

Optimasi Multirespon Proses *Wire-EDM* Menggunakan Metode Taguchi Logika Fuzzy

Pathya^{1,a)}, Bobby Oedy Pramodyo Soepangkat^{2,b)}

¹⁾Laboratorium Proses Produksi
Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Indonesia,
Jl. Raya Puspiptek, Serpong-Tangerang, Banten 15320

²⁾Laboratorium Proses Manufaktur
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Keputih, Surabaya, Jawa Timur 60117

^{a)} pr_pathya@iti.ac.id, ^{b)} bobs_1994@me.its.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas optimasi proses pemesinan *wire-EDM* multirespon karakteristik menggunakan metode Taguchi dan logika *fuzzy*. Multirespon yang digunakan pada penelitian ini adalah *recast layer* dan *surface roughness* dimana masing-masing mempunyai karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik. Pada percobaan ini dilakukan dengan memvariasikan enam parameter proses, yaitu *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow*. Karena setiap parameter proses tersebut memiliki tiga level, maka rancangan percobaan yang digunakan adalah matriks *orthogonal array* L_{27} . Untuk mengoptimasi kedua karakteristik dari kedua respon digunakan logika *fuzzy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik dari kedua respon tersebut mengalami peningkatan secara efektif dengan metode ini. Parameter proses pemesinan yang secara signifikan mempengaruhi *recast layer* dan *surface roughness* adalah *on time*, *open voltage* dan *wire feed*.

Kata kunci: *wire-EDM*, Taguchi, logika fuzzy, *recast layer*, *surface roughness*

Abstract

This paper presents the optimization of the wire electrical discharge machining (Wire-EDM) process with multiresponse 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 surface roughness. The quality characteristic of thickness of recast layer and surface roughness 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 recast layer and surface roughness are on time, open voltage, and wire feed.

Keywords: Wire-EDM, Taguchi, Fuzzy Logic, Recast Layer, Surface Roughness

I. PENDAHULUAN

Proses pemesinan *wire-EDM* (*Electro Discharge Machinig*) merupakan proses termoelektrik yang menyebabkan benda kerja terkikis karena pelepasan muatan listrik yang mengakibatkan timbulnya rangkaian bunga api listrik diantara benda kerja dan elektroda. Proses *Wire-EDM* ini digunakan pada material yang konduktif dengan bentuk kompleks yang tidak dapat dikerjakan dengan mesin konvensional biasa dimana membutuhkan kekasaran permukaan yang rendah serta ketelitian dan kepresisian geometri yang tinggi. Selain itu Biasanya, proses *wire-EDM* menggunakan kawat elektroda yang memiliki diameter 0,05 sampai dengan 0,4 mm. Beberapa aplikasi dari proses ini digunakan pada proses pembuatan cetakan dan pahat potong [1] [2].

Parameter proses *wire-EDM* seperti *on time*, *off time*, *servo voltage*, dan *peak current* mempunyai pengaruh terhadap *recast layer* [3]. Selain *recast layer*, karakteristik kualitas respon untuk produk akhir hasil dari proses pemesinan *wire-EDM* adalah kekasaran permukaan benda kerja. Proses pemesinan seperti *pulse on time*, *pulse off time*, *peak current*, *flushing pressure*, *wire feed*, *wire tension*, *spark gap*, dan *servo feed* mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan benda kerja pada proses *wire-EDM* [4] [6].

Dalam memperbaiki dan mengendalikan kualitas produk dan proses, dibutuhkan metode pengaturan dalam menentukan kombinasi parameter proses yang tepat. Salah satunya adalah menggunakan metode Taguchi. Akan tetapi metode Taguchi hanya bisa digunakan untuk mengoptimasi proses pada satu respon [7]. Penyelesaian dalam mengoptimasi secara serentak lebih dari satu respon (multirespon) adalah dengan menggunakan kombinasi metode Taguchi dan logika *fuzzy* [8] [9]. Dalam penelitian ini, karakteristik multirespon yang akan digunakan pada proses pemesinan *wire-EDM* dengan metode Taguchi logika *fuzzy*, yaitu *recast layer* dan *surface roughness*.

