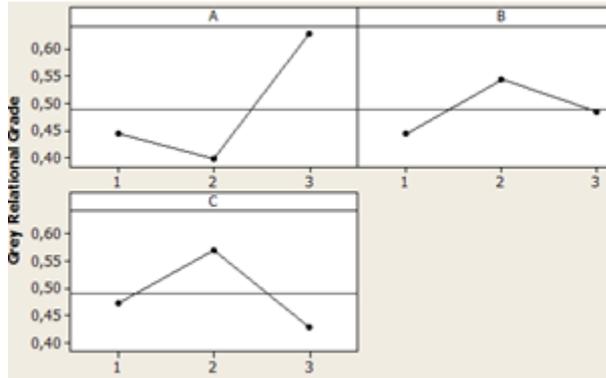
Desain eksperimen yang berupa matriks ortogonal memungkinkan untuk mengelompokkan efek atau pengaruh dari masing-masing variabel-variabel proses pada level yang berbeda, nilai rata-rata dari GRG untuk setiap level variable ditunjukkan oleh Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Rata-rata nilai GRG

Variabel Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Max-Min
-----------------	---------	---------	---------	---------

<i>Voltage</i>	0,4446	0,3981	0,6280	0,2299	Error	2	0,0320	0,0000	0,04
Konsentrasi elektrolit	0,4436	0,5438	0,4833	0,1002	Total	8	0,0886	0,0443	100,00
<i>Gap Width</i>	0,4729	0,5704	0,4274	0,1430					

Berdasarkan rata-rata nilai GRG dan plotting nilai tersebut pada masing-masing level variable proses, dapat ditentukan nilai level untuk kombinasi faktor yang menghasilkan respon yang optimum. Kombinasi variabel proses tersebut ditunjukkan pada grafik Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Plot rata-rata GRG pada masing-masing level variabel Proses

Berdasarkan rata-rata nilai GRG dan *plotting* nilai tersebut pada masing-masing level variabel, dapat ditentukan nilai level untuk kombinasi variabel yang menghasilkan respon optimum secara serentak. Kombinasi faktor tersebut ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Kombinasi Variabel untuk Respon Optimum

Faktor	Level	Nilai
<i>voltage</i> (V)	Level 3	48 Volt
Konsentrasi Elektrolit	Level 2	150 g/l
<i>Gap Width</i>	Level 2	2 mm

Analisis Variansi (ANOVA)

Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada GRG yang dianggap merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon. ANOVA bertujuan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap variasi respon secara serentak dan besarnya kontribusi faktor terhadap respon. Hasil dari ANOVA dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. ANOVA dari GRG

Variabel penelitian	DF	SS	MS	% Kontribusi	P-value
<i>Voltage</i>	2	0,0886	0,0443	65,18	0,000
Konsentrasi <i>Electrolyte</i>	2	0,0152	0,0076	11,22	0,008
<i>Gap Width</i>	2	0,0320	0,0160	23,55	0,004

Berdasarkan analisis variansi (ANOVA) yang telah dilakukan, dapat diketahui pengaruh faktor *voltage*, konsentrasi elektrolit, dan *gap width* besar kontribusinya terhadap respon laju pengerjaan bahan dan kekasaran permukaan.

a. Variabel *voltage*

Pada proses pemotongan dengan ECM, tinggi rendahnya tegangan akan mempengaruhi kesetimbangan celah pemesian sehingga juga memberikan pengaruh terhadap kekasaran permukaan. Semakin besar tegangan, energi yang digunakan untuk mengikis benda kerja akan semakin besar. Hal ini tentu akan membuat waktu pengerjaan menjadi semakin singkat. Energi yang lebih besar tentu akan membuat panas terkonduksi lebih dalam, sehingga lapisan *heat affected zone* yang terbentuk menjadi lebih tebal. Selain itu, benda kerja yang terkikis semakin banyak dan kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja juga akan semakin dalam. Hal ini tentu akan menyebabkan kekasaran permukaan menjadi lebih tinggi.

b. Variabel Konsentrasi Elektrolit

Konsentrasi elektrolit yang rendah dapat menurunkan celah pemesian, sehingga menghasilkan permukaan yang lebih bagus dan control konsentrasi yang lebih baik. Variable konsentrasi elektrolit secara statistik mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap proses pemesian ECM pada respon-respon yang diamati secara individu.

