



**OPTIMASI PARAMETER PERMESINAN PADA *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (EDM) BAJA PERKAKAS AISI P20 MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-FUZZY**

**SKRIPSI**

Oleh

**Haris Naqihul Adib  
NIM 141910101050**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**



**OPTIMASI PARAMETER PERMESINAN PADA *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (EDM) BAJA PERKAKAS AISI P20 MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-FUZZY**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

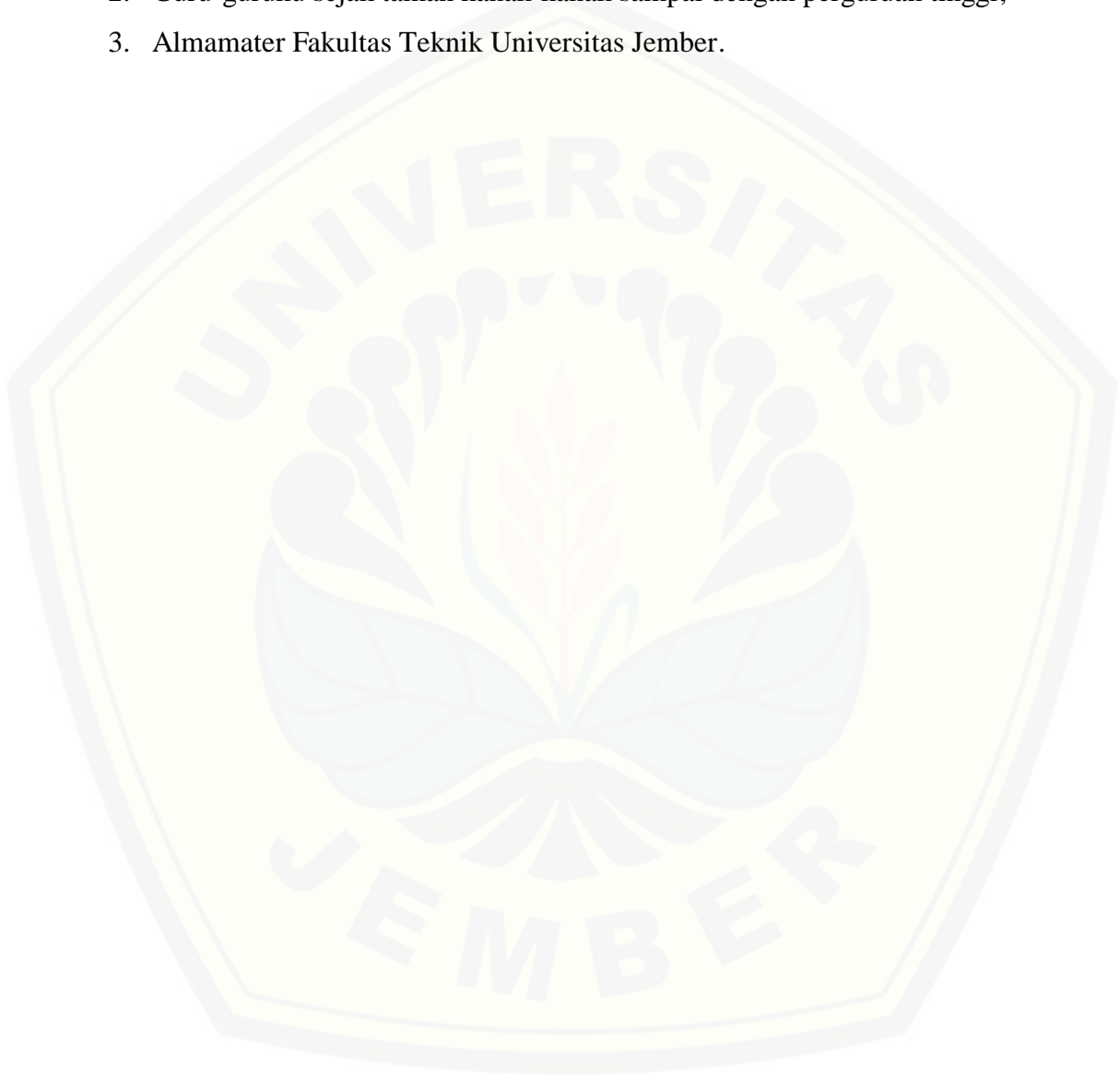
**Haris Naqihul Adib  
NIM 141910101050**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Lisfaridah dan keluarga besar Mas Wangni yang tercinta;
2. Guru-guruku sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi;
3. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.



## MOTO

Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.  
(terjemahan Surat *Al-Mujadalah* ayat 11)<sup>\*)</sup>

Tiada suatu usaha yang besar akan berhasil tanpa dimulai dari usaha yang kecil.<sup>\*\*)</sup>



---

<sup>\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT. Kumudasmoro Grafindo.

