

OPTIMASI MULTIRESPON PADA PROSES EDM SINKING BAJA ST 42 DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI DAN FUZZY LOGIC

Galang Sandy Prayogo¹, Nuraini Lusi¹, Dian Ridlo Pamuji¹

¹ Program Studi Teknik Mesin Politeknik Negeri Banyuwangi Jl. Raya Jember Km 13 Banyuwangi

Email: galangsandy@poliwangi.ac.id

ABSTRACT

The optimization technique of machining parameters considering multiple performance characteristics of non conventional machining EDM process using Taguchi method combined with fuzzy logic is presented in this study. ST 42 steel was chosen as material workpiece and graphite as electrode during this experiment. Performance characteristics such as material removal rate and overcut are selected to evaluate the effect of machining parameters. Current, pulse on time, pulse off time and discharging time/ Z down were selected as machining parameters. The experiments were conducted by varying that machining parameters in three different levels. Based on the Taguchi quality design concept, a L₂₇ orthogonal array table was chosen for the experiments. By using the combination of fuzzy logic and Taguchi, the optimization of complicated multiple performance characteristics was transformed into the optimization of a single response performance index. Optimal levels of machining parameters were identified by using fuzzy logic method. The statistical application of analysis of variance was used to determine the relatively significant machining parameters. The result of confirmation test indicated that the determined optimal combination of machining parameters effectively improve the performance characteristics of the machining EDM process on ST 42 steel.

Keywords: EDM, Taguchi, Fuzzy logic

PENDAHULUAN

Baja ST 42 merupakan salah satu jenis baja yang mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap keausan, konduktivitas tinggi, dan memiliki stabilitas yang tinggi dalam pengerasan. Aplikasi dari baja ST 42 ini adalah banyak digunakan dalam pembuatan produk *mould* dan *dies*. Tuntutan akan proses pemesinan untuk bahan sangat keras, benda kerja yang tipis, rumit dan lentur, akurat serta presisi mengharuskan penerapan mesin non konvensional. Dalam industri manufaktur, proses pemesinan non konvensional *Electrical Discharge Machining* (EDM) digunakan untuk mengerjakan produk-produk dengan bentuk permukaan yang kompleks. Proses pemotongan dengan EDM sinking menggunakan erosi yang terjadi karena adanya sejumlah loncatan bunga api listrik [1]. Loncatan bunga api listrik terjadi secara periodik pada celah di antara katoda (pahat) dengan anoda (benda kerja) di dalam cairan dielektrik. Hal ini membuat EDM sinking memiliki keunggulan dalam proses pemesinan untuk benda kerja dengan kontur yang kompleks dan tingkat kepresisian yang tinggi serta hasil permukaan yang halus [2] (Kumar dkk., 2012).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik kualitas yang kritis (*critical to quality/CTQ characteristic*) dan variabel yang berpengaruh pada proses EDM sinking. Tzeng dan Chen [3] meneliti hubungan antara kepresisian dimensi (*dimensional precision*) dan kepresisian akurasi (*dimensional accuracy*) untuk menentukan efisiensi dari masing-masing variabel proses. Material yang digunakan adalah baja SKD11 dengan elektroda *copper*. Melalui analisis varian dapat diketahui bahwa variabel *pulse duration*, *duty cycle*, dan *pulse peak*

current memberikan peranan penting dalam proses pemesinan dengan total prosentase kontribusi sebesar 81,5%.

Metode Taguchi digunakan untuk optimasi pada satu respon saja, dengan adanya metode *fuzzy logic*, metode Taguchi dapat digunakan untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak. Yan [4] melakukan penelitian mengenai optimasi pada proses EDM menggunakan metode Taguchi-fuzzy. Penelitian ini menghasilkan setting variabel proses optimal yang dapat menurunkan prosentase rasio keausan elektroda dari 29,9 % menjadi 2,07 % dan meningkatkan laju pengerjaan material (MRR) dari 0,00159 g/min menjadi 0,00383 g/min.

Penelitian lain mengenai optimasi pada proses EDM dilakukan oleh Lin [5] dengan menggunakan metode *grey-fuzzy*. Penelitian ini menghasilkan setting variabel proses yang dapat menurunkan prosentase rasio keausan elektroda, menurunkan kekasaran permukaan, dan meningkatkan laju pengerjaan material (MRR).

