

Analisis Statistika Hubungan antara Lebar Pemotongan (*Kerf*) dengan Variabel Proses Permesinan *Wire-Electrical Discharge Machining* (WEDM)

Perak Samosir^{1,a)}, Pathya Rupajati^{2,b)}, dan Ismail Nur Fahmi^{3,c)}

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin ITI,
Jl. Raya Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan-Banten, Indonesia, 15320

a) samosirperak@gmail.com, b) pathyarupajati@yahoo.com, c) gatokoco.inf@gmail.com

Abstrak

Salah satu proses permesinan yang banyak digunakan dalam industri manufaktur adalah proses *wire-electrical discharge machining* (WEDM). Proses WEDM digunakan untuk teknologi pemotongan atau pahatan dalam proses pembuatan bagian perkakas (*dies*) pada mesin industri. Dalam proses WEDM benda kerja atau material yang digunakan biasanya adalah benda dengan tingkat kekerasan yang sangat tinggi dan bentuk yang kompleks, namun diharapkan hasil kinerja proses dengan tingkat kepresisian yang tinggi dan optimal. Hasil proses yang optimal dipengaruhi oleh variabel proses WEDM dan salah satu kinerja proses WEDM adalah lebar pemotongan (*kerf*) yang sempit. Dalam penelitian ini dilakukan analisis statistika hubungan antara lebar pemotongan (*kerf*) dengan variabel proses WEDM yaitu *arc on time* (AoT), *servo voltage* (SV) dan *wire feed* (WF) pada proses pemotongan material baja AISI O1. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa lebar pemotongan (*kerf*) minimum terjadi pada AoT = 2 A, SV = 55-volt dan WF = 12 mm/min.

Kata kunci: WEDM, *kerf*, *arc on time*, *servo voltage*, *wire feed*

Abstract

One of the most widely used machining processes in the manufacturing industry is the wire-electrical discharge machining (WEDM) process. The WEDM process is used for cutting or sculpting technology in the process of making tool parts (dies) on industrial machines. In the WEDM process, the workpiece or material used is usually an object with a very high level of hardness and a complex shape, but it is hoped that the results of process performance with a high and optimal level of precision are expected. The optimal process results are influenced by the WEDM process variables and one of the performances of the WEDM process is the narrow cutting width (kerf). In this study, statistical analysis of the relationship between cutting width (kerf) and WEDM process variables, namely arc on time (AoT), servo voltage (SV) and wire feed (WF) was carried out in the AISI O1 steel material cutting process. From the results of this study, it was found that the minimum cutting width (kerf) occurred at AoT = 2 A, SV = 55 volts and WF = 12 mm/min.

Keywords: WEDM, *kerf*, *arc on time*, *servo voltage*, *wire feed*

I. PENDAHULUAN

Dalam industri manufaktur terdapat dua jenis mesin yaitu konvensional dan nonkonvensional. Mesin konvensional adalah mesin yang dalam proses kerjanya masih terjadi kontak antara benda kerja atau material dengan mesinnya, seperti mesin bubut, mesin penggiling dan mesin pengeboran. Disisi lain mesin konvensional biasanya sulit dalam memproses benda kerja yang keras seperti proses pemakanan atau proses pemahatan dan juga masih sulit untuk mengontrol agar kualitas hasil produksi tidak mengalami kerusakan. Mesin nonkonvensional tentu saja mesin yang dalam proses kerjanya tidak terjadi kontak antara benda kerja dengan mesinnya. Mesin-mesin nonkonvensional dapat memproses benda kerja dengan tingkat kekerasan yang sangat tinggi seperti perkakas baja, dengan proses permesinan yang dapat diatur sehingga menghasilkan hasil produksi yang optimal. Mesin nonkonvensional

menggunakan sumber energi dalam proses kerja permesinannya, sumber energi dapat berupa mekanik, thermal, kimia dan elektrokimia. Contoh mesin-mesin nonkonvensional adalah *Water Jet Machining* (WJM), *Electrical Discharge Machining* (EDM) dan *Laser Beam Machining* (LBM) [1]

Mesin nonkonvensional yang banyak digunakan adalah EDM. Teknologi mesin EDM ditemukan oleh Joseph Priestley pada tahun 1770 ketika dia menemukan efek percikan atau paparan arus listrik terhadap permukaan benda kerja. Pada tahun 1943 EDM dikembangkan oleh Butinzky dan Laranzenko dengan cara menggunakan bahan dielektrik untuk mengontrol percikan arus [2]. Pada Gambar 1 diberikan contoh mesin EDM [3].

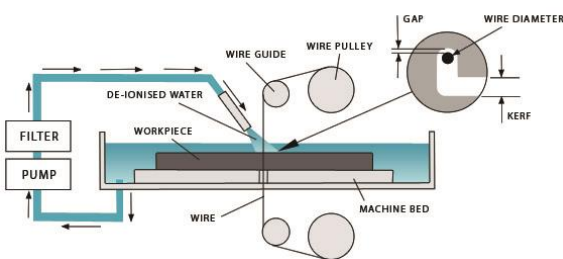
Salah satu proses permesinan pada mesin EDM yang paling banyak digunakan dalam industri manufaktur adalah *wire-electrical discharge machining* (WEDM). WEDM merupakan proses termoelektrik yang

memanfaatkan percikan arus listrik yang terjadi karena adanya perbedaan tegangan yang bersifat konduktif antara benda kerja dan elektroda di dalam suatu bahan dielektrik [4].

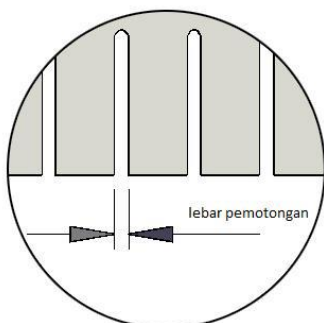


Gambar 1. Contoh mesin EDM

Proses WEDM merupakan teknologi pemotongan yang banyak digunakan dalam proses pembuatan bagian perkakas (*dies*) pada mesin industri seperti pisau pemotong *punch* (pemotong di bagian atas) dan pisau pemotong *die* (pemotong di bagian bawah). Pemotongan dengan proses WEDM terhadap material baja dengan konduktivitas yang tinggi seperti material baja AISI O1 harus diatur sedemikian rupa sehingga memberikan hasil yang optimal seperti lebar pemotongan (*kerf*) yang sempit. Pengaturan ini menyangkut pengaturan variabel-variabel proses WEDM pada saat melakukan pemotongan material atau benda kerja. Pada Gambar 2 diberikan ilustrasi pemotongan dalam proses WEDM dan pada Gambar 3 diberikan ilustrasi pengukuran lebar pemotongan (*kerf*) [4].