II. METODE EKSPERIMEN

3.1 Bahan Penelitian

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja AISI D2 dengan dimensi 200 mm x 30 mm x 15 mm. Kekerasan baja ini adalah 60HRC. Bahan elektroda kawat yang digunakan adalah kuningan dengan diameter 0,25 mm.

3.2 Peralatan Penelitian

1. Mesin *Wire-EDM*

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

2. Mikroskop optik

Pada penelitian ini, untuk mengukur ketebalan dari *recast layer* digunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500x.

3. Alat ukur kekasaran permukaan

Untuk mengetahui besarnya kekasaran permukaan produk menggunakan Mitutoyo Surftest 401 dengan ketelitian 0,1 μm .

3.3 Rancangan Percobaan

Ada enam parameter proses yang digunakan dalam percobaan ini dimana setiap parameter proses pemesinan *wire-EDM* memiliki tiga level pengaturan. Pengaturan level ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengaturan level pada setiap parameter proses

Parameter proses	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
<i>On Time (ON)</i>	μs	0,4	0,6	0,8
<i>Open Voltage (OV)</i>	Volt	75	80	85
<i>Off Tme (OFF)</i>	μs	10	11	12
<i>Servo Voltage (SV)</i>	Volt	30	35	40
<i>Wire Feed (WS)</i>	mm/s	170	200	220
<i>Water Flow (WF)</i>	kg/cm ²	5	10	15

Metode eksperimen yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Taguchi dengan rancangan percobaan *orthogonal array* L_{27} yang ditunjukkan pada Tabel 2. Percobaan ini menggunakan tiga kali replikasi.

Tabel 2. Rancangan percobaan *orthogonal array* L_{27}

Percobaan ke-	Parameter Proses					
	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

Berikut ini merupakan langkah-langkah optimasi metode Taguchi dengan logika *fuzzy* :

1. Melakukan perhitungan S/N Rasio pada setiap respon

S/N rasio digunakan untuk memilih parameter proses yang memiliki kontribusi pada pengurangan

variasi suatu karakteristik kualitas respon. S/N rasio merupakan rancangan untuk melakukan transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Karakteristik kualitas respon optimal yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik untuk *recast layer* dan *surface roughness*. Oleh karena itu, persamaan untuk menghitung S/N rasio adalah [11-12]:

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

Dengan: n = jumlah replikasi

y_i = nilai dari karakteristik kualitas respon

2. Melakukan tahap Fuzzification

Fuzzification merupakan proses perubahan nilai awal, yaitu S/N rasio menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Fungsi keanggotaan 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. Membuat fuzzy rules

Setelah tahap *fuzzification*, kemudian membuat *fuzzy rules* untuk mendapatkan nilai *fuzzy*. *Fuzzy rules* 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). *Fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jika (*recast layer* adalah rendah) dan (*surface roughness* adalah rendah), maka (FRG adalah sangat rendah)
2. Jika (*recast layer* adalah rendah) dan (*surface roughness* adalah medium), maka (FRG adalah rendah)
3. Jika (*recast layer* adalah rendah) dan (*surface roughness* adalah tinggi), maka (FRG adalah medium)
4. Jika (*recast layer* adalah medium) dan (*surface roughness* adalah rendah), maka (FRG adalah rendah)
5. Jika (*recast layer* adalah medium) dan (*surface roughness* adalah medium), maka (FRG adalah medium)
6. Jika (*recast layer* adalah medium) dan (*surface roughness* adalah tinggi), maka (FRG adalah tinggi)
7. Jika (*recast layer* adalah tinggi) dan (*surface roughness* adalah rendah), maka (FRG adalah medium)
8. Jika (*recast layer* adalah tinggi) dan (*surface roughness* adalah medium), maka (FRG adalah tinggi)
9. Jika (*recast layer* adalah tinggi) dan (*surface roughness* adalah tinggi), maka (FRG adalah sangat tinggi)

Dalam penelitian ini fungsi keanggotaan untuk *input* respon *recast layer* dan *surface roughness* dibagi menjadi tiga *fuzzy subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M) dan *large* (L).

