

Optimasi Respon Tebal Lapisan *Recast* dan Lebar Pemotongan (*Kerf*) pada Proses Pemesinan *Wire-EDM* dengan Menggunakan Metode Taguchi dan Logika *Fuzzy*

Pathya Rupajati^a, Bobby O. P. Soepangkat^b, Bambang Pramujati^b, A. Mulyana^b, Bachtiar^c

^aMahasiswa Program Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

^bLaboratorium Proses Manufaktur Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh
Nopember Surabaya

^cLaboratorium Proses Manufaktur Politeknik Negeri Surabaya

Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya 60111 Jawa Timur Indonesia

Email: ^apathyarupajati@yahoo.com, ^bbobs_1994@me.its.ac.id, ^bpramujati@me.its.ac.id

Abstract

This paper presents the optimization of the wire electrical discharge machining (*Wire-EDM*) process of *SKD11* (*AISI D2*) tool steel with multiple performance characteristics based on the orthogonal array with *Taguchi-fuzzy* method. The experimental studies were conducted under varying *Wire-EDM* process variables i.e. on time, open voltage, off time, servo voltage, wire feed, and water flow. The optimized multiple performance were thickness of recast layer and cutting width (*kerf*). The quality characteristic of thickness of recast layer and cutting width (*kerf*) were smaller-is-better. Since each factors had three levels, the experiment design used L_{27} orthogonal array with three replications. *Fuzzy* logic is used to optimize the characteristics of both responses. Experimental results have shown machining performance in the *Wire-EDM* process can be improved effectively through this method. The *WEDM* process variables which significantly affected thickness of recast layer and cutting width (*kerf*) are on time, open voltage, servo voltage, wire feed, water flow, dan off time.

Keywords: *Fuzzy* logic, *kerf*, recast layer, *Taguchi* method, *Wire-EDM*

1. Pendahuluan

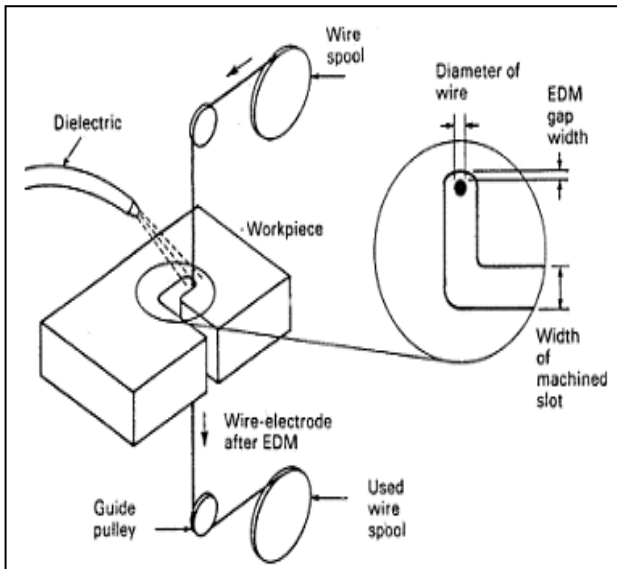
Proses pemesinan *Wire-EDM* merupakan salah satu aplikasi dari proses pemesinan EDM. Proses ini merupakan proses termo-elektrik yang menyebabkan benda kerja terkikis karena pelepasan muatan listrik yang mengakibatkan timbulnya serangkaian bunga api listrik diantara benda kerja dan elektroda. *Wire-EDM* digunakan pada material yang konduktif dengan kekerasan dan kepresisian tinggi untuk membuat benda kerja seperti pahat potong, *punch* dan *dies*. Gambar 1 menunjukkan prinsip kerja *Wire-EDM*.

Tosun, dkk. (2004) meneliti tentang pengaruh *pulse duration*, *open circuit voltage*, *wire speed*, dan *dielectric flushing pressure* terhadap *kerf* dan *MRR* pada *Wire-EDM*. Metode penelitian yang digunakan adalah metode *Taguchi* dengan rancangan percobaan menggunakan *orthogonal array* L_{18} dan logika *fuzzy*. Material yang digunakan adalah baja *AISI 4140* dan kawat elektroda yang digunakan adalah kuningan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor *open circuit voltage* dan *pulse duration* memberikan pengaruh paling besar terhadap kedua respon.