<sup>\*\*)</sup> Joeniarto, 1967 dalam Mulyono, E. 1988. *Beberapa permasalahan Implementasi Konversi Keanekaragaman Hayati dalam Pengelolaan Taman Nasional Meru Betiri*. Tesis Magister Universitas Jember, tidak dipublikasikan.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Haris Naqihul Adib

NIM : 141910101050

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Optimasi Parameter Permesinan Pada *Electrical Discharge Machining* (EDM) Baja Perkakas AISI P20 Menggunakan Metode Taguchi-*Fuzzy*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 04 Agustus 2018

Yang menyatakan,

Haris Naqihul Adib

141910101050

**SKRIPSI**

**OPTIMASI PARAMETER PERMESINAN PADA *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (EDM) BAJA PERKAKAS AISI P20 MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-FUZZY**

Oleh  
Haris Naqihul Adib  
NIM 141910101050

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. R. Koekoeh K. W., S.T., M.Eng.  
Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Ahmad Syuhri, M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Optimasi Parameter Permesinan Pada *Electrical Discharge Machining* (EDM) Baja Perkakas AISI P20 Menggunakan Metode Taguchi-*Fuzzy*” karya Haris Naqihul Adib telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Kamis, 16 Agustus 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

**Tim Pembimbing:**

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

Dr. R. Koekoeh K. W., S.T., M.Eng.

Ir. Ahmad Syuhri, M.T.

NIP 196707081994121001

NIP 196701231997021001

**Tim Penguji:**

Penguji I,

Penguji II,

Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T.

Santoso Mulyadi, S.T., M.T.

NIP 196709241994121001

NIP 127002281997021001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.

NIP 196612151995032001



## RINGKASAN

**Optimasi Parameter Permesinan pada *Electrical Discharge Machining* (EDM) Baja Perkakas AISI P20 Menggunakan Metode Taguchi-Fuzzy;** Haris Naqihul Adib, 141910101050; 2018: 104 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Manufaktur adalah suatu kegiatan ekonomi yang melakukan kegiatan mengubah suatu barang dasar secara mekanis, kimia, atau dengan tangan sehingga menjadi barang jadi atau setengah jadi, dan atau barang yang kurang nilainya menjadi barang yang lebih tinggi nilainya dan sifatnya. Sektor industri manufaktur merupakan komponen utama dalam pembangunan ekonomi nasional. Berdasarkan kontribusi *output* sektor industri manufaktur selama periode Triwulan I-III Tahun 2017 berkisar 20 persen, menunjukkan bahwa sektor industri manufaktur menjadi *leading sector* yang memberikan sumbangan terbesar terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) dibanding sektor lainnya.

Proses permesinan non-konvensional EDM digunakan untuk memotong material yang mempunyai kekerasan tinggi seperti *tool steel* dan untuk mengerjakan produk-produk dengan bentuk permukaan yang kompleks sehingga membutuhkan waktu permesinan yang cukup lama. Oleh karena itu, diperlukan cara pengaturan parameter permesinan dan level yang benar sehingga didapatkan kombinasi hasil laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh parameter permesinan *tool lift time*, *pulse current*, *pulse on time*, dan *pulse off time* terhadap: (1) pengaruh variasi parameter permesinan terhadap laju pembuangan material dan ketelitian ukuran, (2) menentukan pengaturan parameter permesinan yang tepat agar dihasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal, (3) mengetahui berapa harga laju pembuangan material dan ketelitian ukuran optimal yang dapat dicapai. Hasil penelitian diharapkan dapat diaplikasikan oleh operator UPT Industri Logam dan Perekayasaan Sidoarjo sehingga waktu permesinan dapat semaksimal mungkin tanpa mengurangi kualitas produk.



Penelitian ini dilaksanakan di UPT Industri Logam dan Perekayasaan Sidoarjo jalan Raya Trosobo Km 20 Taman-Sidoarjo Jawa Timur pada bulan Mei 2018. Penelitian ini meliputi dua pengambilan data yaitu laju pembuangan material (MRR) dan ketelitian ukuran (*overcut*). Penelitian disusun menurut rancangan percobaan Taguchi berdasarkan matrik ortogonal L18 ( $2^1 \times 3^3$ ) dengan pengulangan sebanyak 2 kali. Sedangkan metode optimasi yang digunakan adalah logika *fuzzy*.

Kontribusi parameter permesinan dalam meningkatkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran secara signifikan dipengaruhi oleh parameter permesinan yaitu *pulse current* sebesar 79,3%, *pulse on time* sebesar 10,3%, *pulse off time* sebesar 3,0%, dan *tool lift time* sebesar 2,6%. Kondisi untuk menghasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal dicapai pada *tool lift time* level 1 (3 s), *pulse current* level 3 (6 A), *pulse on time* level 2 (600  $\mu$ s), dan *pulse off time* level 1 (3  $\mu$ s). Kombinasi parameter permesinan dan level tersebut menghasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran secara berurutan yaitu sebesar 49,597 mm<sup>3</sup>/min dan 0,350 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar nilai *pulse current* diikuti *pulse on time* yang tinggi mengakibatkan respons laju pembuangan material semakin meningkat. Sedangkan semakin kecil nilai *pulse current* dan *pulse on time* akan mengakibatkan ketelitian ukuran semakin meningkat, artinya diperoleh nilai yang optimum.