10. Melakukan tahap Defuzzification

Defuzzification merupakan proses perubahan nilai *fuzzy* menjadi *Fuzzy Reasoning Grade* (FRG) 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* (y_0), atau yang disebut FRG. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$y_0 = \frac{\sum y \mu_{c_0}(y)}{\sum \mu_{c_0}(y)} \quad (2)$$

Dalam penelitian ini, variabel output dari sistem logika fuzzy adalah FRG yang diubah ke dalam lima *fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga, yaitu *very small* (VS), *small* (S), *middle* (M), *large* (L), dan *very large* (VL), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

11. Melakukan tahap Analisis Variansi (ANAVA)

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 FRG yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon.

Secara statistik, nilai *F-test* menunjukkan keputusan parameter proses mana yang mempunyai pengaruh besar terhadap respon. Semakin besar nilai *F-value* mengindikasikan bahwa variasi parameter proses tersebut akan sangat berpengaruh terhadap nilai respon. Parameter proses 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 [10-11]. Pada kasus ini, jumlah derajat kebebasan *error* masih kurang dari lima puluh persen untuk setengah derajat kebebasan dalam matriks ortogonal.

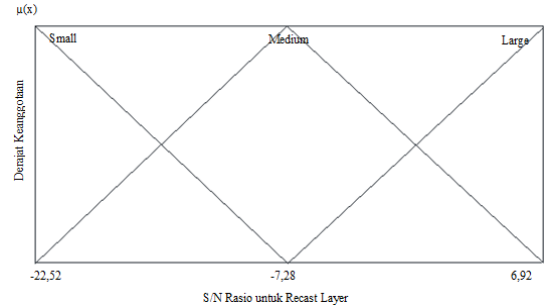
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil percobaan adalah berupa nilai dari *recast layer* dan kekasaran permukaan berdasarkan rancangan percobaan metode Taguchi *orthogonal array* L₂₇ yang ditunjukkan pada Tabel 3.

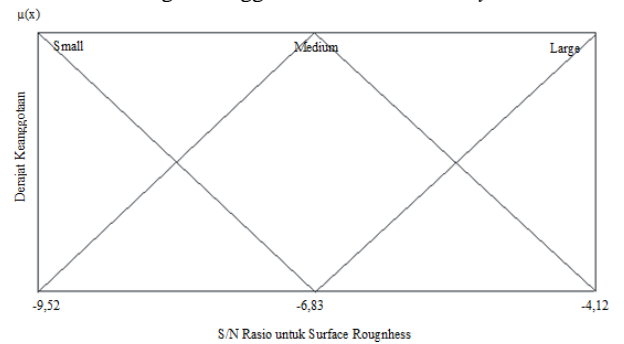
Tabel 3. Hasil percobaan untuk respon *recast layer* dan *surface roughness*