Gambar 2. Ilustrasi pemotongan dalam proses WEDM



Gambar 3. Ilustrasi pengukuran lebar pemotongan (*kerf*)

Pada proses WEDM terdapat variabel-variabel proses permesinan diantaranya adalah *arc on time*, *on time*, *servo voltage* dan *wire feed*. *Arc on time* adalah faktor yang mengatur besarnya arus tambahan, *on time* adalah kondisi ketika terjadi tegangan listrik pada celah antara kawat elektroda dan material (benda kerja), *servo voltage* adalah faktor tegangan yang diberikan dengan tujuan supaya tidak terjadi hubungan singkat dalam proses, dan *wire feed* adalah faktor yang berguna untuk pengaturan kecepatan pemakanan kawat elektroda [5], [6].

Variasi dari variabel-variabel proses WEDM dapat mempengaruhi karakteristik hasil (variabel respon) proses WEDM. Proses WEDM yang baik akan menghasilkan karakteristik kekasaran permukaan yang rendah, laju pengerjaan bahan yang cepat, lebar pemotongan yang sempit dan lapisan *recast* tipis [5], [6].

Kumar, P., dkk (2020) [7] telah melakukan penelitian untuk mengkaji karakteristik kinerja proses WEDM yang dapat memberikan optimasi variabel-variabel respon. Dari penelitian ini diperoleh bahwa variabel-variabel respon adalah tingkat kehilangan material, kekasaran permukaan, rasio keausan kawat, penyimpangan dimensi, lebar pemotongan (*kerf*) dan ketebalan lapisan putih. Sedangkan karakteristik kinerja proses WEDM antara lain *relation to pulse-on time*, *pulse-off time*, *gap voltage*, *peak current*, *wire feed rate*, *wire tension*, *injection pressure*, *dielectric concentration* dan *polarity*.

Ada berbagai teknik yang dapat dilakukan untuk mengkaji optimasi karakteristik hasil proses WEDM, diantaranya metode Taguchi, *Grey Relational Analysis* (GRA), *Response Surface Methodology* (RSM) dan Analisis Variansi [5]. Dengan teknik ini dapat dianalisis optimasi multirespon secara serentak berdasarkan pengaturan variabel-variabel proses permesinan yang digunakan dalam proses WEDM [4]. Metode yang paling banyak digunakan adalah metode Taguchi. Dengan metode ini dapat dirancang kombinasi taraf atau level parameter atau variabel proses WEDM yang memberikan output atau variabel respon yang optimal. Penggunaan metode Taguchi harus digabungkan dengan metode lain seperti Logika *Fuzzy*, GRA dan RSM [5].

II. LANDASAN TEORI

A. Variabel Proses WEDM

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menganalisis hubungan antara variabel-variabel proses WEDM dengan karakteristik (variabel respon) proses WEDM.

F. Sepueroe (2012) [5] telah melakukan penelitian untuk mengkaji optimasi multirespon secara serentak dari proses WEDM dengan variabel respon adalah laju pengerjaan bahan dan kekasaran permukaan dengan menggunakan metode Taguchi dan logika *fuzzy*. Penelitian dilakukan pada material baja SKD-11. Dalam penelitian ini variabel-variabel proses WEDM adalah *flushing pressure*, *on time*, *open voltage* dan *off time*. Penelitian ini bertujuan menganalisis kontribusi dari variabel-variabel proses dalam mengurangi variasi yang terjadi pada variabel respon. Dari penelitian ini diperoleh

bahwa kontribusi dari variabel-variabel proses memberikan optimum pada variabel *flushing pressure* 10 kg/cm², *on time* 0,8 μ s, *open voltage* 80 volt dan *off time* 12 μ s.

F. Bisono dkk. (2019) [4] telah melakukan penelitian untuk mengkaji optimasi multirespon secara serentak pada proses WEDM pembuatan *punch* dan *dies* kapal aluminium. Variabel respon yang diteliti adalah lebar pemotongan (*kerf*), kekasaran permukaan dan ketebalan lapisan putih. Variabel-variabel proses WEDM adalah *arc on time*, *on time*, *open voltage* dan *servo voltage*. Penelitian dilakukan pada material baja SKD-11. Rancangan percobaan menggunakan metode Taguchi dengan langkah optimasi menggunakan metode GRA. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa proses optimum terjadi pada *arc on time* 1 A, *on time* 4 μ s, *open voltage* 70 volt dan *servo voltage* 40 volt yang menghasilkan lebar pemotongan (*kerf*), kekasaran permukaan dan ketebalan lapisan putih paling optimum secara serentak.

K. Ishfaq dkk. (2019) [8] juga telah melakukan penelitian untuk mengkaji optimasi multirespon secara serentak proses WEDM pada material besi tahan karat (*stainless steel*) jenis SS 304. Proses optimasi pada material ini sifatnya kompleks karena adanya kontradiksi dalam jenis optimasi yang diinginkan. Rancangan percobaan menggunakan metode Taguchi dengan langkah optimasi menggunakan metode GRA. Dari hasil Analisis Variansi (ANOVA) diperoleh bahwa variabel respon yang signifikan adalah *cutting speed* dan lebar pemotongan (*kerf*). Grafik struktur mikro *scanning electron microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa secara simultan tercapai optimasi terhadap variabel multirespon yang terjadi pada variabel *voltage* 50 volt, *drum speed* 35 Hz, *arc on time* 3A dan *nozzle o_set distance* 220 mm.

S. Habib (2017) [9] telah melakukan penelitian untuk mengkaji model matematika yang menggambarkan pengaruh variabel-variabel proses WEDM terhadap getaran kawat (*wire vibration*) dan lebar pemotongan (*kerf*). Analisis dilakukan dengan menggunakan metode RSM. Hasil pengujian dengan ANOVA menyatakan bahwa model cukup atau memadai untuk menyatakan adanya hubungan yang kuat antara variabel proses WEDM seperti *wire tension*, *wire running speed*, *flow rate* dan *servo voltage* dengan getaran kawat (*wire vibration*) dengan lebar pemotongan (*kerf*). Dalam penelitian ini diperoleh kombinasi optimal variabel proses WEDM seperti *wire tension*, *wire running speed*, *flow rate* dan *servo voltage* yang meminimumkan getaran kawat (*wire vibration*) dan lebar pemotongan (*kerf*). Diantaranya bahwa lebar pemotongan (*kerf*) berkurang dengan meningkatnya *wire tension* dan *wire running speed*. Sebaliknya lebar pemotongan (*kerf*) bertambah dengan meningkatnya *flow rate* dan *servo voltage*.

O.A. Setiawan dkk. (2018) [10] telah melakukan penelitian untuk mengkaji optimasi variabel proses WEDM pada baja perkakas SKD 11 dengan menggunakan metode Taguchi. Dalam penelitian ini variabel proses adalah kuat arus, voltase dan *wire speed* sedangkan variabel respon adalah material *removal rate* dan lebar pemotongan (*kerf*). Menurut hasil penelitian

diperoleh bahwa semakin kecil kuat arus semakin baik nilai lebar pemotongan (*kerf*) dan semakin tinggi kuat arus akan menghasilkan material *removal rate* yang tinggi. Optimasi terjadi ketika kuat arus 7 A, voltase 5-volt dan *wire speed* 10 m/s.