Hasil penelitian secara umum menunjukkan bahwa dengan bertambahnya *pulse current* maka laju pembuangan material akan semakin besar. Hal ini disebabkan karena bertambahnya intensitas loncatan bunga api listrik akibat peningkatan energi mengakibatkan aksi pelelehan dan penguapan material yang tinggi sehingga kawah-kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja akan semakin dalam dan meningkatkan laju pembuangan material dan menurunkan ketelitian ukuran.

**SUMMARY**

***Optimization of Machining Parameters on Electrical Discharge Machining (EDM) AISI P20 Tool Steel Using Taguchi-Fuzzy Method; Haris Naqihul Adib, 141910101050; 2018: 104 pages; the Mechanical Department, the Faculty of engineering, Jember University.***

*Manufacturing is an economic activity that carries out the activity of changing a basic item mechanically, chemically, or by hand so that it becomes finished or semi-finished goods, and or an item that has less value becomes an item of higher value and nature. The manufacturing industry sector is a major component in national economic development. Based on the contribution of the manufacturing sector's output during the Quarter I-III Quarter of 2017, it was around 20 percent, indicating that the manufacturing industry sector was the leading sector that contributed the most to Gross Domestic Product (GDP) compared to other sectors.*

*The non-conventional machining process of EDM is used to cut materials that have high hardness such as tool steel and to work on products with complex surface shapes that require a long machining time. Therefore, it is necessary machining parameters and how to set the correct level to obtain a combination of the results of the material removal rate and overcut of the optimal size. The purpose of this study was to determine the effect of machining parameters tool lift time, pulse current, pulse on time, and pulse off time on: (1) the effect of machining parameter variations on material removal rate and overcut, (2) determine the appropriate machining parameter settings produced optimal material removal rate and overcut, (3) Determines how much optimal material removal rate and overcut can be achieved. The results of the study are expected to be applied by operators of the UPT metal industry and engineering of Sidoarjo so that the time of machining can be as fast as possible without reducing product quality.*

*This research was carried out at the UPT metal industry and engineering of Sidoarjo highway Trosobo Km 20 Taman-Sidoarjo, East Java in May 2018. This*

*study included two data retrieval, namely the material removal rate (MRR) and overcuts. The study was arranged according to Taguchi experiment design based on orthogonal matrix L18 ( $2^1 \times 3^3$ ) with repetition 2 times. While the optimization method used is fuzzy logic.*

*The contribution of the machining parameters in increasing the material removal rate and overcut is significantly affected by the machining parameter which is pulse current which is 79.3%, pulse on time is 10.3%, pulse off time is 3.0%, and the tool lift time is 2.6%. The conditions for generating optimal material removal rate and overcut measures are achieved at the tool lift time level 1 (3 s), pulse current level 3 (6 A), pulse on time level 2 (600  $\mu$ s), and pulse off time level 1 (3  $\mu$ s). The results of combination of machining parameters and levels for material removal rate and overcut was 49,597 mm<sup>3</sup> / min and 0,350 mm. The results showed that the greater the value of pulse current followed by high pulse on time, the response to the material removal rate increased. Whereas the smaller the value of pulse current and pulse on time will cause the overcut to increase, meaning that the optimum value is obtained.*

*The results of the study generally show that with increasing pulse current the material removal rate will be even greater. This is because the increasing intensity of electric spark jumps due to increased energy results in high melting and evaporation of materials so that the craters formed on the surface of the workpiece will deepen and increase the material removal rate and decrease overcut.*

## PRAKATA

Alhamdulillah rabbil'aalamin, segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang Maha Penyayang. Atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Optimasi Parameter Permesinan Pada *Electrical Discharge Machining* (EDM) Baja Perkakas AISI P20 Menggunakan Metode Taguchi-*Fuzzy*". Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. R. Koekoeh K. W., S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Ir. Ahmad Syuhri, M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian pada skripsi ini;
2. Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I, dan Santoso Mulyadi, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran bersifat konstruktif untuk penyusunan skripsi ini;
3. UPT Industri Logam dan Perakayasaan Sidoarjo yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk dapat melaksanakan penelitian;
4. Ibunda Lisfaridah dan keluarga besar Mas Wangni yang telah memberikan dorongan dan doanya demi terselesaikannya skripsi ini;
5. Teman-teman Teknik Mesin 2014 yang telah memberikan semangat;
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 05 Agustus 2018

Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>SUMMARY</b> .....	x
<b>PRAKATA</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xviii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xix
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	5
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	5
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	5
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	6
<b>1.6 Hipotesis</b> .....	6
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
<b>2.1 <i>Electrical Discharge Machining (EDM)</i></b> .....	7
<b>2.2 <i>Ram Electrical Discharge Machining</i></b> .....	8
2.2.1 Mekanisme Pembuangan pada <i>Ram</i> EDM.....	9
2.2.2 Parameter Utama pada <i>Ram</i> EDM.....	11



2.3	Jenis-jenis Pahat EDM (Elektroda) .....	12
2.4	Cairan Dielektrik.....	12
2.5	Pembilasan Geram ( <i>Flushing</i> ).....	13
2.6	Ketelitian Ukuran ( <i>Overcut</i> ) .....	14
2.7	Laju Pembuangan Material.....	15
2.8	Desain Eksperimen .....	16
2.8.1	Metode Taguchi.....	16
2.8.2	Rancangan Percobaan Taguchi.....	17
2.9	Uji Asumsi Residual .....	25
2.10	Metode Taguchi- <i>fuzzy</i> .....	25
2.11	Interpretasi Hasil Percobaan.....	29
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>31</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	31
3.2	Alat dan Bahan .....	31
3.2.1	Alat .....	31
3.2.2	Bahan .....	33
3.2.3	Hasil Optimasi .....	45
3.2.4	Analisis Variansi dan Persentase Kontribusi.....	45
3.3	Langkah-langkah Percobaan .....	47
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	48
<b>BAB 4. PEMBAHASAN .....</b>		<b>50</b>
4.1	Data Hasil Percobaan.....	50
4.2	Perhitungan Rasio S/N.....	51
4.3	Normalisasi Rasio S/N.....	52
4.4	<i>Fuzzification</i> .....	53
4.5	Penentuan <i>Fuzzy Rules</i> .....	54
4.6	<i>Defuzzification</i> .....	55
4.7	Hasil Optimasi .....	56
4.8	Analisis Variansi dan Persentase Kontribusi.....	58

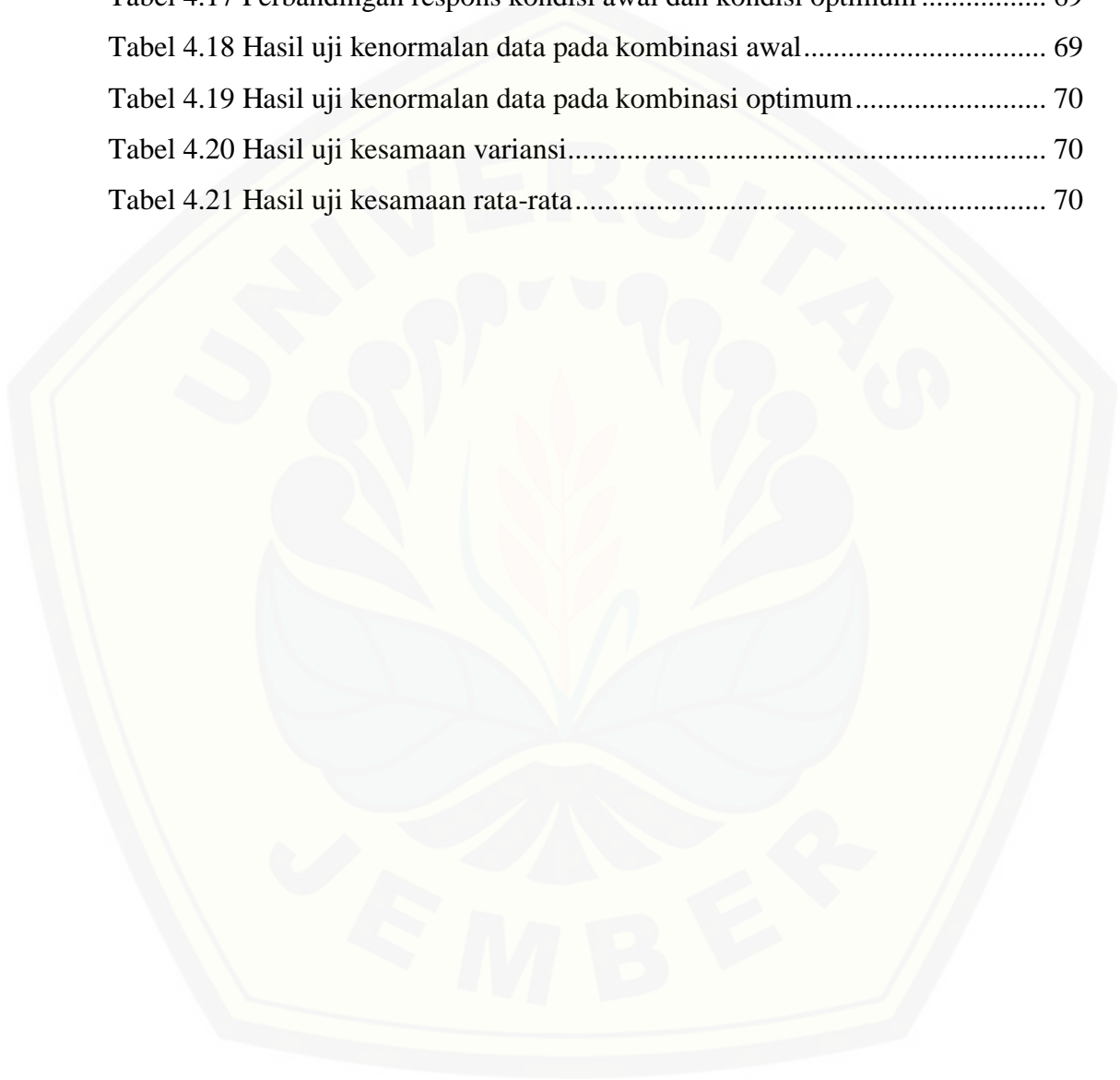
<b>4.9 Pengujian Asumsi Residual</b> .....	61
4.9.1 Uji Independen .....	61
4.9.2 Uji Homogenitas .....	62
4.9.3 Uji Kenormalan .....	63
<b>4.10 Prediksi Respons Optimum</b> .....	64
<b>4.11 Percobaan Konfirmasi</b> .....	65
<b>4.12 Perbandingan antara Respons Hasil Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum</b> .....	67
<b>4.13 Pembahasan</b> .....	71
4.13.1 Pengaruh Parameter permesinan Terhadap Multi Respons	71
4.13.2 Pengaruh Parameter permesinan Terhadap Respons Individu .....	72
4.13.3 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya .....	74
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	71
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	71
<b>5.2 Saran</b> .....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	77
<b>LAMPIRAN</b> .....	81