Khan, dkk [6], meneliti kinerja empat bentuk geometri dan konfigurasi elektroda EDM sinking, yaitu lingkaran, segitiga, dan berlian terhadap laju pembuangan material, laju keausan elektroda, rasio keausan, dan kekasaran permukaan pada baja ringan (*mild steel*). Elektroda lingkaran menghasilkan MRR maksimum, namun memiliki laju keausan lebih kecil. Rasio keausan elektroda tertinggi dihasilkan oleh elektroda berbentuk berlian. Pengaruh bentuk elektroda terhadap kekasaran permukaan tidak terlalu signifikan, dimana elektroda bentuk lingkaran menghasilkan permukaan yang lebih halus.

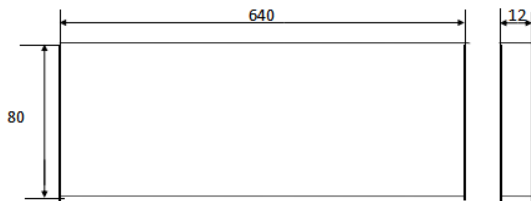
Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk menentukan seting variabel proses pada EDM *sinking* untuk menghasilkan laju pengerjaan material dan ketelitian ukur yang optimal. Metode Taguchi dan *fuzzy logic* akan digunakan pada penelitian ini untuk menghasilkan desain proses yang kokoh (*robust*) terhadap variabel gangguan.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Bahan Penelitian

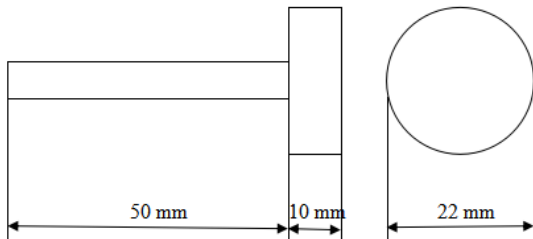
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja ST 42 ($\rho = 7,8.10^{-3} \text{ g/mm}^3$), dengan dimensi 640 mm x 80 mm x 12 mm. Gambar 1 menunjukkan bentuk dan dimensi dari benda kerja.



Gambar 1. Bentuk dan Dimensi Benda Kerja

2. Elektroda yang digunakan adalah grafit. Bentuk dan dimensi elektroda ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Bentuk dan Dimensi Elektrode

B. Mesin dan Peralatan

1. Mesin EDM Sinking.
Mesin EDM yang digunakan dalam penelitian ini adalah Mesin EDM tipe JS EDM NC-F seperti pada Gambar 3. Dengan spesifikasinya adalah sebagai berikut:
 1. Dimensi : 1400 x 800 x 500 mm
 2. Arah pergerakan : X – 850 mm
Y – 500 mm
Z – 500 mm
 3. Tegangan maksimum : 300 V
 4. Arus maksimum : 60 A
 5. *On time* maksimum : 2000 μs
 6. *Off time* maksimum : 900 μs



Gambar 3. Mesin EDM sinking Aristech LS-55

2. Peralatan ukur.
Peralatan ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:
 - a. Neraca Digital
Neraca digital digunakan untuk mengetahui massa elektrode, baik sebelum maupun sesudah proses perautan dengan menggunakan EDM sinking. Pada penelitian ini digunakan neraca digital Pocket Scale MH-200 dengan ketelitian 0,001 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. *Stop Watch*
Stop watch digunakan untuk menghitung waktu aktual proses pengerjaan dengan EDM, *stop watch* yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 0,01 detik.
 - d. Mistar Ingsut
Mistar insut digunakan untuk mengukur panjang lintasan pengerjaan oleh EDM. Pada penelitian ini digunakan mistar insut dengan ketelitian 0,05 mm.
 - e. *Profile projector*
Digunakan untuk mengukur diameter hasil pengerjaan mesin EDM.

