

Optimasi Multi Respon Pada Proses Edm Sinking Material SKD 11 Dengan Menggunakan Metode Taguchi-Fuzzy

Oleh

Ira Kusumaningrum

Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Darul Ulum Jombang

ira210371@gmail.com

ABSTRAK

Proses permesinan pada logam dengan tingkat kekerasan, keuletan, dan kekuatan tinggi, akan mengalami banyak kendala untuk mendapatkan kualitas yang tinggi, apabila menggunakan mesin konvensional. Kualitas yang tinggi adalah rendahnya kekasaran permukaan (*surface roughness*), tingginya ketelitian, dan kepresisian geometri produk. Penggunaan proses pemesinan non-konvensional diharapkan dapat mengatasi kendala-kendala tersebut, seperti *Electrical Discharge Machining (EDM) Sinking*. Rendahnya kekasaran permukaan hasil pemotongan *EDM Sinking*, dapat diperoleh apabila laju pengerjaan material atau *metal removal rate (MRR)* rendah. Tetapi, proses yang lambat, dapat mempengaruhi waktu penyelesaian produk serta dapat meningkatkan biaya produksi.

Penelitian ini dirancang dengan menggunakan matrik ortogonal L_{18} yang berisi 18 kombinasi variabel proses. Kombinasi variabel proses tersebut direplikasi sebanyak dua kali dan pelaksanaan eksperimennya dilakukan secara acak. Benda kerja yang digunakan adalah SKD 11 dan elektroda yang digunakan adalah tembaga. Optimasi pada laju pengerjaan material dan kekasaran permukaan dilakukan secara serentak dengan menggunakan metode Taguchi serta logika *fuzzy*.

Gap voltage merupakan variabel proses yang signifikan mempunyai kontribusi sebesar 46.91% untuk meminimumkan kekasaran permukaan dan memaksimalkan MRR. Variabel proses selanjutnya adalah *pulse current* dengan kontribusi sebesar 17.32%, *on time* sebesar 6.11% dan *duty factor* sebesar 8.20%. Kombinasi dari variabel proses yang menghasilkan kekasaran permukaan yang minimum serta MRR yang maksimum, adalah *gap voltage* 30 volt, *pulse current* 15 ampere, *on time* 300 μ s dan *duty factor* 0.4.

Kata Kunci: *EDM sinking, kekasaran permukaan, laju pengerjaan material, metode Taguchi-fuzzy, optimasi*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan komponen-komponen dengan kontur yang kompleks serta tingkat kepresisian yang tinggi, menuntut adanya suatu proses dan teknologi yang mampu mengerjakan komponen tersebut. Mesin konvensional yang ada, tidak mampu mengerjakan benda kerja dengan kontur kompleks serta tingkat kepresisian yang tinggi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan mesin perkakas non konvensional, diantaranya adalah *EDM sinking (electric discharge machine)*.

Proses pemotongan dengan *EDM sinking* menggunakan erosi yang terjadi karena adanya sejumlah loncatan bunga api listrik. 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.

Produktifitas dan kualitas yang tinggi merupakan tujuan utama dalam sebuah proses manufaktur. Usaha-usaha untuk mencapai tujuan tersebut banyak sekali dilakukan diantaranya dengan melakukan perbaikan proses melalui penentuan nilai-nilai variabel proses yang tepat. Oleh karena itu variabel proses pemotongan pada *EDM sinking* perlu diseting dengan tepat, untuk dapat menghasilkan kekasaran permukaan hasil pemotongan yang rendah dan laju pengerjaan material yang tinggi.

Beberapa penelitian pernah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan variabel yang berpengaruh pada proses *EDM sinking*. Behren dan Ginzel (2002) meneliti tentang perbandingan pengontrolan nilai *gap voltage* yang optimal. Dari hasil percobaan yang dilakukan oleh Behren dan Ginzel dapat disimpulkan bahwa dengan pengaturan *gap voltage* yang tepat dapat meningkatkan *MRR* dan mengurangi laju keausan elektrode. Vaani dan Hameedullah (2005) mengoptimalkan variabel proses pada proses *EDM* benda kerja dengan bahan *tool steel* yang dikeraskan. Elektrode yang digunakan adalah aluminium yang dilapisi copper. Variabel proses yang dipilih adalah *pulse on time*, *discharge current*, *discharge voltage* dan *flushing pressure*, sedangkan variabel responnya yang diamati adalah laju pengerjaan material dan kekasaran permukaan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah *discharge voltage* dan *pulse on time* dapat mempengaruhi laju pengerjaan material, sedangkan *discharge voltage*, *discharge current* dan *pulse on time* dapat mempengaruhi kekasaran permukaan.

