

Analisa MRR, EWR, DOC terhadap Beberapa Material Elektroda pada Proses EDM Die Sinking

Petrus Londa

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung
Jl. Geger Kalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Bandung 40012, Telp. (022) 2013789.
E-mail: petruslonda@yahoo.com

Abstract

Electrical Discharge Machining (EDM) is a non-conventional machining process. EDM can cut all types of electrically conductive workpieces, mainly used on workpieces that very hard and have complex shapes, which cannot be cut by conventional machines. This study using the Taguchi method to determine machining variables that significantly affecting the cutting process in some electrode materials (copper, brass, aluminium) and workpieces from material K460 (amutite S). Taguchi L₂₅ Orthogonal standard arrays and analysis of variance (ANOVA) can determine the performance of cutting variables (PON, POFF, GAP, QDON, SERVO and LT) with the variables studied were Electrode Wear Rate (EWR), Material Removal Rate (MRR) and Overcut Diameter (DOC). The results of this study are displayed in the form of tables and graphs, which show the machining variables that significantly affecting the cutting process according to the type of electrode material used.

Keywords: ANOVA, DOC, EDM, EWR, Electrodes, MRR, Taguchi, Machining Variables.

Abstrak

Electrical Discharge Machining (EDM) adalah non-conventional machining process. EDM dapat memotong semua jenis benda kerja yang bersifat penghantar listrik, terutama digunakan pada benda kerja yang sangat keras dan memiliki bentuk yang rumit, yang tidak dapat dipotong oleh mesin konvensional. Penelitian ini menggunakan metode Taguchi untuk menentukan variabel pemesinan yang secara signifikan mempengaruhi proses pemotongan pada beberapa material elektroda (tembaga, kuningan, aluminium) dan benda kerja dari bahan K460 (amutit S). Taguchi L₂₅ Orthogonal standard arrays dan analysis of variance (ANOVA) dapat menentukan performa variabel pemotongan (PON, POFF, GAP, QDON, SERVO dan LT) dengan variabel yang diteliti adalah Electrode Wear Rate (EWR), Material Removal Rate (MRR) dan Diameter Overcut (DOC). Hasil dari penelitian ini ditampilkan dalam bentuk tabel-tabel dan grafik yang menunjukkan variabel pemesinan yang signifikan mempengaruhi proses pemotongan sesuai dengan jenis material elektroda yang digunakan.

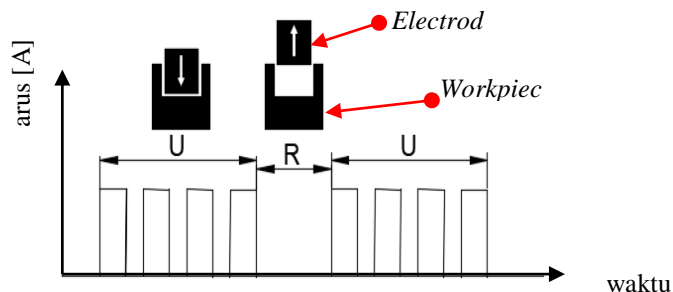
Kata kunci: ANOVA, DOC, EDM, EWR, Elektroda, MRR, Taguchi, Variabel pemesinan.

1. Pendahuluan

Proses EDM terutama digunakan pada pekerjaan-pekerjaan presisi dan bentuk yang rumit serta pada material yang sangat keras, seperti *ceramics, maraging steels, cast-alloys, titanium* [1]. Antara benda kerja dan elektroda tidak saling kontak secara fisik, melainkan terjadi loncatan bunga api listrik atau *spark* pada jarak terdekat antara elektroda dengan benda kerja atau yang di sebut *spark gap* [2]. Material elektroda dapat di kategorikan menjadi tiga, yaitu *metallic, graphite* dan paduan antara *metallic* dan *graphite* [3]. Proses pemotongan pada EDM ini seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Pemotogan terjadi pada periode **U**, pada peristiwa ini arus akan mengalir dengan durasi yang sangat cepat (terjadi peristiwa PON dan POFF secara bergantian), setelah itu elektroda akan mundur ketika memasuki periode **R**, pada peristiwa ini geram-geram hasil pemotongan akan terbawa pergi oleh cairan dielektrik. Selanjutnya elektroda akan melakukan pemotongan lagi pada periode **U** yang berikutnya. Peristiwa ini akan terulang kembali sampai mencapai kedalaman pemotongan yang di inginkan.