Puri (2004) meneliti tentang pengaruh *gap*

voltage, *wire feed*, *gap current* dan *duty factor* terhadap kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan pada *Wire-EDM*. Masing-masing faktor tersebut memiliki dua level. Benda kerja dan elektroda yang dipakai adalah *High-Carbon-High-Chromium (HCHC)* dan kuningan. Rancangan percobaan menggunakan *orthogonal array* dan logika *fuzzy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor *gap voltage* dan *gap current* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati.

Qibtiyah (2008) meneliti tentang pengaruh *on time*, *off time*, *main power supply current* dan *main power supply voltage* pada *Wire-EDM* terhadap tebal lapisan *recast* dan waktu pengerjaan material, masing-masing faktor memiliki tiga level. Benda kerja dan elektroda yang digunakan adalah baja *HSS* dan kuningan. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *Box Behnken* dan *Respon Surface Methodology (RSM)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *on time*, *off time*, *main power supply current*, *main power supply voltage* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati.



Gambar 1. Prinsip dasar wire-EDM

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa pengaturan faktor sangat perlu dilakukan untuk mengoptimalkan respon yang diamati secara serentak. Maka, dilakukan suatu penelitian tentang penentuan seting faktor pada wire-EDM untuk mengoptimalkan respon lebar pemotongan (*kerf*) dan tebal lapisan *recast* yang dapat diamati secara serentak. Metode Taguchi dan logika *fuzzy* digunakan pada penelitian ini untuk menghasilkan desain proses yang *robust* terhadap faktor gangguan.

2. Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

2.1 Bahan dan Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan material baja SKD 11 dengan dimensi 200 mm x 30 mm x 15 mm. Bahan elektroda kawat yang digunakan adalah kuningan berdiameter 0,25 mm. Metode *flushing* yang digunakan pada eksperimen ini adalah *open contact machining* dengan jarak antara *upper nozzle* dan *lower nozzle* sebesar 10 mm.

2.2 Peralatan Penelitian

1. Mesin wire-EDM

Mesin *wire-EDM* yang digunakan pada penelitian ini adalah CHMER CW32F, dengan spesifikasi: arah pergerakan lima sumbu (x, y, z, u, v), diameter kawat 0,15-0,3 mm, kecepatan kawat maksimal 250 mm/detik dan dimensi benda kerja 600 mm x 400 mm.

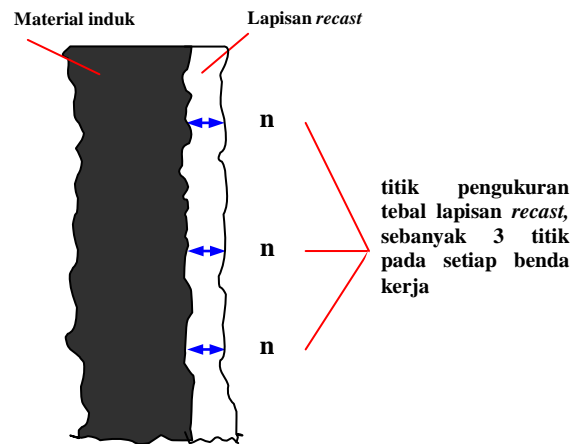
2. Measurescope

Lebar pemotongan (*kerf*) diukur dengan menggunakan Nikon *measurescope* yang

memiliki ketelitian 1 μ m. Lebar maksimum yang dapat diukur dengan alat ini adalah 5 mm.