P. Gupta et al. (2012) [11] telah melakukan penelitian untuk mengkaji pengaruh variabel proses WEDM *pulse on time*, *pulse of time*, *spark gap voltage*, *peak current* dan tegangan kawat (*wire feed*) terhadap lebar pemotongan (*kerf*). Penelitian dilakukan terhadap baja *high strength low-alloy* (HSLA). Analisis pengaruh variabel proses WEDM menggunakan metode RSM yaitu dengan menyusun model matematika yang menyatakan hubungan atau korelasi antara variabel-variabel proses WEDM dengan lebar pemotongan (*kerf*). Dari penelitian ini diperoleh bahwa lebar pemotongan berkurang dengan meningkatnya *pulse on time*, *pulse of time*, *spark gap voltage* dan *peak current*. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa lebar pemotongan bertambah dengan meningkatnya tegangan kawat.

Rupajati, P., dkk. (2018) [6] telah melakukan penelitian untuk mengkaji optimasi ketebalan lapisan recast, kekasaran permukaan dan laju pengerjaan material pada proses pemesian WEDM menggunakan metode Taguchi-grey fuzzy. Penelitian dilakukan pada proses permesinan pahat potong material baja AISI O1 yang merupakan baja konduktivitas tinggi dengan ketangguhan dan *machinability* yang baik [11]. Dalam penelitian ini keempat variabel proses permesinan divariasikan dimana masing-masing variabel 3 level, dengan replikasi sebanyak dua kali. Dengan demikian rancangan percobaan menggunakan matriks *orthogonal array* L₉. Dari penelitian ini diperoleh kualitas respon optimal pada variabel *arc on time* 3 A, variabel *on time* 8 μ s, variabel *servo voltage* 100 volt dan variabel *wire feed* 60 mm/min.

Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis statistika untuk hubungan antara variabel-variabel proses WEDM yaitu variabel *arc on time* (AoT), variabel *servo voltage* (SV) dan variabel *wire feed* (WF) dengan variabel respon lebar pemotongan (*kerf*). Data diperoleh dari bagian hasil penelitian yang dilakukan Rupajati, P., dkk. (2018). Analisis statistika menggunakan rancangan faktorial 3 faktor dengan replikasi sebanyak tiga kali.

Analisis hubungan atau pengaruh antara variabel-variabel proses WEDM dengan variabel respon yang dilakukan dalam penelitian ini berbeda dengan analisis hubungan yang dilakukan pada penelitian-penelitian yang telah disebutkan sebelumnya [1], [2], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Pada penelitian ini akan dilakukan langkah-langkah analisis untuk menyusun, mengkaji dan memilih model regresi yang menyatakan hubungan antara variabel-variabel proses WEDM yaitu variabel *arc on time* (AoT), *servo voltage* (SV) dan *wire feed* (WF) dengan variabel respon lebar pemotongan (*kerf*). Dengan model tersebut dapat ditentukan kombinasi variabel proses WEDM yang memberikan nilai lebar pemotongan (*kerf*) minimum.

Penyusunan model regresi dilakukan dengan menggunakan pendekatan analisis variansi untuk rancangan faktorial dengan tiga faktor dengan semua

variabel prediktor yaitu variabel proses WEDM merupakan variabel kualitatif [12], [13], [14].

Penyusunan model regresi untuk masalah hubungan antara variabel-variabel proses WEDM dengan variabel responnya dapat membantu kegiatan penelitian khususnya dalam melihat nilai rata-rata variabel respon untuk kombinasi tertentu dari variabel-variabel proses WEDM.

B. Rancangan Faktorial dengan tiga faktor

• Model rancangan faktorial dengan tiga faktor.

Model lengkap (*complete model*) untuk rancangan faktorial dengan tiga faktor A, B dan C, di mana masing-masing faktor terdiri dari 3 taraf (*level*) diberikan pada persamaan (1) [12], [13], [14].

$$\begin{aligned}
 E[Y] = & \beta_0 & (1) \\
 & + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \rightarrow \text{efek utama A} \\
 & + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \rightarrow \text{efek utama A} \\
 & + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 \rightarrow \text{efek utama A} \\
 & + \beta_7 x_1 x_3 + \beta_8 x_1 x_4 + \beta_9 x_2 x_3 + \beta_{10} x_2 x_4 \\
 & \hspace{10em} \rightarrow \text{interaksi A dan B} \\
 & + \beta_{11} x_1 x_5 + \beta_{12} x_1 x_6 + \beta_{13} x_2 x_5 + \beta_{14} x_2 x_6 \\
 & \hspace{10em} \rightarrow \text{interaksi A dan C} \\
 & + \beta_{15} x_3 x_5 + \beta_{16} x_3 x_6 + \beta_{17} x_4 x_5 + \beta_{18} x_4 x_6 \\
 & \hspace{10em} \rightarrow \text{interaksi B dan C} \\
 & + \beta_{19} x_1 x_3 x_5 + \beta_{20} x_1 x_4 x_6 \rightarrow \text{interaksi ketiga faktor} \\
 & + \beta_{21} x_2 x_3 x_5 + \beta_{22} x_2 x_4 x_6 \rightarrow \text{interaksi ketiga faktor}
 \end{aligned}$$

di mana E[Y] adalah rata-rata (*mean*) variabel respon (variabel tak bebas), $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ adalah variabel-variabel prediktor (variabel bebas) kualitatif, dan $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{22}$ adalah parameter-parameter model.

Konsep model ini merupakan konsep rata-rata (*mean*) yang artinya model yang diperoleh merupakan hubungan antara rata-rata (*mean*) variabel respon (E[Y]) dengan variabel-variabel prediktor yang mempengaruhinya. Penyusunan model di atas menggunakan model regresi untuk kasus rancangan percobaan faktorial dengan 3 faktor. Model diperoleh dengan menggunakan data-data hasil percobaan/eksperimen. Dengan model ini dapat diestimasi nilai rata-rata (*mean*) E[Y] untuk nilai tertentu dari variabel-variabel prediktor.

Dalam model pada Persamaan (1) level A adalah A_1, A_2 dan A_3 ; level B adalah B_1, B_2 dan B_3 ; serta level C adalah C_1, C_2 dan C_3 , sehingga variabel-variabel prediktor dalam model adalah:

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \text{jika } A_2 \\ 0 & \text{jika } A_1 \end{cases}, \quad x_2 = \begin{cases} 1 & \text{jika } A_3 \\ 0 & \text{jika } A_1 \end{cases}$$

dengan *base level* faktor A adalah A_1

$$x_3 = \begin{cases} 1 & \text{jika } B_2 \\ 0 & \text{jika } B_1 \end{cases}, \quad x_4 = \begin{cases} 1 & \text{jika } B_3 \\ 0 & \text{jika } B_1 \end{cases}$$

dengan *base level* faktor B adalah B_1

$$x_5 = \begin{cases} 1 & \text{jika } C_2 \\ 0 & \text{jika } C_1 \end{cases}, \quad x_6 = \begin{cases} 1 & \text{jika } C_3 \\ 0 & \text{jika } C_1 \end{cases}$$

dengan *base level* faktor C adalah C_1 .