Selanjutnya, setelah terjadinya loncatan bunga api listrik; aliran listrik terhenti, menyebabkan penurunan temperatur secara mendadak dan mengakibatkan gelembung uap mengkerut sehingga bagian benda kerja dan elektroda yang meleleh akan terpancar keluar (terjadi erosi) dan meninggalkan bekas-bekas berupa kawah halus pada permukaan material. Proses erosi yang terjadi pada elektroda menyebabkan keausan elektroda atau *electrode wear rate* (EWR), sedangkan proses erosi pada benda kerja merupakan proses pengerjaan benda kerja, produktivitas pengerjaan benda kerja di tunjukan oleh *material removal rate* (MRR) [5]. Proses erosi pada permukaan benda kerja dan elektroda tersebut tergantung pada variabel-variabel pemesinan, pada mesin EDM *Neu-ar type ZNC* variabel-variabel tersebut adalah : (i) Polaritas (+/-), (ii) Konduktivitas panas dari material, (iii) Titik leleh, (iv) Interval waktu (POFF), (v) Intensitas dari loncatan bunga api listrik (PON), (vi) QDON, (vii) QUP, (viii) SPD, (ix) SERVO, (x) GAP, (xi) LT. Variabel pemesinan yang digunakan pada penelitian ini adalah LT, PON, POFF, QDON, SERVO dan GAP dengan tujuan untuk mengetahui laju keausan dari tiga jenis elektroda dan laju keausan benda kerja, serta *Diameter Overcut* (DOC). Studi tentang keausan ini sudah di

lakukan oleh beberapa peneliti seperti Priyesh N. Santoki pada 2015, beliau menganalisa MRR yang dipengaruhi oleh elektroda tembaga, *graphite* dan *silver* pada benda kerja AISI 304 *Stainless Steel* (SS-304) [6]. Begitu juga yang dilakukan oleh Dhanabalan S., dkk. pada 2015, mereka melakukan eksperimen dengan menggunakan elektroda tembaga, kuningan dan aluminium pada material titanium alloy untuk mengetahui EWR, MRR dan SR. Adapun variabel pemesinan yang mereka gunakan adalah *current*, *pulse on time* (PON) dan *pulse off time* (POFF) [7]. Selain itu studi tentang *Diameter Overcut* (DOC) juga dilakukan oleh Prabhjot Balraj Singh, dkk pada Januari 2015. Mereka menggunakan istilah *Radial Overcut* (ROC) pada material H-13 *steel* dan elektroda dari bahan *cryogenic cooled* [8].

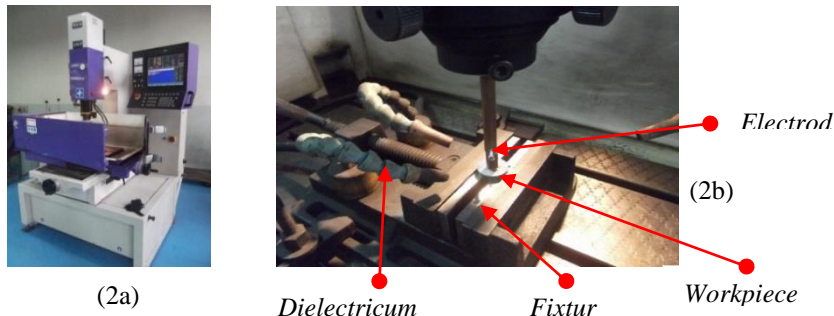


Gambar 1. Mekanisme Proses Pemotongan [4]

2. Material dan metodologi

2.1. Metode Eksperimen

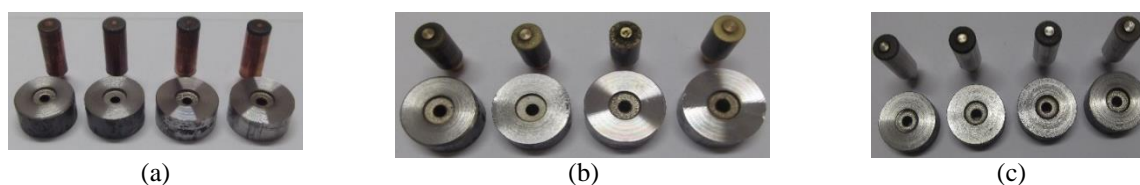
Eksperimen dilakukan untuk mengetahui keausan pada elektroda atau *Electrode Wear Rate* dan keausan pada benda kerja atau *Material Removal Rate* dan juga untuk mengetahui *Diameter Overcut* (DOC). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan mesin EDM *Neu-ar type ZNC* yang ada di Politeknik Negeri Bandung, seperti yang di perlihatkan pada Gambar 2a dan proses *setup* mesin ditunjukkan dalam Gambar 2b. Mesin EDM ini memiliki kapasitas cairan dielektrik 300 liter. Menggunakan DC *servo* untuk menghasilkan tegangan listik untuk pemotongan benda kerja. Benda kerja terendam di dalam cairan dielektrik dan diberi penyemprotan dari samping dengan tekanan 8 psi. untuk mempermudah mengeluarkan geram sisa pemotongan. Sedangkan MRR dan EWR adalah perbedaan berat benda kerja dan berat elektroda sebelum dan sesudah proses pemesinan dan di hitung dalam satuan gram.