3. Mikroskop Optik

Pengukuran tebal lapisan *recast* dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik merk Olympus BX41-32PO2. Hal ini dilakukan dengan cara menarik garis ukur antara kedua tepi lapisan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2 Skema pengukuran tebal lapisan *recast*

2.3 Metode Eksperimen dengan Metode Taguchi

2.3.1 Pemilihan Parameter Proses Pemesinan

Pada penelitian ini, dipilih enam faktor terkendali atau variabel proses yang masing-masing memiliki tiga level. Pengaturan level pada masing-masing faktor ditunjukkan pada Tabel 1. Pemilihan level parameter dalam interval tersebut telah direkomendasikan oleh *wire-EDM manufacturer*.

Tabel 1. Pengaturan level pada masing-masing faktor

Faktor/parameter proses	level 1	level 2	level 3
A On time μ s	0,4	0,6	0,8
B Open voltage Volt	75	80	85
C Off time μ s	10	11	12
D Servo voltage Volt	30	35	40
E Wire feed mm/s	170	200	220
F Water flow kg/cm^2	5	10	15

2.3.2 Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan rancangan percobaan *orthogonal array* L_{27} karena memvariasikan enam variabel proses (*on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow*) yang masing-masing mempunyai tiga level. Rancangan percobaan *orthogonal array* L_{27} ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan percobaan L_{27}

Run	Faktor					
	A	B	C	D	E	F
	ON	OV	OFF	SV	WS	WF
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3
4	1	2	1	2	2	3
5	1	2	2	3	3	1
6	1	2	3	1	1	2
7	1	3	1	3	3	2
8	1	3	2	1	1	3
9	1	3	3	2	2	1
10	2	1	1	2	3	2
11	2	1	2	3	1	3
12	2	1	3	1	2	1
13	2	2	1	3	1	1
14	2	2	2	1	2	2
15	2	2	3	2	3	3
16	2	3	1	1	2	3
17	2	3	2	2	3	1
18	2	3	3	3	1	2
19	3	1	1	3	2	3
20	3	1	2	1	3	1
21	3	1	3	2	1	2
22	3	2	1	1	3	2
23	3	2	2	2	1	3
24	3	2	3	3	2	1
25	3	3	1	2	1	1
26	3	3	2	3	2	2
27	3	3	3	1	3	3

3. Skema Numerik

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 kecil semakin baik untuk tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan (*kerf*). Oleh karena itu, persamaan untuk menghitung rasio S/N adalah (Lin,dkk. 2002);

Semakin kecil semakin baik

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^2) \dots\dots\dots 2.1$$

Dengan: n = jumlah replikas

y_i = nilai dari karakteristik kualitas

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 pengelompokkan dengan bentuk batasan aturan *if-then* (jika-maka), contohnya sebagai berikut:

Rule ke-1: Jika x_1 adalah A_1 , x_2 adalah B_1 , ..., dan x_k adalah Y_1 maka y adalah Z_1 ,

Rule ke-2: Jika x_1 adalah A_2 , x_2 adalah B_2 , ..., dan x_k adalah Y_2 maka y adalah Z_2 ,

.....
Rule ke-n : Jika x_1 adalah A_n , x_2 adalah B_n , ..., dan x_k adalah Y_2 maka y adalah Z_k .

Derajat keragaman dari keanggotaan dari himpunan fuzzy akan dihitung berdasarkan nilai dari x_1, x_2, \dots, 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_{co}) menjadi *non-fuzzy value* (y_o), atau yang disebut MRPI. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dkk, 2000);

$$y_o = \frac{\sum y \mu_{co}(y)}{\sum \mu_{co}(y)} \dots\dots\dots 2.3$$

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 proses 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 $F_{\alpha, v1, v2}$ (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.