Dalam model pada Persamaan (1) efek (pengaruh) faktor A terhadap variabel respon Y dinyatakan dalam suku-suku efek utama A, efek (pengaruh) faktor B terhadap variabel respon Y dinyatakan dalam suku-suku efek utama B dan efek (pengaruh) faktor C terhadap variabel respon Y dinyatakan dalam suku-suku efek utama C. Sedangkan interaksi antara faktor-faktor dinyatakan dalam suku-suku interaksi antara A dan B, interaksi antara A dan C, interaksi antara B dan C, dan interaksi antara ketiga faktor.

Dalam model pada Persamaan (1) terdapat parameter-parameter $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{22}$ [12], [13], [14] yang nilainya akan diestimasi dengan menggunakan data hasil percobaan/eksperimen. Metode estimasi adalah dengan metode kuadrat terkecil dalam konsep analisis regresi.

Dari definisi variabel-variabel prediktor $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$; jika diambil nilai $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = 0$ yaitu:

- level faktor A adalah A_1
- level faktor B adalah B_1
- level faktor C adalah C_1

maka diperoleh nilai rata-rata (*mean*) variabel respon:

$$E[Y] = \beta_0$$

Yang bermakna bahwa nilai rata-rata (*mean*) variabel respon pada semua *base level* adalah β_0 .

Nilai rata-rata (*mean*) variabel respon pada kombinasi level yang lain dapat diperoleh dengan mensubstitusikan nilai variabel prediktor ke dalam Persamaan (1). Misal untuk:

- level faktor A adalah A_2
- level faktor B adalah B_1 dan
- level faktor C adalah C_1

yang berarti: $x_1 = 1, x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = 0$, maka nilai rata-rata (*mean*) variabel respon:

$$E[Y] = \beta_0 + \beta_1$$

Jadi jika nilai estimasi untuk semua parameter sudah diperoleh, dapat dilakukan estimasi rata-rata (*mean*) dari variabel respon untuk setiap kombinasi taraf/level dari ketiga faktor. Dengan tersedianya program pengolah data statistika proses penyusunan dan analisis model serta perhitungan nilai estimasi rata-rata (*mean*) variabel respon dapat dilakukan dengan mudah sepanjang memenuhi syarat atau kondisi penggunaan model tersebut.

• Uji hipotesis rancangan faktorial dengan tiga faktor.

Nilai parameter-parameter beta dalam model pada Persamaan (1) mempunyai tafsiran sebagai ukuran besarnya pengaruh faktor-faktor utama atau faktor-faktor interaksi terhadap variabel respon Y. Dalam prosedur pengujian hipotesis model ini, hipotesis nol (H_0) adalah semua parameter bernilai nol yang berarti tidak ada

pengaruh dari faktor-faktor utama atau faktor-faktor interaksi terhadap variabel respon Y. Sedangkan hipotesis alternatif/tandingan (H_1) adalah minimal ada satu parameter beta yang tidak bernilai nol, yang berarti ada faktor yang mempengaruhi variabel respon dalam penelitian. Prosedur pengujian hipotesis dinyatakan sebagai berikut.

$H_0: \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_{22} = 0$
lawan alternatif H_1 : minimal ada satu beta $\neq 0$

Keputusan penolakan H_0 didasarkan nilai statistik F pada tabel analisis variansi atau ANOVA seperti yang diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel ANOVA rancangan faktorial tiga faktor

Source (1)	df (2)	SS (3)	F (4)	p-value (5)
A	3 – 1	SS(A)	F_A	p_A
B	3 – 1	SS(B)	F_B	p_B
C	3 – 1	SS(C)	F_C	p_C
AB	(3 – 1)(3 – 1)	SS(AB)	F_{AB}	p_{AB}
AC	(3 – 1)(3 – 1)	SS(AC)	F_{AC}	p_{AC}
BC	(3 – 1)(3 – 1)	SS(BC)	F_{BC}	p_{BC}
ABC*	(3 – 1)(3 – 1)(3 – 1)	SS(ABC)	F_{ABC}	p_{ABC}
Error	(n – 1) – df *	SSE		
Total	n – 1	SS(Total)		

n adalah jumlah data

Tabel ANOVA menjelaskan sumber variasi dalam model akibat adanya pengaruh dari faktor-faktor utama dan faktor-faktor interaksi terhadap variabel respon. Pada kolom 1 Tabel 1 di atas sumber variasi (*source*) adalah faktor utama A, B dan C dan faktor interaksi AB, AC, BC dan ABC. Variasi dari sumber dinyatakan dalam jumlah kuadrat atau *sum of squares* (SS), yang pada Tabel 1 terletak pada kolom 3. Dalam konsepnya SS mempunyai derajat bebas atau *degree of freedom* (df), yang pada Tabel 1 terletak pada kolom 2. Kedua nilai ini yaitu SS dan df akan memberikan nilai F untuk setiap *source* dengan nilai F diberikan pada persamaan (2):

$$F = \frac{MS(Source)/df(Source)}{MS(Error)/df(Error)} \quad (2)$$

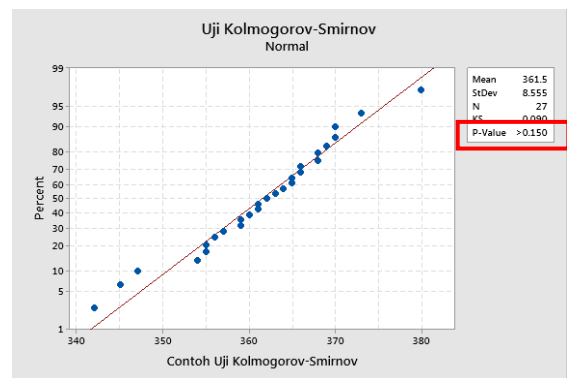
Nilai F akan memberikan nilai-p (*p-value*) yang pada Tabel 1 terletak pada kolom 5. Nilai-p ditentukan dengan menggunakan konsep peluang. Jika nilai-p $\leq \alpha$ yang diberikan, maka H_0 ditolak yang artinya ada pengaruh faktor dalam model terhadap variabel respon Y. Kriteria α merupakan nilai peluang maksimum untuk menolak hipotesis nol, dengan resiko ternyata hipotesis nol adalah benar. Umumnya nilai α adalah 0,05, namun dalam beberapa penelitian pada rancangan percobaan, dapat diambil lebih besar dari 0,05.