Gambar 2. Mesin EDM *Neu-ar type ZNC* dan *setup*

2.2. Alat dan bahan penelitian

Bahan yang di perlukan dalam penelitian ini adalah: (i) Elektroda dari tembaga, kuningan dan aluminium masing-masing berdiameter 10 mm dengan komposisi kimia seperti dalam Tabel 1. (ii) Fluida dielektrik *kerosene* dengan viskositas 2 Cst dan titik api 78°C. (iii) Benda kerja dari baja perkakas K460 (amutit S) dengan kekerasan 66 HRC, komposisi kimia di perlihatkan dalam Tabel 2. Sedangkan bentuk dan ukuran yang dihasilkan adalah lubang tidak tembus (buntu) dengan ukuran diameter 10 mm dan kedalaman 2 mm. Hasil eksperimen diperlihatkan dalam Gambar 3a untuk benda kerja dan elektroda tembaga, Gambar 3b untuk benda kerja dan elektroda kuningan, Gambar 3c untuk benda kerja dan elektroda aluminium, (iv) Alat-alat yang digunakan seperti jangka sorong digital dengan ketelitian 0,02 mm dan timbangan digital berkapasitas 300 gram dengan ketelitian 0,01 gram.



Gambar 3. Hasil eksperimen elektroda tembaga, kuningan dan aluminium

Tabel 1. Komposisi kimia untuk material elektroda.

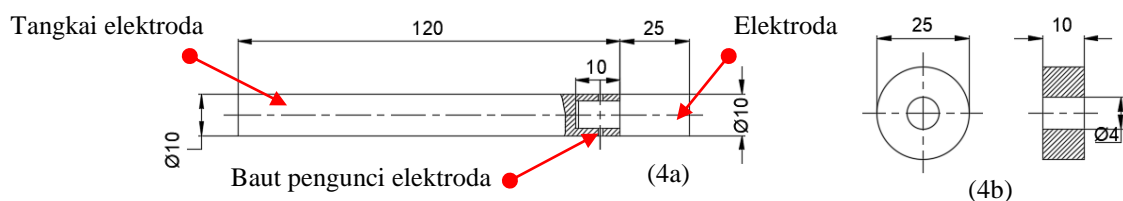
No.	Tembaga		Kuningan		Aluminium	
	Unsur Kimia	Komposisi (%)	Unsur Kimia	Komposisi (%)	Unsur Kimia	Komposisi (%)
1.	Sn	0,055	Sn	0,69912	Si	0,07591
2.	Zn	0,023	Zn	39,90655	Fe	0,23941
3.	Pb	0,009	Pb	2,86303	Cu	0,00719
4.	Fe	0,024	Fe	0,50726	Mn	0,65609
5.	Ni	0,008	Ni	0,39704	Mg	3,98841
6.	Al	0,049	Al	0,20588	Zn	0,00658
7.	P	0,002	P	0,00556	Ti	0,06681
8.	Si	0,004	Si	0,01984	Cr	0,08302
9.	Mn	0,001	Mn	0,02881	Ni	0,00453
10.	S	0,000	S	0,00329	Sn	0,00026
11.	Sb	0,006	Sb	0,04555	Zr	0,00105
12.	Cu	99,820	Mg	0,00112	V	0,00564
13.			Cu	55,31690	Sb	0,00686
14.					Al	94,90950

Tabel 2. Komposisi kimia untuk material benda kerja

No.	Unsur kimia	Komposisi (%)	Kekerasan
1.	C	0,95	66 HRC
2.	Si	0,25	
3.	Mn	1,10	
4.	Cr	0,55	
5.	V	0,10	
6.	W	0,55	

2.3. Bentuk elektroda dan benda kerja

Bentuk elektroda di rancang sedemikian rupa sehingga mudah dalam penggunaan. Bentuk elektroda dan tangkai elektroda seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4a, bentuk demikian mempermudah dalam pergantian elektroda dimana pada tangkai elektroda di lengkapi dengan baut pengunci elektroda. Sedangkan bentuk benda kerja adalah bulat dengan diameter 25 mm, tebal 10 mm dan ke dua permukaan pada arah aksial di gerinda agar nampak lebih halus. Sedangkan pada pusat diameter di buat lubang tembus dengan diameter 4 mm untuk mempermudah aliran geram sisa pemotongan. Bentuk benda kerja di tunjukan dalam Gambar 4b.