C. Prosedur Eksperimen

Variabel proses yang digunakan pada eksperimen EDM *sinking* adalah *pulse current*, *off time*, *on time*, dan *discharging time/ Z down (s)* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variable proses dan level-levelnya

Variabel Proses	Level		
	1	2	3
<i>Pulse Current</i> (A)	30	45	60
<i>On time</i> (μs)	30	60	90
<i>Off time</i> (μs)	10	20	30
<i>Discharging time/ Z down</i> (s)	2	3	4

Rancangan eksperimen dan respon yang diperoleh menggunakan matriks otogonal L_{27} yang dipilih secara acak dengan metode Taguchi seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Replikasi dilakukan dua kali untuk masing-masing kombinasi.

Tabel 2. Rancangan Eksperimen L₂₇

No	Variabel Proses			
	PC	ON	OFF	Z Down
1	30	30	10	2
2	30	30	10	2
3	30	30	10	2
4	30	60	20	3
5	30	60	20	3
6	30	60	20	3
7	30	90	30	4
8	30	90	30	4
9	30	90	30	4
10	45	30	20	4
11	45	30	20	4
12	45	30	20	4
13	45	60	30	2
14	45	60	30	2
15	45	60	30	2
16	45	90	10	3
17	45	90	10	3
18	45	90	10	3
19	60	30	30	3
20	60	30	30	3
21	60	30	30	3
22	60	60	10	4
23	60	60	10	4
24	60	60	10	4
25	60	90	20	2
26	60	90	20	2
27	60	90	20	2

Langkah-langkah optimasi logika fuzzy berdasarkan metode Taguchi adalah sebagai berikut:

1. Menghitung rasio S/N untuk masing-masing respon
Rasio S/N digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk melakukan transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Karakteristik kualitas digunakan pada penelitian ini adalah semakin besar semakin baik untuk laju pengerjaan material dan semakin kecil semakin baik untuk ketelitian ukur (*overcut*). Oleh karena itu, persamaan untuk menghitung rasio S/N adalah [5];

- (1) Semakin besar semakin baik:

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

- (2) Semakin kecil semakin baik:

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

2. Fuzzification

Fuzzification merupakan proses perubahan nilai awal, yaitu rasio S/N menjadi bilangan fuzzy dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang digunakan untuk menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat

keanggotaan). Bentuk dari fungsi keanggotaan yang digunakan adalah kurva segitiga.

3. Fuzzy Rules

Setelah tahap *fuzzification*, kemudian membuat *fuzzy rules* untuk mendapatkan nilai fuzzy. *Fuzzy rules* yang merupakan aturan yang menjelaskan mengenai hubungan antara *output* dan nilai-nilai tertentu pada masing-masing variabel input juga sebagai alat penarik kesimpulan yang akan menghasilkan nilai fuzzy berdasarkan logika fuzzy. Biasanya *fuzzy rules* dibuat berdasarkan pengelompokan dengan bentuk batasan aturan *if-then* (jika-maka), contohnya sebagai berikut:

Rule ke-1: Jika x₁ adalah A₁, x₂ adalah B₁, ..., dan x_k

adalah Y₁ maka y adalah Z₁,

Rule ke-2: Jika x₁ adalah A₂, x₂ adalah B₂, ..., dan x_k

adalah Y₂ maka y adalah Z₂,

.....

..

Rule ke-n : Jika x₁ adalah A_n, x₂ adalah B_n, ..., dan

x_k adalah Y₂ maka y adalah Z_k

Derajat keragaman dari keanggotaan dari himpunan fuzzy akan dihitung berdasarkan nilai dari x₁, x₂, hingga x_k dan y, sedangkan A, B hingga Y adalah himpunan fuzzy yang ditetapkan berdasarkan fungsi keanggotaan.

4. Defuzzification

Defuzzification merupakan proses perubahan nilai fuzzy menjadi *Multi Response Performance Index* (MRPI) dengan cara melakukan pemetaan himpunan fuzzy ke himpunan tegas (*crisp*). Metode yang paling sering digunakan pada proses *defuzzification* adalah metode centroid. Pada metode ini, *defuzzification* dilakukan dengan cara mentransformasikan output multirespon (μ_{C0}) menjadi *non-fuzzy value* (yo), atau yang disebut MRPI.

5. Analisis Variansi (ANOVA) dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon dan besarnya kontribusi variabel terhadap respon. Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada MRPI yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon.