Kriteria kesesuaian model adalah R^2 yang nilainya dinyatakan dalam persentase. Jika model sangat sesuai maka R^2 akan mendekati nilai 100%.

Penggunaan model pada Persamaan 1 didasarkan pada asumsi bahwa data percobaan berdistribusi normal dengan variansi konstan/homogen. Maka untuk penggunaan model harus dilakukan pemeriksaan apakah asumsi kenormalan dan kehomogenan variansi dipenuhi. Untuk menguji kenormalan digunakan Uji Kolmogorov-Smirnov dengan prosedur pengujian sebagai berikut.

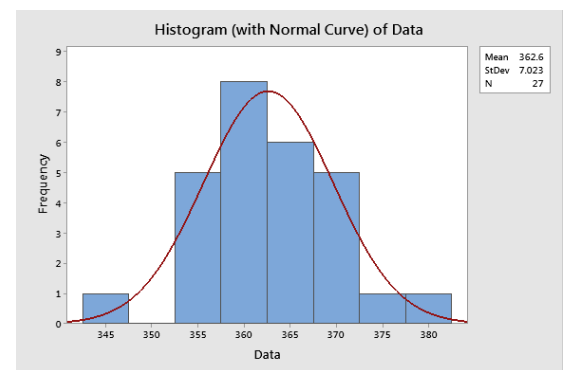
H_0 : Distribusi data adalah normal
 H_1 : Distribusi data tidak normal.

Uji Kolmogorov-Smirnov dilengkapi dengan grafik *probability plot* dan nilai-p (di dalam kotak merah) untuk uji hipotesis seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Hipotesis nol diterima jika nilai-p pada pengujian lebih besar dari kriteria α yang ditetapkan untuk penelitian.



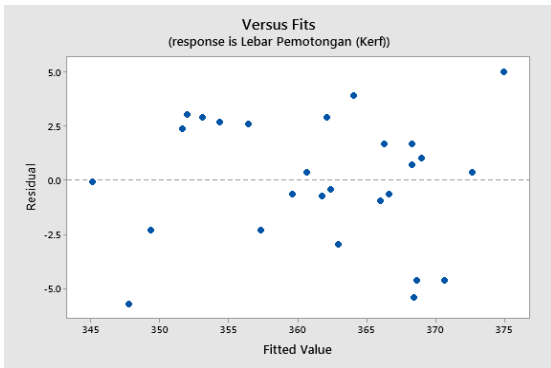
Gambar 4. Probability plot uji Kolmogorov-Smirnov

Pemeriksaan kenormalan juga dapat dilakukan dengan menggunakan grafik histogram dengan kurva normal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Jika bentuk histogram (batang berwarna biru) mendekati bentuk kurva normal (kurva berwarna merah), maka distribusi data adalah normal.



Gambar 5. Histogram (with Normal Curve) of Data

Untuk pengujian kehomogenan variansi dapat dilihat dengan menggunakan grafik antara residual (sumbu-y) dengan nilai pengepasan model pada data atau $Fits\backslash$ (sumbu-x). Jika titik-titik residual menyebar dalam bentuk pita seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, maka asumsi kehomogenan variansi dipenuhi.



Gambar 6. Contoh grafik dengan variansi homogen

Ada kalanya model lengkap seperti pada Persamaan (1) tidak memadai untuk data dalam suatu percobaan sedemikian sehingga, misalnya suku interaksi antara ketiga faktor tidak signifikan dan tidak tersedia derajat bebas (*df*) untuk *Source Error* seperti yang diperlihatkan dengan tanda * dan yang dihighlight pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel ANOVA dengan derajat bebas Error bernilai nol

Source	df	SS	F	p-value
A	2	SS(A)	F _A	p _A
B	2	SS(B)	F _B	p _B
C	2	SS(C)	F _C	p _C
AB	4	SS(AB)	F _{AB}	p _{AB}
AC	4	SS(AC)	F _{AC}	p _{AC}
BC	4	SS(BC)	F _{BC}	p _{BC}
ABC*	8	SS(ABC)	F _{ABC}	p _{ABC}
Error	0	SSE		
Total	26	SS(Total)		

Untuk kasus ini penyusunan model diulang kembali dengan mengeluarkan suku interaksi ketiga faktor dari model, sehingga diperoleh model yang disebut model tereduksi (*reduced model*) seperti yang diberikan pada persamaan (3).

$$E[Y] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_1 x_3 + \beta_8 x_1 x_4 + \beta_9 x_2 x_3 + \beta_{10} x_2 x_4 + \beta_{11} x_1 x_5 + \beta_{12} x_1 x_6 + \beta_{13} x_2 x_5 + \beta_{14} x_2 x_6 + \beta_{15} x_3 x_5 + \beta_{16} x_3 x_6 + \beta_{17} x_4 x_5 + \beta_{18} x_4 x_6 + \beta_{19} x_1 x_3 x_5 + \beta_{20} x_1 x_4 x_6 + \beta_{21} x_2 x_3 x_5 + \beta_{22} x_2 x_4 x_6 \tag{3}$$

Pengolahan data dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak Minitab dan SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*).

III. METODE PENELITIAN

Data pada penelitian ini merupakan bagian dari hasil percobaan yang dilakukan oleh Rupajati dkk 2018 di BPPT BT MEPPPO dan Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Proses pemotongan menggunakan mesin WEDM tipe CHMER 32GS (Gambar 7) terhadap baja AISI O1 dengan kekerasan 52-57 HRC, dan

elektroda kawat berbahan kuningan dengan diameter 0,25 mm.



Gambar 7. Mesin wire-EDM CHMER 32GS

Variabel-variabel proses WEDM adalah *arc on time* (AoT), *servo voltage* (SV) dan *wire feed* (WF) dengan variabel respon lebar pemotongan (*kerf*). Analisis statistika yang digunakan adalah rancangan faktorial dengan tiga faktor yang masing-masing terdiri dari tiga level. Level AoT adalah 2 A, 4 A dan 5 A, level SV adalah 37-volt, 55-volt dan 70-volt, dan level WF adalah 3 mm/min, 7 mm/min dan 12 mm/min.

Model lengkap (*complete model*) untuk rancangan ini diberikan pada persamaan (4) berikut.

$$E[Y] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_1 x_3 + \beta_8 x_1 x_4 + \beta_9 x_2 x_3 + \beta_{10} x_2 x_4 + \beta_{11} x_1 x_5 + \beta_{12} x_1 x_6 + \beta_{13} x_2 x_5 + \beta_{14} x_2 x_6 + \beta_{15} x_3 x_5 + \beta_{16} x_3 x_6 + \beta_{17} x_4 x_5 + \beta_{18} x_4 x_6 + \beta_{19} x_1 x_3 x_5 + \beta_{20} x_1 x_4 x_6 + \beta_{21} x_2 x_3 x_5 + \beta_{22} x_2 x_4 x_6 \tag{4}$$

di mana E[Y] adalah rata-rata nilai variabel respon lebar pemotongan (*kerf*).