Gambar 4. Tangkai elektroda dan benda kerja.

2.4. Rancangan penelitian

Paper ini menggunakan metode *Taguchi* untuk pengambilan data karena metode ini sangat efektif dalam mengambil keputusan terhadap suatu penelitian dengan multi parameter [9]. Pemilihan variabel proses EDM sebagai berikut:

a. Variabel yang di tetapkan

Sistem saluran pembawa partikel (geram) hasil pemotongan adalah terendam dalam cairan dielektrik dengan sedikit penyemprotan dari samping, polaritas (+) pada elektroda, kecepatan gerak spindel mesin (SPD = 60%), langkah bebas elektroda terhadap benda kerja setiap siklus (QUP = 1,5 mm).

b. Variabel bebas (*input variable*)

Variabel bebas terdiri dari *current* (LT), intensitas loncatan bunga api listrik atau *Pulse-on time* (PON), interval waktu pelepasan energi listrik atau *Pulse-off time* (POFF), lama waktu *discharge* (QDON), sensitifitas selama proses pemesinan (SERVO) dan *gap voltage* (GAP). Nilai dari masing-masing variabel pemesinan tersebut di bagi menjadi lima level, seperti yang diperlihatkan dalam Table 3.

Tabel 3. Nilai setiap level untuk *input variable*.

No.	Variabel pemotongan	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
1	LT [A]	3	6	12	21	45
2	PON [μs]	8	20	60	400	700
3	POFF [μs]	4	6	8	10	12
4	QDON [sec.]	1	3	6	9	12
5	SERVO [%]	10	40	50	70	80
6	GAP [volt]	25	35	45	65	85

c. Respon variabel: respon variabel adalah variabel yang di teliti (*output variable*) yaitu *Electrode Wear Rate* (EWR), *Diameter Overcut* (DOC) dan *Material Removal Rate* (MRR).

Skema eksperimen berdasarkan metode *Taguchi L₂₅ orthogonal standard arrays* [10] diperlihatkan dalam Tabel 4 yang terdiri dari 6 kolom variabel pemesinan, 25 baris menunjukkan nomor eksperimen; pada penelitian ini jumlah eksperimen adalah 25 baris x 6 pasangan variabel. Setiap variabel pemesinan di uji terhadap variasi variabel pasangannya, sehingga total eksperimen sebanyak 150 kali eksperimen. Nilai yang berada pada setiap matriks dalam Table 4 menunjukkan level dari masing-masing variabel pemesinan.

Tabel 4. Skema eksperimen *L₂₅ orthogonal standard array*

No. eks.	Variabel Pemesinan					
	LT	PON	POFF	QDON	SERVO	GAP
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

Prosedur penelitian meliputi tahapan-tahapan sebagai berikut: (i) mengukur berat awal masing-masing elektroda dan benda kerja dengan menggunakan timbangan, (ii) melakukan proses pengujian pada mesin EDM dengan pasangan variabel yang telah di tetapkan, (iii) mengukur masing-masing berat elektroda dan benda kerja setelah proses pengujian untuk mengetahui selisih berat dan mengukur diameter yang dihasilkan, (iv) menghitung semua hasil pengukuran yang di perlukan dengan menggunakan persamaan.

a. Metode *Taguchi*:

Metode *Taguchi* digunakan untuk menentukan efek dari enam variabel proses EDM (LT, PON, POFF, QDON, SERVO, GAP) terhadap tiga variabel *output* (EWR, MRR, DOC). Untuk mengukur interaksi dari ke enam variabel tersebut maka di gunakan pendekatan *signal-to-noise ratio* (*S/N ratio*). Untuk menghitung *S/N ratio* pada keausan elektroda menggunakan aturan *smaller-the-better* (*STB*) *quality characteristic* dengan persamaan:

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

dimana n adalah jumlah data yang diobservasi dan y_i adalah data ke i , sedangkan untuk menghitung S/N ratio pada keausan benda kerja menggunakan aturan *larger-the-better (LTB) quality characteristic* dengan persamaan:

$$\frac{s}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \tag{2}$$

Nilai setiap level dapat di hitung dengan persamaan:

$$\text{Nilai level} = \frac{\text{jumlah nilai } \frac{s}{N} \text{ ratio setiap baris di dalam level}}{\text{jumlah baris di dalam level}} \tag{3}$$

b. *Analysis of variance (ANOVA)*

ANOVA dapat menunjukkan persentase keausan dari masing-masing material yang digunakan dan dapat menunjukkan tingkat kepercayaan dari suatu analisa. Pada penelitian ini ditetapkan tingkat kepercayaan pada level 5%. Adapun parameter yang di hitung seperti *sum of square group*, *degree of freedom*, *variance* dan nilai kontribusi dari setiap parameter pemesinan pada analisa regresi. Penggunaan ANOVA memang cukup sulit karena berhubungan dengan rumus-rumus statistik seperti ditunjukkan dalam persamaan 4, 5 dan 6, namun untuk menganalisa data dalam penelitian ini menggunakan data analisa dari *excel 2016* dengan *two way ANOVA with replication*.

- Menentukan jumlah kuadrat dari data (*Sum of Square Group*)

$$SoS_{Group} = \sum_{i=1}^k \frac{T_{*i}^2}{n_i} - \frac{(T_{**})^2}{N} \tag{4}$$

dimana k adalah jumlah kolom, n_i banyaknya data pada kolom ke i , N adalah data keseluruhan, T_{*i} adalah jumlah data pada kolom ke i dan T_{**} adalah jumlah T_{*i} .

- Menentukan jumlah kuadrat tengah (*Mean Square*)

$$MS = \frac{SoS_{Group}}{DF} \tag{5}$$

dimana DF adalah *Degree of Freedom* ($k - 1$).

- Menentukan koefisien regresi menggunakan persamaan *multiple linear regression*

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \dots + \beta_p \cdot x_p + \epsilon \tag{6}$$

dimana Y adalah *dependent variable*, x_1, x_2, \dots, x_p adalah *independent variable*, β_0 adalah konstanta, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ adalah *regression variable* dan ϵ adalah *error*. Regresi linier berganda digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variabel pemotongan terhadap *Diameter Overcut (DOC)* dan menentukan persamaan regresi dari *DOC*.

3. Hasil dan pembahasan

a. *Analisa Taguchi*

Setelah melakukan eksperimen, maka di peroleh data keausan elektroda (EWR) dan data keausan benda kerja (MRR) serta data *Diameter overcut (DOC)* untuk setiap variabel pasangannya. Data-data tersebut di hitung dengan menggunakan persamaan (1) untuk elektroda, persamaan (2) untuk benda kerja dan nilai level persamaan (3), sedangkan untuk menentukan variabel pemesinan yang secara signifikan mempengaruhi ketahanan terhadap keausan elektroda dapat di tentukan dengan selisih nilai rata-rata terbesar dikurangi nilai rata-rata terkecil dari setiap level *S/N ratio (mean S/N ratio)*. Selisih nilai tersebut untuk masing-masing elektroda seperti yang ditunjukkan dalam Table 5.

Tabel 5. Signifikan parameter pemesinan untuk EWR.

No.	Machining parameters	Significance of machining parameters (Max - Min)		
		Elektrod tembaga	Elektroda kuningan	Elektroda aluminium
1.	LT	20.95756	1.469708	3.795390
2.	PON	23.86899	2.268670	6.075072
3.	POFF	7.280642	9.010765	15.523679
4.	QDON	10.07262	5.276370	18.501459
5.	SERVO	8.135114	6.848314	7.555161
6.	GAP	10.22062	7.629913	12.332263

Sebaliknya pada benda kerja diharapkan keausan yang maksimal, sehingga untuk menghitung *S/N ratio* pada setiap level kita gunakan aturan *LTB quality characteristic*, sedangkan untuk menentukan variabel pemesinan yang secara signifikan mempengaruhi keausan benda kerja dapat di tentukan dengan selisih nilai rata-rata terbesar dikurangi nilai rata-rata terkecil dari setiap level *S/N ratio (mean S/N ratio)*. Selisih nilai tersebut untuk masing-masing elektroda yang memotong benda kerja seperti yang ditunjukkan dalam Table 6.