Secara statistik, nilai *F-test* menunjukkan keputusan faktor mana yang mempunyai pengaruh besar terhadap respon. Semakin besar nilai *F-value* mengindikasikan bahwa variasi faktor tersebut akan sangat berpengaruh terhadap nilai respon. Faktor dikatakan berpengaruh secara signifikan terhadap respon ketika mempunyai nilai *F-value* yang lebih

besar dibanding F_{α, v_1, v_2} (nilai dapat dilihat pada tabel statistik).

Persen kontribusi menunjukkan porsi (kekuatan relatif) masing-masing faktor terhadap total variansi yang diamati. Jika persen kontribusi error kurang dari lima belas persen, maka tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan tetapi jika persen kontribusi error lebih dari lima belas persen mengindikasikan ada faktor yang berpengaruh terabaikan sehingga error yang terjadi terlalu besar. Jumlah derajat kebebasan error sangat disarankan tidak melebihi dari setengah derajat

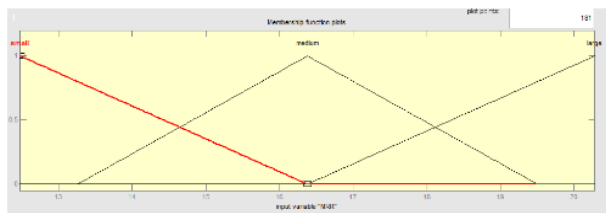
kebebasan total (Soejanto, 2009). Pada kasus ini, jumlah derajat kebebasan error masih kurang dari lima puluh persen untuk setengah derajat kebebasan dalam matriks ortogonal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

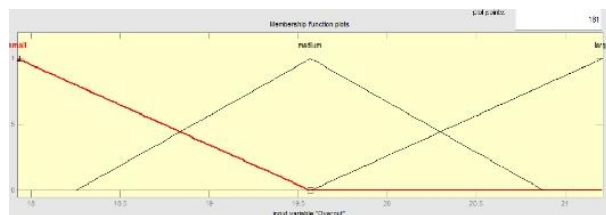
Hasil percobaan nilai dari laju pengerjaan material dan ketelitian ukur (*overcut*) berdasarkan rancangan percobaan metode Taguchi dengan orthogonal array L₂₇ ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Penelitian sesuai Rancangan Eksperimen L₂₇

Setelah mendapatkan nilai rasio S/N dari masing-masing respon, maka dilakukan *fuzzification*. Variabel input pada penelitian ini berupa laju pengerjaan material dan ketelitian ukur (*overcut*). Bentuk dari fungsi keanggotaan yang digunakan adalah kurva segitiga. Secara *uniform* fungsi keanggotaan dibagi menjadi tiga *fuzzy subsets*, yaitu *small*, *medium* dan *large*. Grafik dari fungsi keanggotaan untuk laju pengerjaan material dan ketelitian ukur (*overcut*), dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.

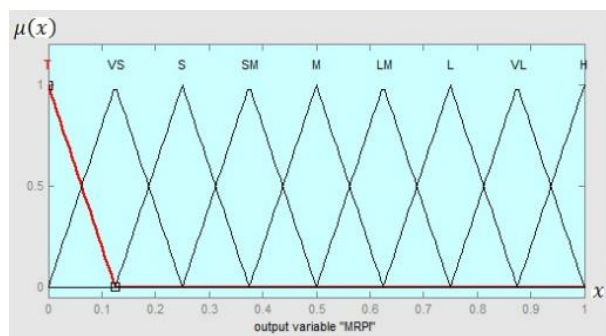


Gambar 4. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk MRR



Gambar 5. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk overcut

Variabel *output* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah MRPI yang diubah ke dalam *lingistic fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga. Fungsi keanggotaan untuk variabel *output* dibagi menjadi 9 *fuzzy subsets*, yaitu: *Tiny* (T), *Very Small* (VS), *Small* (S), *Smaller Middle* (SM), *Middle* (M), *Larger Middle* (LM), *Large* (L), *Very Large* (VL) dan *Huge* (H). Grafik fungsi keanggotaan untuk MRPI ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk MRPI

Pada penelitian ini, pembuatan *fuzzy rules* menggunakan rasio S/N dari respon-respon sebagai variabel input dan MRPI sebagai variabel *output*.