Penelitian proses pemesinan semakin berkembang, bukan hanya untuk mengetahui pengaruh variabel proses terhadap respon, melainkan juga untuk melakukan optimasi secara serentak pada beberapa respon. Tujuan dari optimasi beberapa respon secara serentak adalah untuk mendapatkan kombinasi variabel proses pemesinan yang tepat agar dihasilkan respon yang optimal. Beberapa metode konvensional yang dapat digunakan dalam optimasi pada proses pemesinan adalah metode Taguchi, *response surface design methodology* (RSM), dan *iterative mathematical search technique*.

Metode Taguchi digunakan untuk optimasi pada satu respon. Optimasi beberapa respon akan didapatkan bila menggunakan metode Taguchi yang dilanjutkan dengan menggunakan metode *logika fuzzy*. Lin dkk. (2000) menggunakan Metode Taguchi-fuzzy untuk meneliti optimasi pada proses *EDM*. Penelitian ini juga menghasilkan seting variabel proses yang dapat meningkatkan *MRR* dari 0,00159 g/min menjadi 0.00383 g/min dan menurunkan *EWR* dari 29,9 % menjadi 2,07%.

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, perlu dilakukan penelitian tentang penentuan seting variabel proses pemesinan pada proses *EDM sinking* dengan material SKD 11 dan elektrode tembaga, agar dihasilkan laju pengerjaan material yang maksimum dan kekasaran permukaan yang minimum. Multirespon dari penelitian ini dioptimasi dengan menggunakan metode Taguchi-fuzzy, karena metode ini termasuk salah satu dari metode optimasi yang sering digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel tak bebas (respon)

Variabel respon pada penelitian ini adalah:

a. Laju pengerjaan material benda kerja

Nilai laju pengerjaan material benda kerja yang diinginkan dalam percobaan ini adalah sebesar mungkin.

b. Kekasaran permukaan benda kerja

Kekasaran permukaan benda kerja yang diharapkan dalam percobaan ini adalah sekecil mungkin.

2. Variabel proses *EDM sinking*

Variabel proses yang digunakan pada mesin *EDM sinking* ARISTECH LS-550 adalah:

- a. *Gap voltage* yang diatur mulai level 1 dan level 4 yaitu *gap voltage* sebesar 30 Volt dan 60 Volt.
- b. Arus listrik (*pulse current*). yang diatur pada 10 A, 15 A dan 20 A
- c. *On Time*. yang diatur pada 180 μ s, 250 μ s dan 300 μ s.
- d. *Duty factor* yang diatur pada nilai 0.4, 0.5 dan 0.6.

3. Variabel konstan

Polaritas yang digunakan adalah polaritas negatif dan dielektrikum yang digunakan adalah Lector 35.

2.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah SKD 11 (HITACHI SLD).
- b. Elektrode yang digunakan sebagai pahat dalam penelitian ini adalah *copper*.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Mesin *EDM Sinking* Aristech LS-550. Dengan spesifikasi sebagai berikut:

- a. Arah pergerakan : Z – 400 mm
- b. Fluida dielektrik : Lector 35
- c. Arus maksimum : 75 A