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 2.1 Matriks Ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ .....	20
Tabel 2.2 Tabel Analisis Variansi (ANOVA).....	22
Tabel 2.3 Penempatan Rasio S/N.....	27
Tabel 3.1 Spesifikasi mesin EDM.....	31
Tabel 3.2 Komposisi kimia baja AISI P20.....	34
Tabel 3.3 Sifat mekanik baja AISI P20.....	34
Tabel 3.4 Parameter permesinan dan level yang digunakan.....	36
Tabel 3.5 Total derajat kebebasan parameter permesinan.....	36
Tabel 3.6 Rancangan percobaan matriks ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ .....	37
Tabel 3.7 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ pengulangan pertama	37
Tabel 3.8 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ pengulangan kedua ...	38
Tabel 3.9 Data hasil penelitian.....	39
Tabel 3.10 Data rasio S/N.....	41
Tabel 3.11 Data normalisasi rasio S/N.....	42
Tabel 3.12 <i>Fuzzy rules</i> .....	44
Tabel 3.13 <i>Multi response performance indeks</i> (MRPI).....	44
Tabel 4.1 Data hasil percobaan.....	50
Tabel 4.2 Data rasio S/N.....	51
Tabel 4.3 Data normalisasi rasio S/N.....	52
Tabel 4.4 <i>Fuzzy rules</i> .....	55
Tabel 4.5 <i>Multi response performance indeks</i> (MRPI).....	56
Tabel 4.6 Rata-rata nilai MRPI untuk setiap level parameter permesinan.....	57
Tabel 4.7 Kombinasi parameter permesinan respons optimum.....	58
Tabel 4.8 Hasil ANOVA dan kontribusi parameter permesinan pada MRPI.....	59
Tabel 4.9 Kondisi hipotesis nol multi respons.....	61
Tabel 4.10 Hasil respons percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum.....	65
Tabel 4.11 Rasio S/N percobaan konfirmasi kombinasi optimum.....	65
Tabel 4.12 MRPI percobaan konfirmasi untuk kombinasi optimum.....	66

Tabel 4.13 Pengaturan kombinasi awal .....	68
Tabel 4.14 Data percobaan kombinasi awal .....	68
Tabel 4.15 Rasio S/N kombinasi awal .....	68
Tabel 4.16 Perbandingan MRPI kondisi awal dan kondisi optimum .....	69
Tabel 4.17 Perbandingan respons kondisi awal dan kondisi optimum .....	69
Tabel 4.18 Hasil uji kenormalan data pada kombinasi awal.....	69
Tabel 4.19 Hasil uji kenormalan data pada kombinasi optimum.....	70
Tabel 4.20 Hasil uji kesamaan variansi.....	70
Tabel 4.21 Hasil uji kesamaan rata-rata.....	70