Tabel 6. Signifikan parameter pemesinan untuk MRR, Benda kerja (K460)

No.	Machining parameters	Significance of machining parameters (Max – Min)		
		Elektrod tembaga	Elektroda kuningan	Elektroda aluminium
1.	LT	2.708026	2.100884	4.109834
2.	PON	6.015958	5.472836	5.472836
3.	POFF	11.86796	5.928073	5.928073
4.	QDON	7.467375	2.959388	2.959388
5.	SERVO	6.412955	4.988358	4.988358
6.	GAP	7.671720	13.89944	17.646348

b. *Analysis of Variance (ANOVA)*

Metode *taguchi* belum dapat menunjukkan persentase keausan dari masing-masing elektroda, oleh sebab itu gunakan ANOVA untuk menentukan persentase keausan dari masing-masing elektroda tersebut. Analisis ANOVA untuk *Electrode Wear Rate (EWR)* dan *Material Removal Rate (MRR)* ditampilkan dalam Table 7 dan Table 8.

Tabel 7. Analisis ANOVA untuk EWR

No.	Sample	dF	Sum of squares	Mean squares	F	P-value	F crit	% wear
1.	Tembaga	4	0.11371	0.02843	0.51772	0.72285	2.44724	1.85
2.	Kuningan	4	0.36371	0.09093	3.55210	0.00892	2.44724	5.90
3.	Aluminium	4	5.68610	1.42153	1.95223	0.10766	2.46261	92.25
Total		12	6.16352	1.54089				100

Tabel 8. Analisis ANOVA untuk MRR

No.	Sample	dF	Sum of squares	Mean squares	F	P-value	F crit	% wear
1.	Tembaga	4	0.54949	0.13737	1.84566	0.12602	2.46261	14.94
2.	Kuningan	4	0.20255	0.05064	3.34504	0.01294	2.46261	5.51
3.	Aluminium	4	2.92517	0.73129	3.48910	0.01037	2.46261	79.55
Total		12	3.67721	0.91930				100

c. Regresi linier

Analisa regresi digunakan untuk melihat penyimpangan diameter yang dihasilkan (DOC). Diameter dari ke tiga jenis elektroda adalah 10 mm, lubang yang dihasilkan diukur menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,02 mm. Persentase penyimpangan dalam analisa ini ditampilkan dalam Table 9 dan bentuk-bentuk penyimpangannya ditampilkan dalam grafik yang di ambil dari pasangan variabel pemotongan SERVO dan diperlihatkan dalam Gambar 5, 6 dan 7. Pasangan variabel pemotongan SERVO terdiri dari lima level dan nilainya dapat dilihat pada Tabel 3, sedangkan variasi pengujian setiap levelnya ditunjukkan dalam Tabel 10.

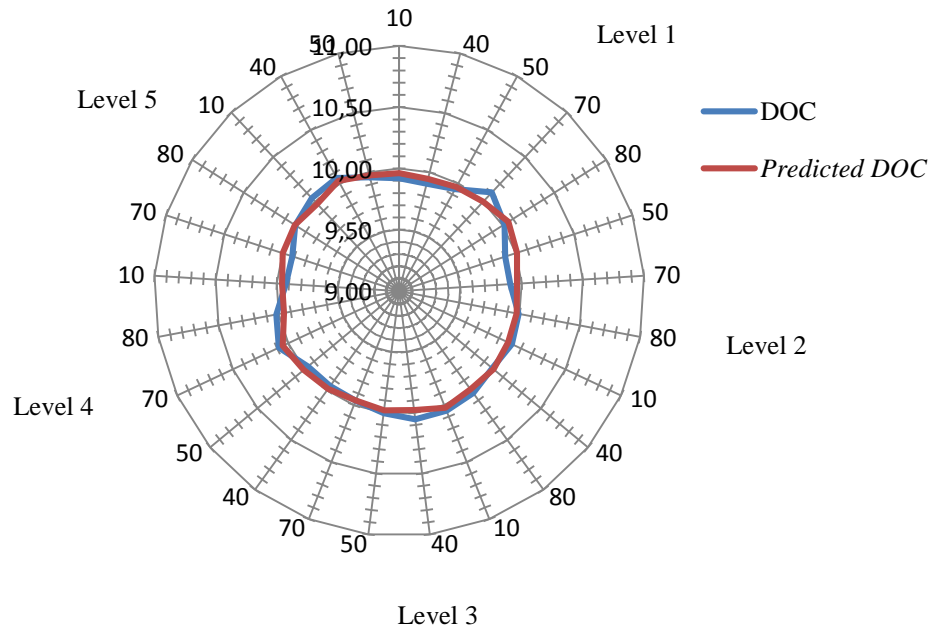
Tabel 9. Analisis Regresi linier untuk DOC