No	MRR		Overcut	
	(mm ³ /min)	S/N	(mm)	S/N
1	4,278	12,62	0,087	21,21
2	4,722	13,48	0,09	20,92
3	4,205	12,48	0,091	20,82
4	4,637	13,32	0,112	19,02
5	4,635	13,32	0,11	19,17
6	4,678	13,4	0,114	18,86
7	4,325	12,72	0,117	18,64
8	4,907	13,82	0,119	18,49
9	5,437	14,71	0,118	18,56
10	6,455	16,2	0,09	20,92
11	5,888	15,4	0,092	20,72
12	5,597	14,96	0,094	20,54
13	5,741	15,18	0,114	18,86
14	5,999	15,56	0,115	18,79
15	6,33	16,03	0,117	18,64
16	5,994	15,55	0,121	18,34
17	6,195	15,84	0,125	18,06
18	6,075	15,67	0,127	17,92
19	6,942	16,83	0,101	19,91
20	6,927	16,81	0,111	19,09
21	6,168	15,8	0,099	20,09
22	6,978	16,88	0,118	18,56
23	6,618	16,42	0,119	18,49
24	7,788	17,83	0,12	18,42
25	8,799	18,89	0,124	18,13
26	8,357	18,44	0,125	18,06
27	10,339	20,29	0,125	18,06

Variabel input masing-masing memiliki tiga *fuzzy subsets*, sehingga diperlukan sembilan *fuzzy rules* untuk mengkombinasikan seluruh input. Variabel output yang mewakili respon-respon pada penelitian ini memiliki lima *fuzzy subsets*. Tabel 4 menunjukkan keseluruhan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4 Fuzzy Rules

MRR	Overcut		
	Small (S)	Medium (M)	Large (L)
	Small (S)	T VS S	VS M ML
Medium (M)	SM	M	VL
Large (L)	L	VL	H

Proses pengubahan nilai *fuzzy* menjadi MRPI dilakukan dengan cara memetakan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Proses yang digunakan untuk pengubahan nilai tersebut adalah proses *defuzzification* dan metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode centroid. Hasil proses *defuzzification* yang berupa nilai MRPI untuk tiap-tiap kombinasi variabel respon ditunjukkan

pada Tabel 5. MRPI akan digunakan sebagai variabel respon yang mewakili variabel laju pengerjaan material dan ketelitian ukur (*overcut*) secara serentak.

Tabel 5. Multi Responses Performance Index (MRPI)

Seting Kombinasi Faktor Ke-	Rasio S/N		MRPI
	MRR	Overcut	
1	12,62	21,21	0,25
2	13,48	20,92	0,2982
3	12,48	20,82	0,2584
4	13,32	19,02	0,2949
5	13,32	19,17	0,3163
6	13,4	18,86	0,2785
7	12,72	18,64	0,2222
8	13,82	18,49	0,2482
9	14,71	18,56	0,3174
10	16,2	20,92	0,5925
11	15,4	20,72	0,4962
12	14,96	20,54	0,4588
13	15,18	18,86	0,3648
14	15,56	18,79	0,3771
15	16,03	18,64	0,3927
16	15,55	18,34	0,3328
17	15,84	18,06	0,3362
18	15,67	17,92	0,3256
19	16,83	19,91	0,5902
20	16,81	19,09	0,5346
21	15,8	20,09	0,4873
22	16,88	18,56	0,5133
23	16,42	18,49	0,415
24	17,83	18,42	0,5695
25	18,89	18,13	0,6423
26	18,44	18,06	0,5927
27	20,29	18,06	0,75

Perhitungan rata-rata nilai MRPI pada masing-masing level dari variabel proses ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rata-rata nilai MRPI untuk setiap level variabel proses

Simbol	Variabel Proses	MRPI		
		Level 1	Level 2	Level 3
A	PC	0,2760	0,4085	0,5661
B	ON	0,4407	0,3913	0,4186
C	OFF	0,3666	0,4914	0,3927
D	Z down	0,4362	0,3885	0,4259
Rata-Rata		0,41687		

Grafik untuk nilai rata-rata MRPI pada masing-masing level dari variabel proses, yaitu pulse current, on time, off time dan Z down ditunjukkan pada Gambar 7.

Gambar 7. Grafik Nilai Rata –rata MRPI pada Masing-masing Level dari Variabel Proses *pulse current* (A), *on time* (B), *off time* (C) dan *Z down* (D).