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Klasifikasi proses permesinan EDM .....	8
Gambar 2.2 Skema proses permesinan <i>Ram</i> EDM .....	8
Gambar 2.3 Pembentukan bunga api listrik .....	9
Gambar 2.4 Pembangkitan tegangan dan arus listrik .....	9
Gambar 2.5 Proses pembuangan material .....	10
Gambar 2.6 Proses pembilasan geram .....	10
Gambar 2.7 Metode <i>flushing</i> .....	14
Gambar 2.8 Skema ketelitian ukuran .....	15
Gambar 2.9 Fungsi keanggotaan kurva segitiga .....	28
Gambar 3.1 Mesin <i>Ram</i> EDM .....	32
Gambar 3.2 Dimensi Elektroda .....	33
Gambar 3.3 Dimensi benda kerja .....	34
Gambar 3.4 Pengukuran diameter ketelitian ukuran .....	39
Gambar 3.5 Grafik fungsi keanggotaan .....	43
Gambar 3.6 Grafik fungsi keanggotaan untuk MRPI .....	43
Gambar 3.7 Diagram alir metode penelitian .....	48
Gambar 4.1 Grafik fungsi keanggotaan untuk MRR dan <i>overcut</i> .....	53
Gambar 4.2 Grafik fungsi keanggotaan untuk MRPI .....	54
Gambar 4.3 Ilustrasi <i>fuzzy rules</i> .....	55
Gambar 4.4 Plot nilai MRPI masing-masing level parameter permesinan .....	57
Gambar 4.5 Plot ACF .....	62
Gambar 4.6 Plot uji identik .....	62
Gambar 4.7 Plot uji distribusi normal .....	63
Gambar 4.8 Plot rata-rata percobaan konfirmasi dan interval keyakinan prediksi .....	67
Gambar 4.9 Grafik persentase kontribusi parameter permesinan .....	71

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 6.1 Data spesifikasi mesin EDM .....	81
Lampiran 6.2 Data waktu proses pemotongan .....	82
Lampiran 6.3 Data lebar pemotongan .....	83
Lampiran 6.4 Hasil percobaan konfirmasi kombinasi optimal .....	84
Lampiran 6.5 Analisis individu laju pembuangan material (MRR).....	85
Lampiran 6.6 Analisis individu ketelitian ukuran ( <i>overcut</i> ) .....	86
Lampiran 6.7 Pengujian residual laju pembuangan material (MRR) .....	87
Lampiran 6.8 Pengujian residual ketelitian ukuran ( <i>overcut</i> ).....	89
Lampiran 6.9 Uji kesamaan rata-rata MRR kombinasi awal dan optimum.....	91
Lampiran 6.10 Uji kesamaan rata-rata <i>overcut</i> kombinasi awal dan optimum.....	94
Lampiran 6.11 Tabel F statistik .....	97
Lampiran 6.12 Tabel nilai kritis uji Kolmogorov-Smirnov .....	98
Lampiran 6.13 Surat keterangan penelitian .....	99
Lampiran 6.14 Sertifikat material baja perkakas AISI P20 .....	100
Lampiran 6.15 Alat dan bahan penelitian .....	101
Lampiran 6.16 Proses pelaksanaan penelitian .....	102
Lampiran 6.17 Hasil penelitian .....	104

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Manufaktur merupakan proses mengubah bahan mentah menjadi bahan jadi yang memiliki nilai jual dengan mengaplikasikan mesin, peralatan dan tenaga kerja (Kalpakjian dan Schmid, 2009). Sektor industri manufaktur merupakan komponen utama dalam pembangunan ekonomi nasional. Berdasarkan kontribusi *output* sektor industri manufaktur selama periode Triwulan I-III Tahun 2017 berkisar 20 persen, menunjukkan bahwa sektor industri manufaktur menjadi *leading sector* yang memberikan sumbangan terbesar terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) dibanding sektor lainnya. Sektor ini juga memberikan kontribusi ekonomi yang besar dalam transformasi struktur ekonomi bangsa dari sektor pertanian ke arah sektor industri (Badan Pusat Statistik, 2017). Terdapat berbagai macam industri manufaktur salah satunya adalah industri dibidang proses permesinan.

Proses permesinan adalah proses pemotongan atau pembuangan sebagian bahan yang bertujuan untuk membentuk produk yang diinginkan (Widarto, 2008). Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi menuntut ahli permesinan menciptakan maupun memperbaiki metode yang telah ada untuk menghasilkan produk yang lebih baik sehingga proses permesinan konvensional semakin ditinggalkan dan beralih menuju non-konvensional. Perbedaan antara proses konvensional dan non-konvensional adalah pada pahat yang digunakan di mana pada proses non-konvensional menggunakan energi mekanik, termal, elektrik, dan kimia. Salah satu proses permesinan non-konvensional adalah *Electrical discharge Machining* (EDM).

Proses permesinan non-konvensional EDM digunakan untuk memotong material yang mempunyai kekerasan tinggi seperti *tool steel* dan *advance material* (*super alloys*, keramik, dan komposit matriks) yang prinsip kerjanya dengan memanfaatkan hasil erosi akibat loncatan elektron yang berupa bunga api listrik antara elektroda dan benda kerja. Dewasa ini EDM banyak diaplikasikan pada industri-industri *aerospace*, otomotif, nuklir, medis dan pembuatan *die-mould*. Global industry analysts, Inc., USA. Memprediksi pertumbuhan pasar EDM



mencapai 910 juta dolar selama empat tahun ke depan. Salah satu *tool steel* yang sering digunakan dalam industri manufaktur adalah baja perkakas AISI P20.