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi hasil yang telah diperoleh. Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi seting variabel yang diperoleh dari hasil optimasi. Pada penelitian ini, juga dilakukan eksperimen dengan menggunakan seting variabel kombinasi awal. Kombinasi awal merupakan kombinasi faktor yang diseting pada level tengah, dalam hal ini variable diseting pada level 2 (dua). Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk mengetahui peningkatan nilai dari masing-masing respon, baik secara individu maupun secara serentak. Hal itu dilakukan dengan membandingkan hasil respon pada kombinasi awal dengan hasil respon pada kombinasi optimum.

Karakteristik kualitas semakin besar semakin baik dari respon laju pengerjaan bahan telah terpenuhi, besarnya peningkatan respon laju pengerjaan bahan dari 0,0768 mm³/min menjadi 0,1928 mm³/min. Karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari respon kekasaran permukaan juga

telah terpenuhi. Hal ini ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai dari respon tersebut pada kombinasi optimum. Besarnya penurunan respon kekasaran permukaan adalah 4,109 μm menjadi 3,641 μm . Perbandingan dari masing-masing respon secara individu antara kombinasi awal dengan kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Hasil dari eksperimen konfirmasi

	Initial	Optimal Process Condition	
		Prediksi	Eksperimen
Level variabel	A ₂ B ₂ C ₂	A ₃ B ₂ C ₂	A ₃ B ₂ C ₂ ₁
Material			
Removal Rate (mm ³ /min)	0,076	0,115	0,192
Kekasaran permukaan (μm)	4,109	3,188	3,641
GRG	0,531	0,761	0,647

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian dan proses optimasi yang telah dilakukan maka dari penelitian dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Seting kombinasi variabel-variabel proses yang signifikan untuk memaksimalkan MRR dan meminimalkan kekasaran permukaan berdasarkan hasil optimasi dengan menggunakan metode Taguchi GRA adalah kombinasi faktor voltage pada level 3, konsentrasi elektrolit pada level 2, dan gap width pada level 2.
- Variabel proses yang memiliki kontribusi terbesar terhadap variasi respon yaitu *voltage* sebesar 65,18%, kemudian gap width sebesar 23,55%, dan kontribusi oleh konsentrasi elektrolit adalah sebesar 11,22% .

Pada penelitian awal ini beberapa parameter proses dianggap konstan. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengamatan terhadap respon yang sama dengan cara memvariasikan variabel proses tersebut pada proses ECM untuk mendapatkan respon MRR yang maksimum.

REFERENSI

- Athreya, S., & Venkatesh, Y. D. (2012). Application of Taguchi method for optimization of process parameters in improving the surface roughness of lathe facing operation. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 1(3), 13–19.
- Bisht, B., Vimal, J., & Chaturvedi, V. (2013).

Parametric Optimization of Electrochemical Machining Using Signal-To-Noise (S/N) Ratio. *International Journal of Modern Engineering Research*, 3(4), 1999–2006.

- Chakradhar, D., & Gopal, A. V. (2011). Multi-Objective Optimization of Electrochemical machining of EN31 steel by Grey Relational Analysis. *International Journal of Modeling and Optimization*, 1(2), 113–117. <https://doi.org/10.7763/IJMO.2011.V1.20>
- 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, 729–740.
- Li, Z. Y., Wei, X. T., Guo, Y. B., & Sealy, M. P. (2015). State-of-art, challenges, and outlook on manufacturing of cooling holes for turbine blades. *Machining Science and Technology*, 19(3), 361–399.
- Sohrabpoor, H., Khanghah, S. P., Shahraki, S., & Teimouri, R. (2016). Multi-objective optimization of electrochemical machining process, 1683–1692. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7448-9>
- Soni, S. K., & Thomas, B. (2017). A comparative study of electrochemical machining process parameters by using GA and Taguchi method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(6), 8–15. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/6/062038>
- Tang, L., & Guo, Y.-F. (2013). Experimental Study of Special Purpose Stainless Steel on Electrochemical Machining of Electrolyte Composition. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(4), 457–462. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.746784>