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \text{jika AoT} = 4 \text{ A} \\ 0 & \text{jika AoT} = 2 \text{ A} \end{cases}$$

$$x_2 = \begin{cases} 1 & \text{jika AoT} = 5 \text{ A} \\ 0 & \text{jika AoT} = 2 \text{ A} \end{cases}$$

base level AoT = 2A

$$x_3 = \begin{cases} 1 & \text{jika SV} = 55 \text{ volt} \\ 0 & \text{jika SV} = 37 \text{ volt} \end{cases}$$

$$x_4 = \begin{cases} 1 & \text{jika SV} = 70 \text{ volt} \\ 0 & \text{jika SV} = 37 \text{ volt} \end{cases}$$

base level SV = 37 volt

$$x_5 = \begin{cases} 1 & \text{jika WF= 7 mm/min} \\ 0 & \text{jika WF= 3 mm/min} \end{cases}$$

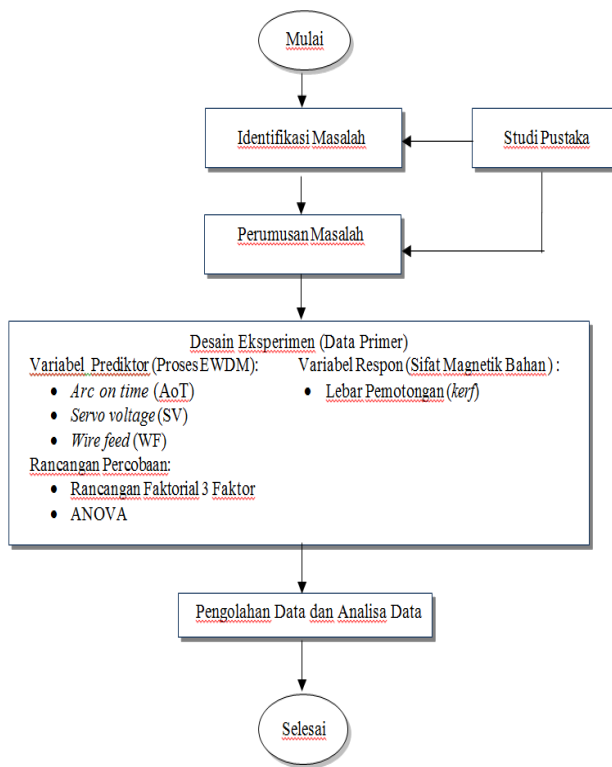
$$x_4 = \begin{cases} 1 & \text{jika WF=12 mm/min} \\ 0 & \text{jika WF= 3 mm/min} \end{cases}$$

base level WF = 3mm/min

Dalam model pada Persamaan (4) $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{22}$ adalah parameter-parameter model yang nilai-nilainya akan diestimasi dengan menggunakan data hasil penelitian.

Hipotesis nol (H_0) adalah semua parameter model adalah nol, yang berarti tidak ada pengaruh variabel-variabel proses WEDM terhadap lebar pemotongan (*kerf*); lawan hipotesis alternatif H_1 yaitu minimal ada satu parameter yang tidak nol, yang berarti ada variabel proses WEDM yang mempengaruhi lebar pemotongan (*kerf*). Keputusan menolak H_0 berdasarkan nilai-p pada tabel analisis variansi (ANOVA) dengan taraf signifikansi $\alpha = 0,15$ dan nilai $R^2 \geq 85\%$, dengan asumsi data berdistribusi normal dan variansi homogen.

Tahapan penelitian yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 8 sebagai berikut:



Gambar 8. Tahapan Penelitian

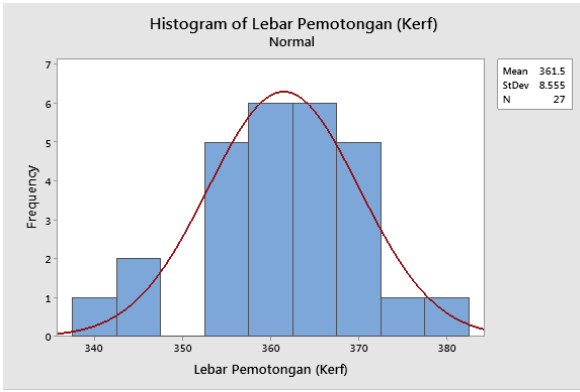
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data *arc on time* (AoT), *servo voltage* (SV), *wire feed* (WF) dan lebar pemotongan (*kerf*) pada penelitian ini diberikan pada Tabel 3 berikut.

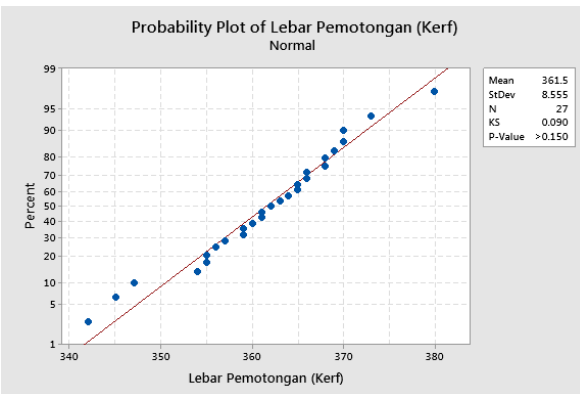
Tabel 3. Data lebar pemotongan (*kerf*)

No.	AoT (A)	SV (volt)	WF (mm/min)	Lebar Pemotongan (μm)
1	2	37	3	359
2	2	37	7	363
3	2	37	12	342
4	2	55	3	365
5	2	55	7	361
6	2	55	12	345
7	2	70	3	356
8	2	70	7	362
9	2	70	12	368
10	4	37	3	361
11	4	37	7	373
12	4	37	12	355
13	4	55	3	368
14	4	55	7	365
15	4	55	12	347
16	4	70	3	355
17	4	70	7	366
18	4	70	12	369
19	5	37	3	360
20	5	37	7	380
21	5	37	12	357
22	5	55	3	364
23	5	55	7	370
24	5	55	12	354
25	5	70	3	359
26	5	70	7	370
27	5	70	12	366

Pada Gambar 9 diberikan histogram data lebar pemotongan (*kerf*) dan pada Gambar 10 diberikan plot normal data lebar pemotongan (*kerf*).



Gambar 9. Histogram data lebar pemotongan (*kerf*)



Gambar 10. Plot normal data lebar pemotongan (*kerf*).