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon dan besarnya kontribusi variabel proses terhadap respon. Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada MRPI yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon. Tabel 7 menunjukkan nilai ANOVA untuk MRPI.

Tabel 7. Hasil ANOVA dan kontribusi variabel proses pada MRPI

Variabel Proses	DF	SS	MS	% Kontribusi
PC	2	0,1265	0,1265	79,11
ON	2	0,0036	0,0036	2,25
OFF	2	0,0259	0,0259	16,20
Z down	2	0,0037	0,0037	2,31
Error	-	-	-	0,00
Total	8	0,1599	-	100,00

Tabel 8. menjelaskan bahwa karakteristik kualitas semakin besar semakin baik untuk laju pengerjaan material (MRR) dan kecil semakin baik pada respon *overcut* telah terpenuhi. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya nilai respon pada kondisi optimum, yaitu nilai dari laju pengerjaan material dari 6,0333 mm³/min menjadi 8,1376 mm³/min μ m dan nilai dari *overcut* juga mengalami penurunan dari 0,13 mm menjadi 0,12 mm.

Tabel 8. Karakteristik Kualitas MRR

Seting Variabel Proses	Kombinasi Awal	Optimal Process Condition	
		Prediksi	Kombinasi Optimum
	PC ₂ ON ₂	PC ₃ ON ₁	PC ₃ ON ₁
	OFF ₂ Zd ₂	OFF ₂ Zd ₁	OFF ₂ Zd ₁
MRR (mm ³ /min)	6,0333	8,1376	8,053
Overcut (mm)	0,13	0,09	0,12
MRPI	0,4290	0,8579	0,812

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan berdasarkan metode Taguchi dan logika fuzzy mampu meningkatkan performansi proses pemesinan EDM dengan *multiple performance characteristic*. Berdasarkan hasil percobaan dan konfirmasi eksperimen yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontribusi dari variabel proses yang paling signifikan dalam meningkatkan laju pengerjaan material dan menurunkan nilai *overcut* adalah *pulse current*, *off time*, *on time*, dan *Z down*.
2. Setting kombinasi optimum yang dapat menghasilkan respon paling optimum adalah variabel proses *pulse current*, pada level 3 yaitu 60 A, *on time* pada level 1 yaitu 30 μ s, *off time* pada level 2 yaitu 20 μ s, dan *Z down* pada level 1 yaitu 3 s.

SARAN

Pada penelitian ini beberapa variabel proses dianggap konstan. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengamatan terhadap respon yang sama dengan cara memvariasikan variabel proses tersebut pada proses EDM *sinking* untuk mendapatkan respon MRR yang maksimum dan *overcut* yang minimum. Sebagai perbandingan dan penelitian lanjutan maka dapat digunakan beberapa metode optimasi multirespon yang lain seperti *grey relational analysis* (GRA), *weighted principal component analysis* (WPCA), *artificial neural network* (ANN) dsb.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Politeknik Negeri Banyuwangi yang telah mendanai penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jameson, E. C. 2001. *Electrical Discharge Machining*. Society Manufacturing Engineers.
- [2] Kumar, N., L. Kumar, H. Tewatia dan R. Yadav. 2012. *Comparative study for MRR on die-sinking EDM using electrode of copper & graphite*. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*, Vol. 2, issue 2, Hal. 170-174.
- [3] Tzeng, Y. F. dan Chen, F. C. 2007. *Multi-objective Optimization of High-speed Electrical Discharge Machining Process using a Taguchi Fuzzy-based Approach*. *Journal of Materials and Design*. Vol. 28, pp. 1159-1168.
- [4] B. H. Yan, C. C. Wang, W. D. Liu, F. Y. Huang, 2000. *Machining Characteristics of Al₂O₃/6061Al Composite using Rotary EDM with a Disklike Electrode*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 16*, Issue 5, Hal 322–333
- [5] Lin, C.L., Lin, J.L., and Ko, T.C. 2002. *Optimisation of the EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, pp. 271-277.
- [6] Khan A.A. Ali M.Y. Md. Haque M. Ad, *A Study of Electrode Shape Configuration on The Performance of Die Sinking EDM* *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, Vol. 4 (2009), No. 1, 19 -23.