Percobaan ke-	Parameter Proses						Respon			
	ON	OV	OFF	SV	WS	WF	Recast Layer		Surface Roughness	
							Mean	S/N Ratio	Mean	S/N Ratio
1	1	1	1	1	1	1	1,58	-4,06	1,61	-4,12
2	1	1	2	2	2	2	1,21	-11,1	1,79	-5,09
3	1	1	3	3	3	3	2,88	-9,2	2,06	-6,27
4	1	2	1	2	2	3	2,81	-9,03	2,15	-6,68
5	1	2	2	3	3	1	3,49	-10,9	2,15	-6,65
6	1	2	3	1	1	2	4,3	-12,7	2,24	-7,00
7	1	3	1	3	3	2	3,7	-11,4	1,98	-5,95
8	1	3	2	1	1	3	2,75	-8,86	1,96	-5,85
9	1	3	3	2	2	1	4,07	-12,2	2,24	-7,03
10	2	1	1	2	3	2	5,2	-14,4	2,39	-7,62
11	2	1	2	3	1	3	2,93	-9,5	2,11	-6,58
12	2	1	3	1	2	1	3,21	-10,1	2,23	-6,98
13	2	2	1	3	1	1	13,3	-22,5	1,74	-4,79
14	2	2	2	1	2	2	13,35	-22,5	2,25	-7,05
15	2	2	3	2	3	3	9,1	-19,2	2,39	-7,57
16	2	3	1	1	2	3	4,75	-13,6	2,48	-7,89
17	2	3	2	2	3	1	7,59	-17,7	2,14	-6,59
18	2	3	3	3	1	2	9,83	-19,9	2,38	-7,54
19	3	1	1	3	2	3	2,69	-8,61	2,41	-7,63
20	3	1	2	1	3	1	0,37	6,92	2,8	-8,93
21	3	1	3	2	1	2	1,5	-4,13	2,66	-8,51
22	3	2	1	1	3	2	7,09	-17,1	2,63	-8,41
23	3	2	2	2	1	3	7,34	-17,3	2,44	-7,74
24	3	2	3	3	2	1	10,59	-20,5	2,81	-8,99
25	3	3	1	2	1	1	7,67	-17,7	2,77	-8,85
26	3	3	2	3	2	2	8,72	-18,8	2,55	-8,13
27	3	3	3	1	3	3	6,81	-16,7	3	-9,55

Setelah hasil S/N rasio diperoleh, selanjutnya dilakukan *fuzzification*. Variable respon (*input*) pada penelitian ini adalah *recast layer* dan *surface roughness*. Bentuk dari fungsi keanggotaan yang digunakan adalah kurva segitiga. Pada umumnya, fungsi keanggotaan dibagi menjadi tiga *subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M), dan *large* (L), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.

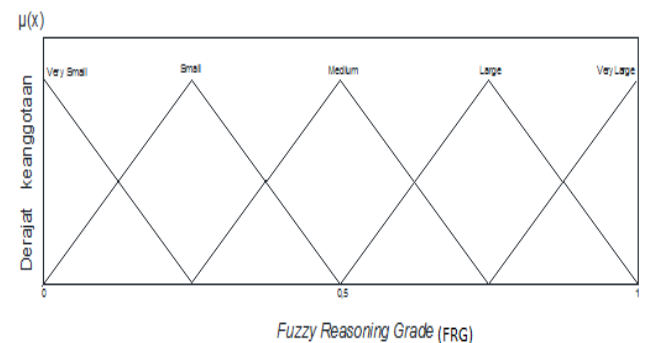


Gambar 1. Fungsi keanggotaan untuk *Recast Layer*



Gambar 2. Fungsi keanggotaan untuk *Surface Roughness*

Fuzzy Reasoning Grade (FRG) merupakan variabel *output* pada logika *fuzzy*. FRG diubah kedalam *lingistic fuzzy subsets* 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 FRG ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Fungsi keanggotaan untuk FRG

Fuzzy rules yang dibuat menggunakan S/N Rasio yang berasal dari variabel respon (*recast layer* dan *surface roughness*) sebagai variabel *input* dan FRG sebagai variabel *output*.

Defuzzification dengan metode *centroid* merupakan proses yang digunakan untuk mengubah nilai fuzzy menjadi FRG. Perubahan nilai tersebut dilakukan dengan cara memetakan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*).