No.	Sample	dF	Sum of squares	Mean squares	F	Significance F	% DOC
1.	Tembaga	6	0.01978	0.00330	0.97497	0.46992	25.72
2.	Kuningan	6	0.01848	0.00308	0.97775	0.46827	24.03
3.	Aluminium	6	0.03864	0.00644	0.98537	0.46376	50.25
Total		18	0.07690	0.01282			100

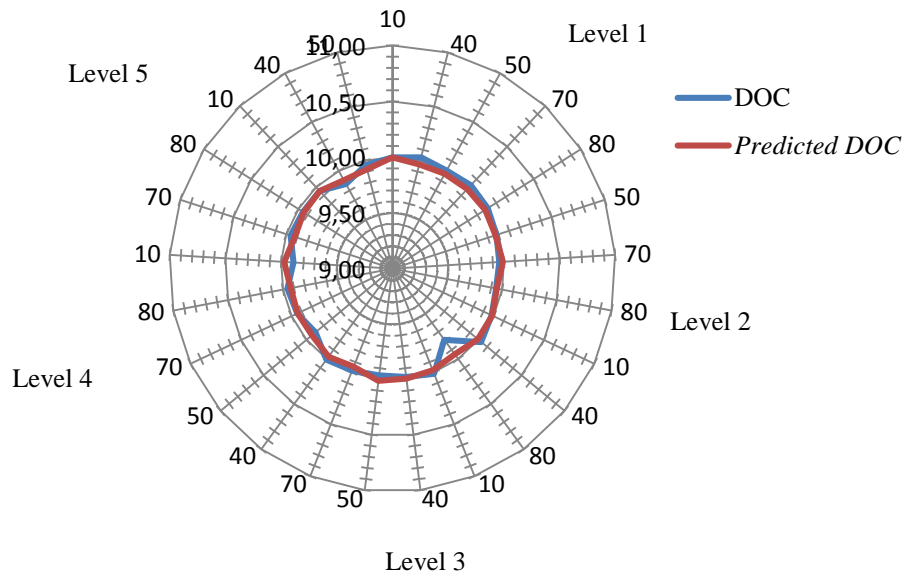
Tabel 10. Nilai level variabel pemotongan SERVO

Level	Nilai variable pemotongan SERVO
Level 1	10, 40, 50, 70, 80
Level 2	50, 70, 80, 10, 40
Level 3	80, 10 40, 50, 70
Level 4	40, 50, 70, 80,10
Level 5	70, 80, 10, 40, 50

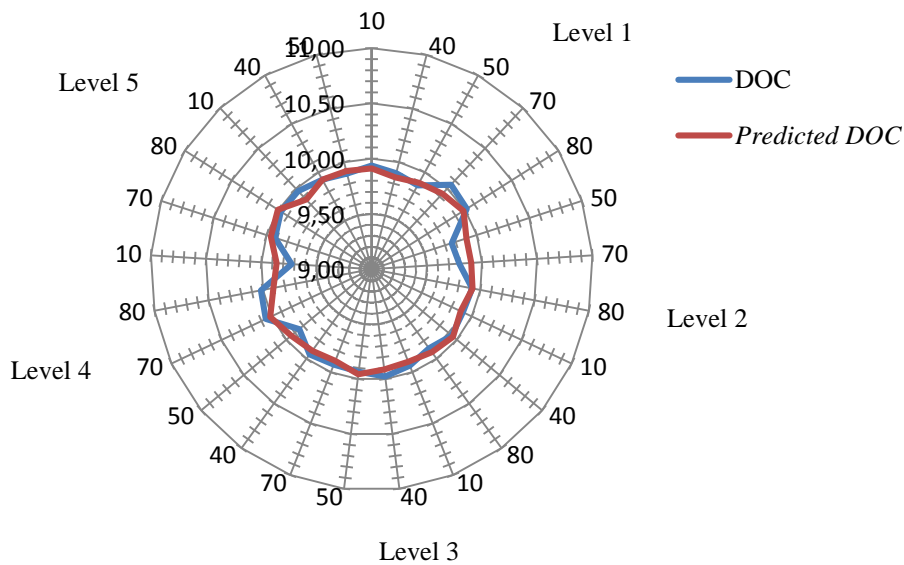
Efek dari *servo voltage* terhadap MRR dipengaruhi oleh durasi arus yang mengalir dan variabel pemotongan lainnya, seperti POFF. Meningkatnya laju keausan benda kerja (MRR) seiring dengan meningkatnya *servo voltage* [11]. Grafik-grafik pada Gambar 5, 6 dan Gambar 7 memperlihatkan pengaruh variabel SERVO terhadap perubahan diameter lubang benda kerja.