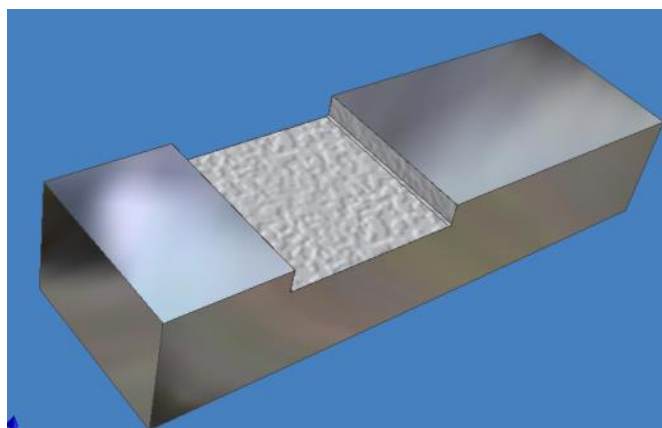
Gambar 1 Mesin *EDM sinking* Aristech LS-55

2.3 Pengukuran dan Pengambilan Data

Proses pengukuran dan pengambilan data untuk variabel respon adalah sebagai berikut:

1. Laju pengerjaan material benda kerja.

Laju pengerjaan material benda kerja merupakan pengurangan volumetrik persatuan waktu.



Gambar 2 Bentuk Benda Kerja Hasil Proses EDM Sinking

2. Kekasaran permukaan benda kerja

Rancangan percobaan dalam penelitian ini menggunakan matriks ortogonal dengan derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan variabel proses dan level yang telah ditetapkan.

Tabel Total Derajat Kebebasan Variabel Bebas dan Levelnya

No	Variabel Bebas	Jumlah Level (k)	$v_{fi} (k-1)$
1	Gap voltage (μm)	2	1
2	Pulse Current (ampere)	3	2
3	OnTime (μs)	3	2
4	Duty factor	3	2
Total derajat kebebasan			7

Dengan 7 derajat kebebasan untuk rancangan eksperimen ini, maka matriks ortogonal yang digunakan adalah L_{18} .

Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen Berdasarkan Matriks Ortogonal L_{18}

No.	VARIABEL PROSES				No	VARIABEL PROSES			
	GAP VOLTAGE (Volt)	PULSE CURRENT (Ampere)	ON TIME (μs)	DUTY FACTOR		GAP VOLTAGE (Volt)	PULSE CURRENT (Ampere)	ON TIME (μs)	DUTY FACTOR
1	30	10	180	0.4	10	60	10	180	0.6
2	30	10	250	0.5	11	60	10	250	0.4
3	30	10	300	0.6	12	60	10	300	0.5
4	30	15	180	0.4	13	60	15	180	0.5
5	30	15	250	0.5	14	60	15	250	0.6
6	30	15	300	0.6	15	60	15	300	0.4
7	30	20	180	0.5	16	60	20	180	0.6
8	30	20	250	0.6	17	60	20	250	0.4
9	30	20	300	0.4	18	60	20	300	0.5

Pengambilan data eksperimen dilakukan secara acak dengan kombinasi variabel mengacu pada rancangan eksperimen yang sesuai dengan matriks ortogonal pada

Replikasi kombinasi variabel pada eksperimen dilakukan sebanyak dua kali untuk mengatasi kesalahan-kesalahan yang tidak diketahui penyebabnya.

2.4 Optimasi Multi respon

Optimasi multi respon digunakan untuk mendapatkan pengaturan yang tepat untuk variabel *pulse current*, *gap voltage*, *on time*, dan *duty factor* yang dapat menghasilkan MRR maksimum pada kekasaran permukaan minimum. Optimasi multi respon dapat dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi yang dilanjutkan dengan logika Fuzzy. MRR digunakan sebagai respon primer yang merupakan target maksimasi, dan kekasaran permukaan sebagai respon sekunder yang merupakan kendala.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan untuk menentukan seting variabel proses yang tepat untuk menghasilkan MRR yang maksimal dan kekasaran permukaan benda kerja yang minimal dengan menggunakan mesin *EDM sinking* Aristech LS-55.