Nilai FRG yang berasal dari proses defuzzification merupakan variabel respon yang mewakili *recast layer* dan *surface roughness*. Tabel 4 menunjukkan nilai dari FRG ini, sedangkan perhitungan rata-rata nilai FRG pada setiap level dari parameter proses ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Hasil nilai FRG

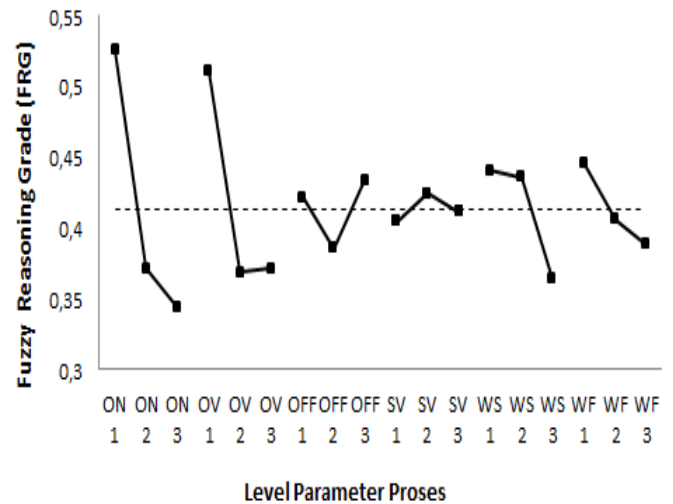
Percobaan ke-	Nilai FRG	S/N Rasio FRG
1	0,759	-2,401
2	0,578	-4,761
3	0,530	-5,511
4	0,492	-6,159
5	0,460	-6,739
6	0,408	-7,780
7	0,516	-5,740
8	0,571	-4,863
9	0,415	-7,637
10	0,373	-8,575
11	0,494	-6,131
12	0,450	-6,943
13	0,429	-7,345
14	0,249	-12,083
15	0,307	-10,246
16	0,373	-8,566
17	0,375	-8,515
18	0,297	-10,536
19	0,417	-7,595
20	0,567	-4,928
21	0,434	-7,250
22	0,320	-9,897
23	0,330	-9,640
24	0,235	-12,593
25	0,289	-10,770
26	0,302	-10,394
27	0,203	-13,859

Sumber: Perhitungan

Tabel 5. Perhitungan rata-rata nilai FRG pada setiap level parameter proses

Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3
ON	0,5256	0,3719	0,3441
OV	0,5112	0,3589	0,3714
OFF	0,4218	0,3857	0,434
SV	0,4052	0,4249	0,4114
WS	0,4409	0,4362	0,3644
WF	0,4467	0,4062	0,3886
Rata-rata		0,4138	

Plot untuk nilai rata-rata dari FRG pada setiap level dari parameter proses, yaitu *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed* dan *water flow* yang ditunjukkan pada Gambar 4



Gambar 4. Plotting nilai FRG pada setiap level parameter proses

Tabel 6 menunjukkan hasil Analisis Variansi (ANOVA) dari FRG. Hasil ANOVA dilakukan untuk mengetahui parameter proses yang mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap variabel respon.

Tabel 6. Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Source	DF	SS	MS	SS'	F	p-value	% kontribusi
ON	2	0,172	0,086	0,172	24,45	0,000	41,73
OV	2	0,129	0,064	0,129	18,28	0,000	31,20
OFF	2	0,011	0,006	0,011	1,62	0,233	2,76
SV	2	0,002	0,001	0,002	0,26	0,774	0,44
WS	2	0,033	0,017	0,033	4,71	0,027	8,04
WF	2	0,016	0,008	0,016	2,27	0,140	3,87
Residual Error	14	0,049	0,049	0,049			11,95
Total	26	0,412					100,00