Gambar 5. Grafik regresi DOC vs SERVO untuk elektroda



Gambar 6. Grafik regresi DOC vs SERVO untuk elektroda kuningan.



Gambar 7. Grafik regresi DOC vs SERVO untuk elektroda aluminium.

4. Kesimpulan

Analisa *Taguchi* menunjukkan bahwa variabel pemotongan yang sangat mempengaruhi ketahanan terhadap keausan elektroda, masing-masing PON 23.86899 untuk elektroda tembaga, QDON 18.501459 untuk elektroda aluminium dan POFF 9.010765 untuk elektroda kuningan, hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 5, sedangkan variable pemotongan yang sangat mempengaruhi keausan benda kerja adalah POFF 11.86796 untuk elektroda tembaga, GAP 13,89944 untuk elektroda kuningan dan aluminium 17.646348, hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 6. Analisa ANOVA menunjukkan bahwa elektroda aluminium sangat tinggi keausannya (92,25%) di dibandingkan dengan elektroda kuningan (5,90%) dan tembaga (1,85%), hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 7, sedangkan pada MRR produktivitas pengerjaan benda kerja sangat bagus ditunjukkan oleh elektroda aluminium (79,55%) diikukuti oleh tembaga (14,94%) dan kuningan (5,51%), seperti ditunjukkan dalam Tabel 8. Penyimpangan DOC pada elektroda aluminium mencapai 50,25% diikuti dengan tembaga 25,72% dan kuningan 24,03%. Elektroda aluminium produktivitas pengerjaan benda kerjanya sangat bagus, namun keausannya tinggi, DOC-nya tidak baik. Elektroda tembaga produktivitas pengerjaan benda kerjanya bagus, keausan rendah. Elektroda kuningan produktivitas rendah, keausan tinggi, cukup bagus untuk DOC.

Referensi

- [1] Chandramouli S., dkk., 2014, "Optimization of Electrical Discharge Machining Process Parameters Using Taguchi Method", *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, ISSN 2250-3234 Volume 4, pp. 425-434.
- [2] Ghazey Ghanem Nagham. dkk., 2017, "Effect of Current, Pulse Duration, and Pulse Interval for Different Electrodes Shape on Electrode Wear Rate in EDM", *International Journal of Research science & Management*, ISSN 234-5197.
- [3] Banker K. S., dkk., 2013, "Performance Capabilities of EDM Machining Using Aluminium, Brass and Copper for AISI 304L Material", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, Volume 2, ISSN 2319 – 4847.
- [4] Amorim Fred L., dkk., 2007, "The Behavior of Graphite and Copper Electrodes on the Finish Die-Shinking Electric Discharge Machining (EDM) of AISI P20 Tool Steel", Vol. XXIX, No.4, *Pontifical Catholic University of Parana – PUCPR, Departement of Mechanical Engineering*, Brazil.
- [5] Gostimirovic Marin, dkk., 2012, "Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(1)(2012)173~179, Springer.
- [6] Priyesh N. Santoki, 2015, "An Experimental Study for Material Removal Rate in EDM using tool of graphite , copper & silver", *International Journal for Research in Education (IJRE) (Impact Factor 1.5), ICV: 6.30*, Vol. 4, Issue:1, (IJRE) ISSN: (P) 2347-5412 ISSN: (O) 2320-091X.
- [7] Dhanabalan S., dkk., 2015, "Experimental Investigation on Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy Using Copper, Brass and Aluminium Electrodes", *Journal of Engineering Science and Technology*, ©School of Engineering, Taylor's University, Vol. 10, NO. 1 (2015) 72 – 80.
- [8] Jeevamalar J., Ramabalan S., 2015, "Die Sinking EDM Process Parameters: a Review", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 4, ISSN 2278 – 0149.

- [9] Sandeep Kumar, 2013, “Current Research Trends in Electrical Discharge Machining: A Review”, *Research Journal of Engineering Sciences*, Vol. 2(2), 56-60, ISSN 2278 – 9472.
- [10] Ross J. Phillip, 1996, “Taguchi Techniques for Quality Engineering”, 2nd Ed, McGraw-Hill, New York San Francisco Washington D.C. Ghazey.
- [11] Muthukumar V., dkk, 2014, “Mathematical Modeling for Radial Overcut on Electrical Discharge Machining of Incoloy 800 by Response Surface Methodology”, *International Conference on Materials Processing and Characterisation*, *Procedia Materials Science* 6 (2014) 1674 – 1682.