Kedua gambar menunjukkan bahwa data lebar pemotongan (*kerf*) mempunyai distribusi normal dengan nilai-p > 0,15. Pada Tabel 4 diberikan statistik data lebar pemotongan (*kerf*), nilai minimum pada AoT = 2 A, SV = 37-volt dan WF = 12 mm/min dan maksimum pada AoT = 5 A, SV = 37-volt dan WF = 7 mm/min. Pada Tabel 5 diberikan data informasi faktor pada penelitian ini.

Tabel 4. Statistik lebar pemotongan (*kerf*)

Variable	Standard		Minimum	Maksimum
	Mean	Deviasi		
Lebar Pemotongan (<i>Kerf</i>)	361.48	8.55	342.00	380.00

Tabel 5. Informasi faktor

Faktor	Type	Levels	Values
AoT	Fixed	3	2, 4, 5
SV	Fixed	3	37, 55, 70
WF	Fixed	3	3, 7, 12

Untuk data penelitian ini, model lengkap seperti pada Persamaan (1) tidak valid digunakan, karena tidak memberikan derajat bebas untuk *Source Error* seperti yang diperlihatkan melalui Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Tabel ANOVA model lengkap

Source	df	SS	F	p-value
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
A	2	198.74	*	*
B	2	58.74	*	*
C	2	642.74	*	*
AB	4	60.59	*	*
AC	4	83.26	*	*
BC	4	781.26	*	*
ABC*	8	77.41	*	*
Error	0	*		
Total	26	SS(Total)		

Selanjutnya penyusunan model dilakukan tanpa suku interaksi ketiga faktor. Hasil pengolahan data diberikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Tabel ANOVA rancangan faktorial tahap I

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
AoT	2	198.74	99.370	10.27	0.006
SV	2	58.74	29.370	3.04	0.104
WF	2	642.74	321.370	33.21	0.000
AoT*SV	4	60.59	15.148	1.57	0.273
AoT*WF	4	83.26	20.815	2.15	0.166
SV*WF	4	781.26	195.315	20.19	0.000
Error	8	77.41	9.676		
Total	26	1902.74			

Dari Tabel 7 di atas terlihat bahwa nilai-p untuk interaksi antara AoT*SV dan AoT*WF lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 0.15$. Maka kedua interaksi ini dikeluarkan dari model. Kemudian data diolah kembali dan diperoleh tabel ANOVA seperti yang diberikan pada Tabel 8. Pada Tabel 8 terlihat bahwa nilai-p untuk semua *Source* sudah memenuhi syarat yang ditetapkan yaitu nilai-p $\leq \alpha = 0.15$ dan $R^2 = 88.37\%$ lebih besar dari 85%.

Tabel 8. Tabel ANOVA rancangan faktorial tahap II

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
AN	2	198.74	99.37	7.19	0.006
SV	2	58.74	29.37	2.12	0.150
WF	2	642.74	321.37	23.24	0.000
SV*WF	4	781.26	195.31	14.12	0.000
Error	16	221.26	13.83		
Total	26	1902.74			R² = 88.37%

Model rancangan faktorial diberikan dalam persamaan (5) dan hasil pengepasan model (*fits*) terhadap data diberikan pada Tabel 9.

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar Pemotongan (kerf)} &= 361.481 - 3.59 \text{ AoT}_2 \\
 &+ 0.63 \text{ AoT}_4 + 2.96 \text{ AoT}_5 - 0.37 \text{ SV}_{37} - \\
 &1.59 \text{ SV}_{55} + 1.96 \text{ SV}_{70} - 0.70 \text{ WF}_3 + 6.30 \text{ WF}_7 \\
 &- 5.59 \text{ WF}_{12} - 0.41 \text{ SV*WF}_{37} + 4.59 \text{ SV*WF}_{37} \\
 &7 - 4.19 \text{ SV*WF}_{37} 12 + 6.48 \text{ SV*WF}_{55} 3 \\
 &- 0.85 \text{ SV*WF}_{55} 7 - 5.63 \text{ SV*WF}_{55} 12
 \end{aligned}$$

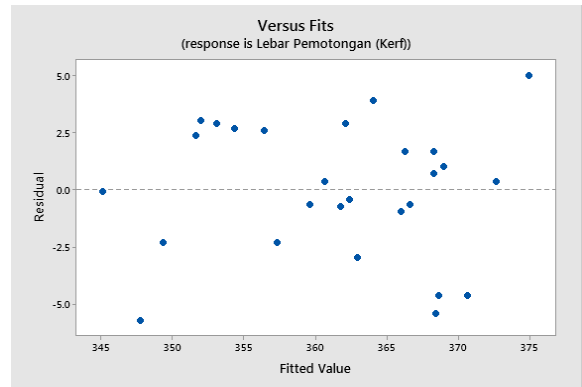
$$- 6.07 SV * WF_{70} 3 - 3.74 SV * WF_{70} 7 + 9.81 SV * WF_{70} 12$$

(5)

Tabel 9. Hasil pengepasan (*fits*) model

AN	SV	WF	Lebar Pemotongan (<i>kerf</i>)	FITS
2	37	3	359	356.407
2	37	7	363	368.407
2	37	12	342	347.741
2	55	3	365	362.074
2	55	7	361	361.740
2	55	12	345	345.074
2	70	3	356	353.074
2	70	7	362	362.407
2	70	12	368	364.074
4	37	3	361	360.629
4	37	7	373	372.629
4	37	12	355	351.962
4	55	3	368	366.296
4	55	7	365	365.962
4	55	12	347	349.296
4	70	3	355	357.296
4	70	7	366	366.629
4	70	12	369	368.296
5	37	3	360	362.962
5	37	7	380	374.962
5	37	12	357	354.296
5	55	3	364	368.629
5	55	7	370	368.296
5	55	12	354	351.629
5	70	3	359	359.629
5	70	7	370	368.962
5	70	12	366	370.629

Pada Gambar 11 diberikan grafik antara residual (sumbu-y) dengan dengan nilai pengepasan model pada data atau *fits*(sumbu-x). Dari Gambar 11 terlihat bahwa titik-titik residual menyebar dalam bentuk pita yang bermakna bahwa data memenuhi asumsi kehomogenan ragam.



Gambar 11. Grafik antara residual dengan *fits*

Dengan demikian karena asumsi-asumsi sudah terpenuhi maka dapat dilakukan inferensi berdasarkan hasil pengolahan data pada penelitian ini.

Pada Tabel 10 diberikan statistik data pengepasan lebar pemotongan (*kerf*) menggunakan Persamaan (5), nilai minimum terjadi pada AoT = 2 A, SV = 55 volt dan WF = 12 mm/min dan maksimum pada AoT = 5 A, SV = 37 Volt dan WF = 7 mm/min. Dari Tabel 9 terlihat bahwa nilai minimum rata-rata (*mean*) lebar pemotongan (*kerf*) adalah 345.074 μm. Hal ini bermakna jika variabel-variabel proses WEDM diatur pada AoT = 2 A, SV = 55 volt dan WF = 12 mm/min maka rata-rata (*mean*) lebar pemotongan (*kerf*) adalah 345.074 μm.