Sumber: Perhitungan

Setelah pengaturan level pada parameter proses untuk kondisi optimal diperoleh, selanjutnya melakukan melakukan percobaan dan verifikasi sesuai dengan level dan pengaturan yang telah diperoleh dari kombinasi level optimal dari parameter proses tersebut, yaitu *on time* pada level 1, *open voltage* pada level 1, *off time* pada level 3, *servo voltage* pada level 2, *wire feed* pada level 1 dan *water flow* pada level 1. Berdasarkan percobaan menggunakan pengaturan pada kondisi optimal, kemudian dilakukan perhitungan S/N rasio pada kombinasi awal dan kombinasi optimal seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7

Tabel 7. Perbandingan hasil kombinasi awal dan kombinasi optimum paramereer proses

Parameter Proses	Kombinasi Awal ON ₁ OV ₂ OFF ₃ SV ₂ WS ₂ WF ₂	Kombinasi Optimal		Ket
		Predksi ON ₁ OV ₁ OFF ₃ SV ₂ WS ₁ WF ₁	Eksperimen ON ₁ OV ₁ OFF ₃ SV ₂ WS ₁ WF ₁	
Recast layer (µm)	7,24		4,97	Penurunan 31.35%
Surface Roughness (µm)	2,78		2,00	Penurunan 28.05%
FRG	0,2887	0,7141	0,4880	Peningkatan 69.03%

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan konfirmasi eksperimen, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan metode Taguchi logika *fuzzy* mampu meningkatkan performansi dari proses pemesinan Wire-EDM, yaitu recast layer dan surface roughness. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *recast layer* dan *surface roughness* mengalami penurunan pada kondisi optimum.
2. Parameter proses wire-EDM, seperti *on time*, *open voltage* dan *wire feed* adalah yang paling signifikan dalam mengoptimumkan *recast layer* dan *surface roughness*.
3. Berdasarkan konfirmasi eksperimen, besarnya nilai FRG mengalami peningkatan pada kondisi optimum yaitu sebesar 69,03%.
4. Semakin rendah nilai *recast layer* dan *surface roughness* menyebabkan semakin baik performansi kinerja pada proses pemesinan Wire-EDM.

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

- [1] Pandey, P. C. dan Shan, H. S. (1980), *Modern Machining Processes*, Tata Mc Graw Hill Publishing Company Limited, New Delhi
- [2] Sommer, C. dan Sommer, S. (2005), *Complete EDM Handbook*, Advanced Publishing Inc., Houston.
- [3] Ayu, M. (2006), "Performance Evaluation of Wire Electro-Discharge Machining on Tungsten Carbide," *Master Thesis* yang tidak dipublikasikan, Universiti Teknologi Malaysia, Johor.
- [4] Satyanarayana, B., Rao, P. S., dan Praveen, M. K., "Effect of WEDM Conditions on Surface Roughness: A Parametric Optimisation Using Taguchi Method," *International Journal of Advanced Engineering Science and Technologies*, Vol. 6, 2008, No. 1, hal. 041-048.
- [5] N. Tosun, C. Cogun and A. Inan, "The Effect of Cutting Parameters on Workpiece Surface Roughness in Wire EDM," *Machining Science and Technology*, vol. 7, 2003, pp. 209-219.

- [6] Yadav, M. K., Pandey, M. S., Chaudary, S., dan Murtaza, Q., "Effects of Machining Variables on Surface Roughness in Wire-EDM of AISI D3," *International Journals of Engineering Science*, Vol. 01, 2012, hal. 66-78.
- [7] Kumar, A. dan Singh, D. K., "Strategic Optimization and Investigation Effect of Process Parameters on Performance of Wire Electric Discharge Machine," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 4, 2012, hal. 2766-2772.
- [8] Soejanto, I. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Graha Ilmu, Yogyakarta (2009).
- [9] Zadeh, L. (1965), "Fuzzy Sets," *Jurnal Information and Control*, Vol. 8, hal. 338-353.
- [10] 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 Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 19, 2001, pp. 271-277.
- [11] D. C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiment*. 7th ed. New York, John Wiley and Sons, Inc., 2009
- [12] Park, S.H. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*