3.1 Perhitungan Rasio S/N

Perhitungan nilai rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas dari respon. Respon MRR memiliki karakteristik kualitas semakin besar semakin baik, sedangkan respon kekasaran permukaan memiliki karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik. Contoh perhitungan rasio S/N dari kekasaran permukaan untuk kombinasi pertama seting variabel proses adalah sebagai berikut:

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

$$S/N_1 (R_a) = -10 \log \left[\frac{6.82^2 + 6.893333^2}{2} \right]$$

$$S/N_1 (R_a) = -16.72238 \text{ db}$$

Sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan, nilai rasio S/N yang diperoleh untuk masing-masing respon yang diamati pada masing-masing kombinasi variabel respon ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Rasio S/N untuk Masing-masing Respon

No.	GV	PC	ON	DF	RASIO S/N (db)	
					MRR	Ra
Max					34.15317	-14.2677
Min					19.68687	-21.9049
Center					26.92002	-18.0863

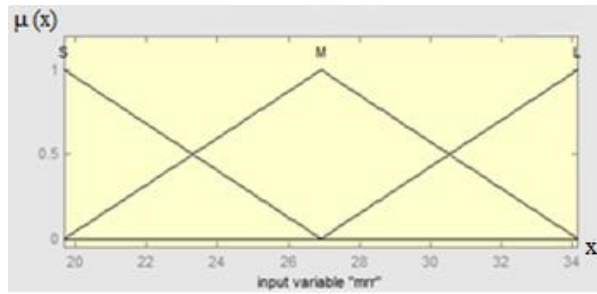
Sumber: Hasil Perhitungan

3.2 Fuzzification

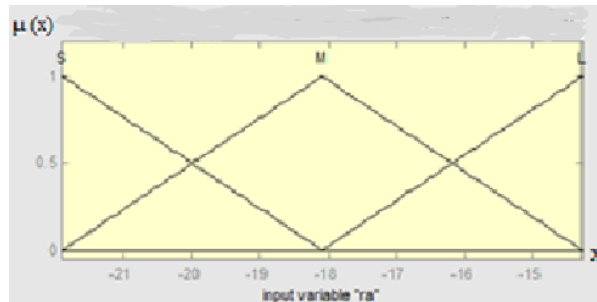
Fuzzification merupakan proses pengubahan *input* menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Variabel-variabel *input* pada penelitian ini adalah nilai rasio S/N untuk MRR dan kekasaran permukaan. Bentuk dari fungsi keanggotaan yang digunakan adalah kurva segitiga. Secara uniform fungsi keanggotaan didefinisikan menjadi 3 *fuzzy subsets*, yaitu *small (S)*, *medium (M)* dan *large (L)*.

Fungsi keanggotaan untuk MRR berada pada interval $19.69 \leq x \leq 34.15$, sedangkan fungsi keanggotaan untuk kekasaran permukaan berada pada interval $-21.9 \leq x \leq -14.27$.

Grafik dari fungsi keanggotaan untuk MRR dan kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 dibawah ini.

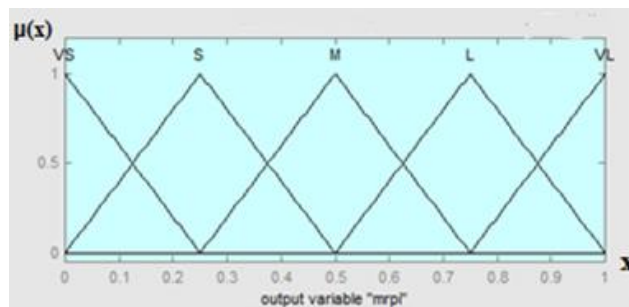


Gambar 3.1 Grafik Fungsi Keanggotaan MRR



Gambar 3.2 Grafik Fungsi Keanggotaan Kekasaran Permukaan

Variabel *output* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah *MRPI* yang diubah ke dalam *linguistic fuzzy subsets*, dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga. Fungsi keanggotaan untuk variabel *output* didefinisikan menjadi 5 *fuzzy subsets*, yaitu: *very small* (VS), *small* (S), *medium* (M), *large* (L) dan *very large* (VL) Grafik fungsi keanggotaan untuk *MRPI* ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Grafik fungsi keanggotaan untuk *MRPI*

3.3 Fuzzy Rules

Pada penelitian ini, pembuatan *fuzzy rules* yang berupa aturan *if-then* (jika-maka) menggunakan rasio S/N dari respon-respon sebagai variabel *input*, dan *MRPI* sebagai variabel *output*-nya.