3 Hasil dan Pembahasan

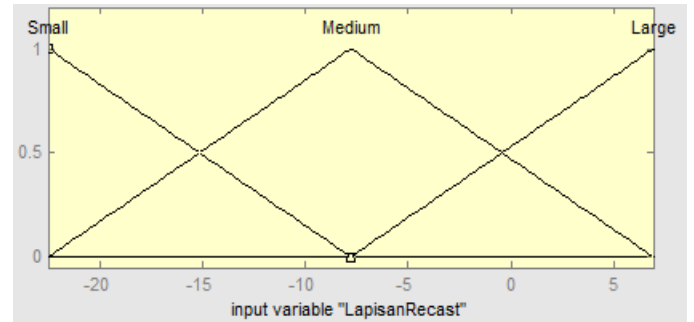
Hasil percobaan nilai dari tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan (*kerf*) berdasarkan rancangan percobaan metode Taguchi dengan *orthogonal array* L_{27} ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil percobaan untuk *lapisan recast* dan *kerf*

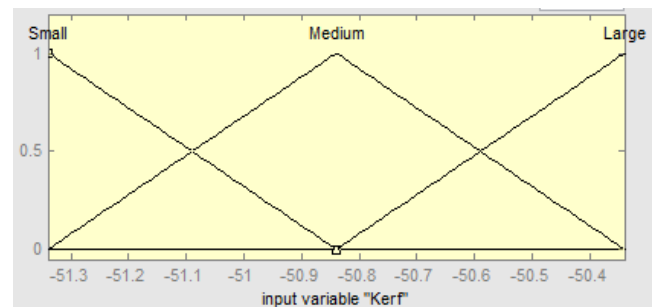
Run	Faktor						Respon			
	A	B	C	D	E	F	Lapisan Recast		Kerf	
	ON	OV	OFF	SV	WS	WF	Mean	S/N	Mean	S/N
1	1	1	1	1	1	1	1,58	-4,06	346,67	-50,80
2	1	1	2	2	2	2	1,21	-1,85	331,11	-50,40
3	1	1	3	3	3	3	2,88	-9,20	328,89	-50,34
4	1	2	1	2	2	3	2,81	-9,03	336,67	-50,54
5	1	2	2	3	3	1	3,49	-10,90	343,33	-50,71
6	1	2	3	1	1	2	4,30	-12,69	338,89	-50,60
7	1	3	1	3	3	2	3,70	-11,43	341,11	-50,66
8	1	3	2	1	1	3	2,75	-8,86	345,56	-50,77
9	1	3	3	2	2	1	4,07	-12,21	344,44	-50,74
10	2	1	1	2	3	2	5,20	-14,35	354,44	-50,99
11	2	1	2	3	1	3	2,93	-9,50	356,67	-51,05
12	2	1	3	1	2	1	3,21	-10,12	350,00	-50,88
13	2	2	1	3	1	1	13,30	-22,49	347,78	-50,83
14	2	2	2	1	2	2	13,35	-22,52	352,22	-50,94
15	2	2	3	2	3	3	9,10	-19,19	360,00	-51,13
16	2	3	1	1	2	3	4,75	-13,61	347,78	-50,83
17	2	3	2	2	3	1	7,59	-17,72	357,78	-51,07
18	2	3	3	3	1	2	9,83	-19,86	354,44	-50,99
19	3	1	1	3	2	3	2,69	-8,61	367,78	-51,31
20	3	1	2	1	3	1	0,37	6,92	368,89	-51,34
21	3	1	3	2	1	2	1,50	-4,13	367,78	-51,31
22	3	2	1	1	3	2	7,09	-17,06	360,00	-51,13
23	3	2	2	2	1	3	7,34	-17,32	352,22	-50,94
24	3	2	3	3	2	1	10,59	-20,51	360,00	-51,13
25	3	3	1	2	1	1	7,67	-17,70	360,00	-51,13
26	3	3	2	3	2	2	8,72	-18,83	357,78	-51,07
27	3	3	3	1	3	3	6,81	-16,66	357,78	-51,07

Setelah mendapatkan nilai rasio S/N dengan menggunakan persamaan 2.1 dari masing-masing

respon, maka dilakukan *fuzzification*. *Variabel* input pada penelitian ini berupa tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan (*kerf*). 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 tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan (*kerf*) dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.