Tabel 10. Statistik *fits* nilai lebar pemotongan (*kerf*)

Variable	Standar			
	Mean	Deviasi	Minimum	Maksimum
FITS	361.48	8.04	345.074	374.96

Penelitian ini menggunakan pendekatan yang berbeda dalam menganalisis hubungan antara proses WEDM dengan karakteristik hasil proses WEDM, yang dalam hal ini adalah lebar pemotongan (*kerf*). Pendekatan dengan analisis statistika tidak melalui metode seperti teknik Taguchi-grey fuzzy, GRA dan RSM seperti yang dilakukan dalam penelitian [1] - [10]. Hasil ANOVA yang diperoleh setelah penggunaan metode Taguchi-grey fuzzy mempunyai kemungkinan tidak memberikan derajat bebas untuk *Source Error* seperti pada penelitian [5]. Metode Taguchi-grey fuzzy pada penelitian ini lebih pada mengkaji hasil konfirmasi eksperimen yang dapat menjelaskan optimasi kualitas multi respon pada proses WEDM baja AISI O1.

Dalam penelitian ini dilakukan prosedur untuk penyusunan model yang memenuhi konsep dasar dan asumsi dalam model rancangan faktorial dengan tiga faktor, dimana masing-masing faktor terdiri dari 3 taraf/level. Berdasarkan konsep tersebut diperoleh model yang menyatakan hubungan antara variabel-variabel proses WEDM *arc on time* (AoT), *servo voltage* (SV) dan *wire feed* (WF) dengan lebar pemotongan (*kerf*). Dari model ini dapat diestimasi nilai minimum rata-rata (*mean*) dari lebar pemotongan (*kerf*) pada proses pemotongan

menggunakan mesin WEDM tipe CHMER 32GS terhadap baja AISI O1 dengan kekerasan 52-57 HRC.

Jika memerlukan analisis lebih lanjut, model juga dapat menentukan selang kepercayaan untuk rata-rata (*mean*) variabel respon pada kombinasi tertentu dari variabel-variabel proses WEDM. Hal ini merupakan tujuan utama dari statistika inferensi yaitu penentuan suatu selang yang diyakini memuat nilai rata-rata (*mean*) dari variabel respon.

V. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini diperoleh bahwa model yang sesuai dengan data penelitian adalah model yang mengandung faktor-faktor utama yaitu variabel-variabel proses WEDM *arc on time* (AoT), *servo voltage* (SV) dan *wire feed* (WF), serta interaksi SV dan WF. Dari hasil analisis statistika terhadap hubungan antara lebar pemotongan (*kerf*) dengan variabel-variabel proses WEDM AoT, SV dan WF terhadap data penelitian ini diperoleh bahwa lebar pemotongan (*kerf*) minimum terjadi pada AoT = 2 A, SV = 55-volt dan WF = 12 mm/min dengan nilai rata-rata (*mean*) lebar pemotongan (*kerf*) adalah 345.074 μ m.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemristek DIKTI yang telah memberikan dana hibah peneliti dosen pemula melalui surat keputusan nomor 0045/E3/LL/2016 dan surat keputusan 39/KP/LPKT-ITI/III/2018, Institut Teknologi Indonesia dan penulis juga mengucapkan terima kasih kepada BPPT BT MEPPPO dan Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia.

REFERENSI

- [1] D. H. Gajjar and J. V. Desai, Optimization of MRR, surface roughness and kerf width in wire EDM using molybdenum wire, *International Journal for Research in Education (IJRE)*, ICV: 6.30, Vol. 4, Issue: 2, February 2015, ISSN (P): 2347-5412 ISSN (O): 2320-091X, 2015.
- [2] Md. E. Asgar and A. K. S. Singholi, Parameter study and optimization of WEDM process: A Review, *ICCMRE 2018. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 404 (2018) 012007.
- [3] GT-PRO Workshop, Mesin EDM, 2019. Website: http://gt-proworkshop.com/catalog/detail/289_mesin_edm/33_mesin, diakses pada tanggal 14 Januari 2022.
- [4] F. Bisono dan A. P. Dhika, Optimasi multirespon *wire electrical discharge machining* untuk pengerjaan *punch and dies bracket* kapal aluminium, *Jurnal Energi dan Manufaktur*, Vol. 12 No. 2, Oktober 2019, 107-113.
- [5] F. Sepuereo, Optimasi laju pengerjaan bahan (LPB) dan kekasaran permukaan pada proses *wire-electric discharge machining* material SKD-11 dengan metode taguchi dan logika *fuzzy*, *Skripsi S1. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya*, 2012.
- [6] P. Rupajati, P. Samosir P, M. K. Rasyid, Optimasi ketebalan lapisan recast, kekasaran permukaan dan laju pengerjaan material pada proses pemesinan wire-edm menggunakan metode taguchi-*grey fuzzy*, *Jurnal Simetris*, Vol. 9 No. 2, November 2018, P-ISSN: 2252-4983, E-ISSN: 2549-3108.
- [7] K. Pawan, M. Gupta, A. Kumar dan S. Sangwan. State of art research trends in wire-cut electric discharge machining (WEDM), *Journal of Critical Reviews*, ISSN-2394-5125 Vol. 7, Issue 19, 2020, pp. 2702 – 2723.
- [8] K. Ishfaq, N. Ahmad, M. Jawad, M. A. Ali and A. M. Al-Alhmari, Evaluating material's interaction in wire electrical discharge machining of stainless steel (304) for simultaneous optimization of conflicting responses, *Materials*, 2019, 12, 1940; Available: www.mdpi.com/journal/materials
- [9] S. Habib, Optimization of machining parameters and wire vibration in wire electrical discharge machining process, *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, DOI 10.1186/s40759-017-0017-1.
- [10] O. A. Setiawan, D. Djumhariyanto dan S. Mulyadi, Optimasi parameter pemesinan *wire electric discharge machining* baja perkakas SKD 11 menggunakan metode Taguchi, *Jurnal ROTOR*, Volume 11 Nomor 2, November 2018, hal. 37–42.
- [11] P. Gupta, R. Khanna, R. D. Gupta and N Sharma, Effect of process parameters on kerf width in WEDM for HSLA using response surface methodology, *Journal of Engineering & Technology*. 2 (1), 2012, pp 1–6.
- [12] R. K. Sembiring, *Analisis Regresi*, Penerbit ITB Bandung, hlm. 261 – 283, 1995.
- [13] R. E. Walpole dan R. H. Myers, *Ilmu Peluang dan Statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan*, edisi ke-4, Penerbit ITB Bandung, hlm. 606 – 645, 1995.
- [14] W. Mendenhall, and T. Sincich, *A Second Course in Statistics: Regression Analysis*, Seventh Edition, Pearson Education, Inc., 608 – 668, 2012.