Penelitian ini menggunakan 2 variabel *input* yang masing-masing memiliki 3 *fuzzy subsets*, sehingga diperlukan 9 *fuzzy rules* untuk mengkombinasikan seluruh *input*. Variabel *output*-nya yang mewakili respon-respon pada penelitian ini memiliki 5 *fuzzy subsets*.

Tabel 3.3 menunjukkan keseluruhan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3.3 Optimasi pada *Fuzzy Rule*

MRR	KEKASARAN PERMUKAAN		
	S	M	L
S	VS	S	M
M	S	M	L
L	M	L	VL

Contoh pembacaan Tabel 33 untuk aturan yang pertama adalah jika MRR *small* (S) dan kekasaran permukaan *small* (S), maka MRPI adalah *very small* (VS).

3.4 Defuzzification

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*.

MRPI akan digunakan sebagai variabel respon yang mewakili variabel MRR dan kekasaran secara serentak.

Tabel 3.4 *Multi-response Performance Index (MRPI)*

No.	GV	PC	ON	DF	RASIO S/N		MRPI	No.	GV	PC	ON	DF	RASIO S/N		MRPI
					MRR	R _a							MRR	R _a	
1	30	10	180	0.4	25.26121	-16.7224	0.5266	10	60	10	180	0.6	0.003	-16.3176	0.3846
2	30	10	250	0.5	24.43334	-17.0902	0.4834	11	60	10	250	0.4	1.98537	-19.9971	0.3147
3	30	10	300	0.6	20.85412	-14.2677	0.5503	12	60	10	300	0.5	9.68687	-16.9253	0.3347
4	30	15	180	0.4	31.78161	-14.6725	0.7603	13	60	15	180	0.5	7.56099	-17.6645	0.539
5	30	15	250	0.5	30.74468	-18.8712	0.5631	14	60	15	250	0.6	4.75812	-20.1037	0.3557
6	30	15	300	0.6	27.13994	-15.1455	0.6829	15	60	15	300	0.4	9.16672	-18.2125	0.5743
7	30	20	180	0.5	34.15317	-19.1714	0.6699	16	60	20	180	0.6	7.2413	-20.9637	0.3412
8	30	20	250	0.6	30.76649	-20.5925	0.4785	17	60	20	250	0.4	1.77453	-20.0507	0.5272
9	30	20	300	0.4	32.9197	-16.2284	0.7191	18	60	20	300	0.5	0.47914	-21.9049	0.3735

Sumber: Hasil perhitungan

3.5 Analisis Variansi 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.

Dari ANOVA dapat dinyatakan bahwa variabel proses yang memiliki kontribusi terbesar pada nilai MRPI adalah *gap voltage*, yaitu sebesar 46.91%. Kontribusi terbesar kedua pada nilai MRPI diberikan oleh *pulse current* sebesar 17.32%, diikuti oleh *duty factor* dengan kontribusi sebesar 8.20% dan *on time* dengan kontribusi sebesar 6.11%.

3.6 Prediksi pada Kondisi Optimum

Desain eksperimen yang berupa matriks ortogonal memungkinkan untuk mengelompokkan efek atau pengaruh dari masing-masing variabel proses pada level yang berbeda.

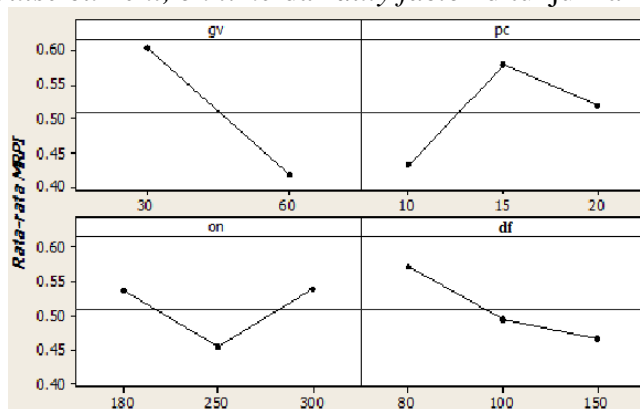
Rata-rata nilai *MRPI* pada masing-masing level dari variabel proses ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Rata-Rata *MRPI* pada Masing-Masing Level Variabel Proses