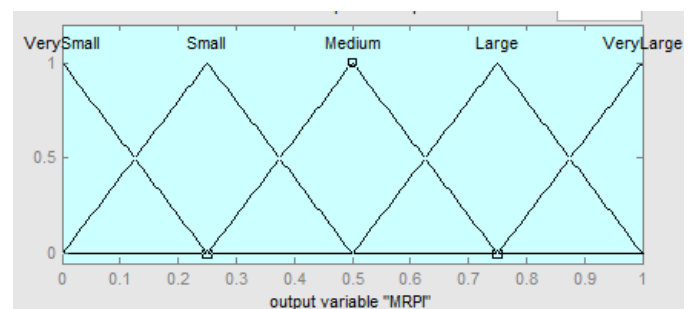


Gambar 3. Membership function untuk lapisan recast



Gambar 4. Membership function untuk kerf

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 lima *fuzzy subsets* yaitu *very small* (VS), *small* (S), *medium* (M), *large* (L) dan *very large* (VL). Grafik fungsi keanggotaan untuk MRPI ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Membership function untuk multirespon output

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

MRPI	S/N Kerf	S/N Recast Layer		
		S	M	L
S	VS	S	M	L
M	S	M	L	VL
L	M	L	VL	

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 tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan (*kerf*) secara serentak.

Tabel 5. Hasil dari MRPI

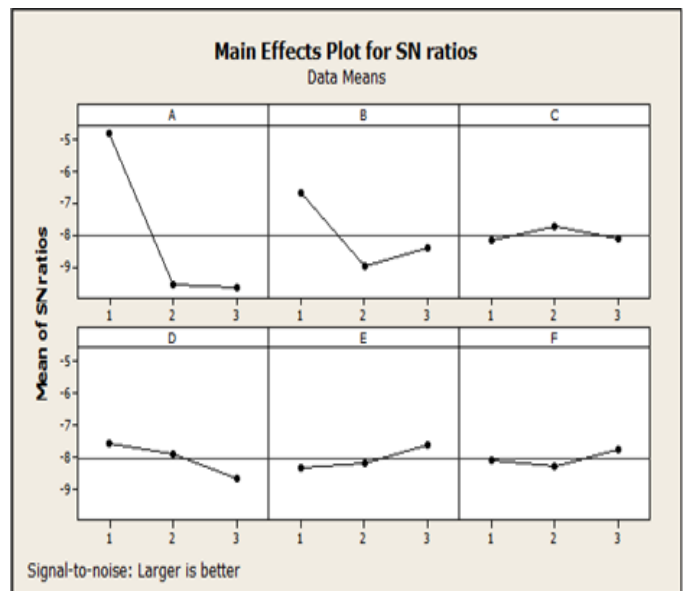
No	Hasil MRPI
1	0,5786
2	0,7286
3	0,7178
4	0,6129
5	0,5112
6	0,5255
7	0,5246
8	0,5227
9	0,4783
10	0,3743
11	0,3931
12	0,4525
13	0,2618
14	0,2445
15	0,2914
16	0,4091
17	0,3205
18	0,297
19	0,2696
20	0,5067
21	0,3479
22	0,323
23	0,3414
24	0,2645
25	0,3148
26	0,3047
27	0,3326

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	Parameter Pemesinan	MRPI		
		Level 1	Level 2	Level 3
A	On Time	0,5778	0,3382	0,3339
B	Open Voltage	0,4855	0,3751	0,3894
C	Off Time	0,4076	0,4304	0,4119
D	Servo Voltage	0,4328	0,4233	0,3938
E	Wire Feed	0,3981	0,4183	0,4336
F	Water Flow	0,4099	0,4078	0,4323
Rata-rata		0,41665		

Grafik untuk nilai rata-rata *MRPI* pada masing-masing level dari variabel proses, yaitu *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Nilai Rata –rata MRPI pada Masing-masing Level dari Variabel Proses *on time* (A), *open voltage* (B), *off time* (C), *servo voltage* (D), *wire feed* (E), dan *water flow*(F)

Analisis variansi (ANAVA) 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 ANAVA untuk MRPI.

Tabel 8. menjelaskan bahwa karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik pada respon *recast layer* dan lebar pemotongan (*kerf*) telah terpenuhi.