Baja perkakas AISI P20 adalah baja yang memiliki *tensile strenght* yang tinggi sehingga tahan terhadap puntiran dan tarikan, sifat mampu mesin dan sifat tahan aus yang baik. Tingkat kekerasan baja perkakas AISI P20 dapat meningkat setelah mendapatkan perlakuan panas mencapai 51 HRC. Pada umumnya baja ini digunakan sebagai *Injection moulds for thermoplasctics, extrusion dies for thermoplastics, blow moulds, forming tools, press-brake dies, aluminium die casting prototype dies, structural components, dan shafts*. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari kinerja proses permesinan EDM seperti laju pembuangan material (MRR) dan ketelitian ukuran (*overcut*) perlu di perhatikan bagaimana pengaturan parameter permesinan proses EDM.

Kinerja dari proses permesinan EDM untuk mendapatkan hasil laju pembuangan material dan ketelitian ukuran optimal dipengaruhi oleh beberapa parameter permesinan seperti *peak current/discharge current, voltage, polarity, pulse on time, pulse off time, type of dielectric* dan lain sebagainya. Laju pembuangan material berkaitan erat dengan laju produksi serta harga proses permesinan. Sedangkan, ketelitian ukuran adalah persesuaian antara hasil pengukuran dengan harga yang dianggap benar dari objek yang diukur.

UPT Industri Logam dan Perakayasaan Sidoarjo merupakan unit yang memberikan pelayanan teknis kepada masyarakat. Beberapa pelayanan teknis antara lain pelayanan teknis permesinan, pelatihan dan pembinaan industri logam, perakayasaan serta pembinaan kawasan lingkungan industri kecil. Salah satu mesinnya adalah HSIU FONG tipe ED-252 yang merupakan salah satu mesin EDM yang digunakan untuk membuat *injection moulds*. UPT Industri Logam dan Perakayasaan Sidoarjo membutuhkan waktu permesinan yang cukup lama dikarenakan laju pembuangan material yang rendah yaitu  $12,913 \text{ mm}^3/\text{min}$  dan ketelitian ukuran yang diperoleh kurang lebih  $0,363 \text{ mm}$ . Oleh karena itu, perlu dilakukan optimalisasi untuk meningkatkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran.

Penelitian pada proses EDM dengan parameter respons ketelitian ukuran telah dilakukan dengan menggabungkan metode *response surface* dan logika *fuzzy* pada baja perkakas AISI P20 (Dewangan dkk., 2014). Parameter permesinan yang digunakan adalah *pulse current*, *pulse on time*, *tool work time*, dan *tool lift time* yang masing-masing memiliki tiga level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai *pulse current* dan *pulse on time* menurunkan ketelitian ukuran. Sedangkan semakin tinggi nilai *tool lift time* meningkatkan ketelitian ukuran. Kombinasi yang menghasilkan ketelitian ukuran paling kecil pada *pulse current* level 1 (1 A), *pulse on time* level 1 (10  $\mu$ s), dan , *tool work time* level 3 (1,0 s), dan *tool lift time* level 3 (1,5 s) yaitu sebesar 0,008 mm.

Penelitian tentang optimasi multi respons pada proses EDM dengan parameter respons laju pembuangan material dan ketelitian ukuran untuk mendapatkan hasil laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal (Prayogo dkk., 2016). Bahan yang digunakan adalah baja ST-42 dengan elektroda grafit berdiameter 22 mm. Metode optimasi yang digunakan adalah gabungan antara metode Taguchi dan *fuzzy logic*. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan parameter permesinan *pulse on time*, *pulse off time*, *discharge time*, dan *pulse current* yang masing-masing memiliki tiga level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontribusi dari parameter permesinan yang paling signifikan dalam meningkatkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran adalah *pulse current*, *pulse off time*, *pulse on time*, dan *Z down*. Kondisi optimal laju pembuangan material dan ketelitian ukuran dapat dicapai pada *pulse current* level 3 (60 A), *pulse on time* level 1 (30  $\mu$ s), *pulse off time* level 2 (20  $\mu$ s), dan *Z down* level 1 (2 s). Kombinasi tersebut menghasilkan laju pembuangan material dan laju keausan elektroda masing-masing sebesar 8,053 mm<sup>3</sup>/min dan 0,12 mm.