Variabel Proses	LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
<i>Gap Voltage</i>	0.603789	0.4161	
<i>Pulse Current</i>	0.432383	0.579217	0.518233
<i>On Time</i>	0.536933	0.453767	0.539133
<i>Duty factor</i>	0.570367	0.493933	0.465533

Sumber: Hasil perhitungan

Grafik untuk nilai rata rata *MRPI* pada masing-masing level dari variabel proses, yaitu *gap voltage*, *pulse current*, *on time* dan *duty factor* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Grafik Nilai Rata-rata *MRPI* pada Masing-masing Level dari Variabel Proses, *Gap Voltage (GP)*, *Pulse Current (PC)*, *On Time (ON)* dan *Duty Factor (DF)*

Berdasarkan rata-rata nilai *MRPI* dan grafik nilai tersebut pada masing-masing level variabel proses, dapat ditentukan nilai level untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon yang optimum. Kombinasi variabel proses tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 3.7 Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimum

Variabel Proses	Tingkatan Level	Nilai Level
<i>Gap Voltage</i>	Level 1	30 volt
<i>Pulse Current</i>	Level 2	15 Ampere
<i>On Time</i>	Level 3	300 μ s
<i>Duty factor</i>	Level 1	0.4

Sumber: Hasil perhitungan

Prediksi dari nilai *MRPI* untuk kombinasi variabel proses untuk respon yang optimum adalah sebagai berikut:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^o (\eta_i - \eta_m)$$

$$\hat{\eta} = 0.509944 + (0.603789 - 0.509944) + (0.579217 - 0.509944) + (0.536933 - 0.509944) + (0.64985 - 0.509944)$$

$$\hat{\eta} = 0.762672$$

Dengan demikian, nilai prediksi dari *MRPI* untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimum adalah 0.760472.

3.7 Uji Konfirmasi

Setelah level optimal dari variabel proses ditetapkan, langkah terakhir adalah memeriksa respon yang dihasilkan berdasarkan kombinasi variabel proses dari hasil optimasi. Pemeriksaan dilakukan dengan cara melakukan percobaan secara berulang dengan menggunakan variabel proses dan level yang dihasilkan dari perhitungan optimasi. *MRPI* dari percobaan konfirmasi dengan kombinasi variabel proses pada kondisi optimum dibandingkan dengan prediksi *MRPI* hasil optimasi.

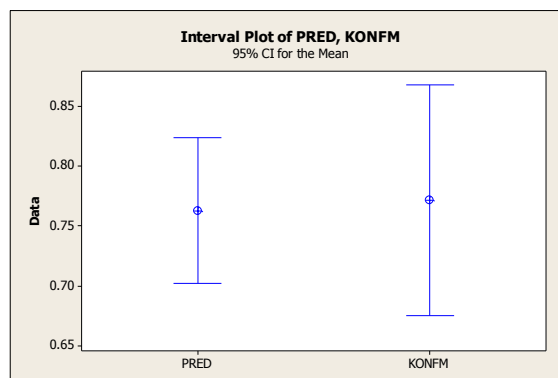
Tabel Nilai *MRPI* dari Hasil Prediksi dan Hasil Eksperimen Konfirmasi

	Rasio S/N		<i>MRPI</i>
	MRR	Ra	
Prediksi			0.7627
Eksperimen Konfirmasi	31.93685	-14.5998	0.7714

Sumber: Hasil perhitungan

Interval keyakinan 95% rata-rata *MRPI*_{prediksi} adalah 0.7627 ± 0.024 atau $0.7383 \leq MRPI_{prediksi} \leq 0.7871$.

Interval keyakinannya 95% rata-rata *MRPI* eksperimen konfirmasi adalah 0.7714 ± 0.03865 atau $0.73275 \leq MRPI_{konfirmasi} \leq 0.81005$.



Gambar Grafik interval keyakinan 95% dari Rata-rata *MRPI* Hasil Optimasi (pred) dan Eksperimen Konfirmasi (konfm).