Tabel 7. Hasil ANAVA dan kontribusi variabel proses pada MRPI

Source	DF	SS	MS	SS'	%kontribusi
A	2	137,014	68,5069	136,9076	68,53
B	2	25,449	12,7244	25,3426	12,68
C	2	0,942	0,4711	0,8356	0,42
D	2	5,526	2,7628	5,4196	2,71
E	2	2,298	1,1491	2,1916	1,10
F	2	1,399	0,6996	1,2926	0,65
A*B	4	7,7872	1,9679	7,5744	3,79
A*C	4	6,363	1,5907	6,1502	3,08
B*C	4	12,817	3,2042	12,6042	6,31
Residual Error	2	0,106	0,0532	1,4666	0,73
Total	26	199,785			100

Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya nilai respon pada kondisi optimum, yaitu nilai dari *recast layer* dari 8,83 μm menjadi 2,45 μm dan nilai dari *kerf* juga mengalami penurunan dari 356,67 μm menjadi 330,33 μm .

Tabel 8. Hasil kombinasi awal dan kombinasi optimum proses pemesinan

	Kombinasi awal	Prediksi	Kombinasi Optimum
Setting Faktor	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂ E ₂ F ₂	A ₁ B ₁ C ₂ D ₁ E ₃ F ₃	A ₁ B ₁ C ₂ D ₁ E ₃ F ₃
Recast layer (μm)	8,83		2,45
Kerf (μm)	356,67		330,33
Rasio S/N Recast layer	-18,92		-7,83
Rasio S/N Kerf	-51,05		-50,38
Rasio S/N MRPI	0,3042	0,777	0,7214
Kenaikan MRPI	0,4172		
Penurunan rasio S/N recast layer (%)	58,61		
Penurunan rasio S/N kerf (%)	1,30		

4 Kesimpulan

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

1. Kontribusi dari faktor-faktor yang paling signifikan dalam meminimumkan tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan (*kerf*) adalah *on time*, *open voltage* dan *servo voltage*.
2. Setting kombinasi optimum yang dapat menghasilkan respon paling minimum adalah faktor *on time* pada 0,4 μs , *open voltage* pada 75 Volt, *off time* pada 11 μs , *servo voltage* pada 30 Volt, *wire feed* pada 220 mmm/s dan *water flow* pada 15 kg/cm^2 .

5 Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Proses Manufaktur Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah menyediakan material dan fasilitas untuk menunjang penelitian ini.

Referensi

Cogun, C. Tosun, Gul. and Tosun, N. A study on Kerf and Material Removal Rate in Wire-Electrical Discharge Machining Based on Taguchi Method. International Journal of Materials Processing Technology Vol.152, pp 316-322 (2004).

Kalpakjian, S dan Steven, R.S. Manufacturing Processes for Engineering Materials. Prentice Hall, New Jersey (2008).

Kusumadewi, S. dan Purnomo H. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan, Edisi kedua*, Graha Ilmu, Yogyakarta (2010)

Lin, C.L., Lin, J.L., and Ko, T.C., Optimisation of the EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method, The International Jurnal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 19, pp. 271-277 (2002).

Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiment. John Wiley & Sons, Inc., New York (2008).

Park, S.H. Robust Design and Analysis for Quality Engineering. Thomson Press, New Delhi (1996).

Puri. Simultaneous Optimization of Multiple Quality Characteristic of WEDM Based on Fuzzy Logic and Taguchi Technique. Proceedings of The Fifth Asia Pasific Industrial Engineering and Management system Conference (2004).

Qibtiyah, E. Optimasi Waktu Pengerjaan dan Tebal Lapisan Recast Permukaan Benda Kerja pada Wire-Electrical Discharge Machining. Tugas Akhir yang Tidak Dipublikasikan, Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (2008).

Rochim, T. Proses Pemesinan, Institut Teknologi Bandung, (2001),.

Soejanto, I. Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi. Graha Ilmu, Yogyakarta (2009).