Grafik pada gambar menunjukkan adanya perpotongan antara interval keyakinan rata-rata *MRPI* prediksi dengan interval keyakinan rata-rata *MRPI* hasil eksperimen konfirmasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa optimasi multi respon telah berhasil. Seting variabel proses yang menghasilkan respon yang optimum dari hasil optimasi, merupakan seting variabel proses yang tepat untuk menghasilkan respon optimum.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen, proses optimasi, eksperimen konfirmasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon pada Proses *EDM Sinking* material SKD 11 dengan Menggunakan Metode Taguchi-Fuzzy,” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut bahwa kombinasi dari variabel proses yang meminimumkan kekasaran permukaan, serta memaksimumkan MRR, adalah:

- *gap voltage* diatur pada 30 volt
- *pulse current* diatur pada 15 ampere
- *on time* diatur pada 300 μ s.
- *duty factor* diatur pada 0.4

1. DAFTAR PUSTAKA

- Wati, D. A. R. (2011), *Sistem Kendali Cerdas*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Bagiasna, K. (1979), *Proses-proses Non Konvensional*. Diktat kuliah Teknologi Mekanik II, Departemen Mesin ITB, Bandung.
- Fong, T. Y. dan Chen, C. F. (2007), “Multi-Objective Optimization on High-Speed Electrical Discharge Machining Process Using Taguchi fuzzy-Based Approach,” *Journal of Materials and Design*, Vol. 28, No. 23, hal. 1159-1168.
- Groover, M. P. (2002), *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 2nd editon, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Guitrau, E. B. (1997), *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
- Ho, K. H., Newman, S. T. (2003), “State of Art Electric Discharge Machining (EDM),” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 32, hal. 1287-1300.
- Iriawan, N., dan Astuti, S. P. (2006), *Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan Minitab 14*, Edisi I, Andi Offset, Yogyakarta.
- Juhana, O. dan Suratman, M. (2000), *Menggambar Teknik Mesin dengan Standar ISO*, Pustaka Grafika, Bandung.
- Kalpakjian, S dan Schmid, S. R. (2008), *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, New Jersey, Prentice Hall.
- Krar, S. F. dan Check, A. F. (1997), *Technology of Machine Tools*, Glencoe Mc. Graw-Hill, New York.
- Kusumadewi, S. dan Purnomo, H. (2010), *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*, Edisi kedua, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Lin, J. L., Wang, K. S., Yan, B. H. dan Tarn, Y. S. (2000), “Optimisation of the Electric Discharge Machining Based on the Taguchi Methoge with Fuzzy Logics,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, hal. 48–55.
- Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2005), “The Use of Grey-Fuzzy Logic for The Optimization of The Manufacturing Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, hal. 9–14.
- Montgomery, D. C. (2009), *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Groover, M.P. (2007), *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 3rd Edition.
- Ojha, K., Garg, R. K. dan Singh, K. K. (2010). "MRR Improvement in Sinking Electrical Discharge Machining: A Review," *Journal of Minerals & Minerals Characterization & Engineering*, Vol. 9, No. 8, hal. 709-739.
- Rochim, T. (1993) *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*, Bandung, Institut Teknologi Bandung.
- Rochim, T. (2001), *Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Bandung, Institut Teknologi Bandung.
- Ross, P. J. (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill International Editions. Taiwan.
- Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Sommer, C. dan Somer, S. (2005), *Complete EDM Handbook*, Advanced Publishing Inc., Houston.
- Thusty, G. (2000), *Manufacturing Processes and Equipment*. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Tzeng, Y. F. dan Chen, F. C. (2007), "Multi-objective Optimisation of High-Speed Electrical Discharge Machining Process Using a Taguchi Fuzzy-Based Approach," *Material and Design*, Vol. 28, hal. 1159-1168.
- Vaani, T. dan Hameedullah, M. (2005). "Optimization Control Parameter in Electric Discharge Machining of Hardened Steel With Copper Electroplated Aluminum Electrode," *Proceeding of the International Conference on Recent Advance in Mechanical & Material Engineering*, Malaysia.
- Zadeh, L. (1965). "Fuzzy sets," *Journal Information and Control* Vol. 8, hal. 338–353.