Studi tentang pengaruh jenis elektroda pada proses EDM yang bertujuan untuk mendapatkan hasil ketelitian ukuran yang optimal (Santoki, 2015). Metode yang digunakan adalah metode Taguchi. Bahan yang digunakan adalah AISI 304 *stainless steel* dengan tiga jenis elektroda yaitu tembaga, grafit dan perak berdiameter 10 mm. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan parameter permesinan *pulse current*, *pulse on time*, dan *pulse off time* yang masing-masing



memiliki tiga level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis elektroda yang paling cocok adalah elektroda tembaga diikuti peningkatan *pulse current* dan *pulse on time* berbanding terbalik dengan menurunnya ketelitian ukuran. Sedangkan semakin tinggi nilai *pulse off time* meningkatkan ketelitian ukuran. Kombinasi yang menghasilkan ketelitian ukuran paling kecil pada *pulse current* level 1 (4 A), *pulse on time* level 1 (5  $\mu$ s), dan *pulse off time* level 1 (4  $\mu$ s) yaitu sebesar 0,025 mm.

Studi tentang optimasi parameter respons laju pembuangan material dan laju keausan elektroda pada proses EDM yang bertujuan untuk mendapatkan hasil maksimal untuk laju pembuangan material dan minimal untuk laju keausan elektroda (Dewangan dan Biswas, 2013). Bahan yang digunakan adalah baja perkakas AISI P20 dengan elektroda tembaga berdiameter 30 mm. Metode optimasi yang digunakan adalah metode Taguchi dan *grey relation analysis*. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan parameter permesinan *pulse current*, *pulse on time*, *tool lift time*, *tool work time*, dan *inter electrode gap* yang masing-masing memiliki tiga level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *pulse on time* berbanding lurus dengan laju pembuangan material dan berbanding terbalik dengan laju keausan elektroda. Peningkatan *pulse current* dan *tool work time* berbanding lurus dengan kedua parameter respons dan semakin tinggi nilai *tool lift time* menurunkan laju pembuangan material. Kondisi optimal laju pembuangan material dan laju keausan elektroda dapat dicapai pada *pulse current* level 3 (8 A), *pulse on time* level 3 (500  $\mu$ s), dan *tool work time* level 3 (1,0 s), dan *tool lift time* level 1 (0,0 s). Kombinasi tersebut menghasilkan laju pembuangan material dan laju keausan elektroda masing-masing sebesar 10,4700 mm<sup>3</sup>/min dan 0,01091 mm<sup>3</sup>/min.

Berdasarkan evaluasi dari penelitian-penelitian sebelumnya tentang optimasi parameter permesinan pada proses EDM perlu dilakukan untuk menghasilkan respons laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal. Metode optimasi yang digunakan adalah metode Taguchi dan logika *fuzzy*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka didapatkan perumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimanakah pengaruh variasi parameter permesinan *tool lift time*, *pulse current*, *pulse on time*, dan *pulse off time* terhadap laju pembuangan material dan ketelitian ukuran pada proses permesinan EDM?
- b. Bagaimanakah menentukan pengaturan parameter permesinan yang tepat agar dihasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal pada proses permesinan EDM?
- c. Berapa harga laju pembuangan material dan ketelitian ukuran optimal yang dapat dicapai pada proses permesinan EDM?

## 1.3 Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian sebagai batasan masalah agar penelitian lebih fokus dan tidak keluar dari tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

- a. Tidak membahas sistem kontrol, rangkaian elektronika dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses permesinan.
- b. Tidak membahas kekasaran permukaan dan keausan elektroda.
- c. Tidak membahas komponen biaya pada proses permesinan.
- d. Tidak membahas perubahan struktur mikro benda kerja hasil permesinan.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah di atas adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui pengaruh variasi parameter permesinan *tool lift time*, *pulse current*, *pulse on time*, dan *pulse off time* terhadap laju pembuangan material dan ketelitian ukuran pada proses permesinan EDM;
- b. Menentukan pengaturan parameter permesinan yang tepat agar dihasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal pada proses permesinan EDM;

- c. Mengetahui harga laju pembuangan material dan ketelitian ukuran optimal yang dapat dicapai pada proses permesinan EDM.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Memberikan wawasan guna meningkatkan ilmu pengetahuan tentang proses permesinan EDM;
- b. Dapat digunakan sebagai masukan bagi operator dalam melakukan pengaturan parameter permesinan EDM untuk menghasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal sehingga proses permesinan menjadi lebih singkat dan produk yang dihasilkan lebih presisi;
- c. Sebagai bahan referensi untuk penelitian sejenis dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi pada proses permesinan EDM.

### 1.6 Hipotesis

Hipotesis awal pada penelitian ini adalah kombinasi antara *pulse current* dan *pulse on time* yang tinggi serta *tool lift time* dan *pulse off time* yang rendah akan menghasilkan laju pembuangan material yang maksimal sedangkan untuk menghasilkan ketelitian ukuran yang maksimal kombinasi *pulse current* dan *pulse on time* yang rendah serta *tool lift time* dan *pulse off time* yang tinggi. Hal tersebut disebabkan karena nilai arus yang tinggi menyebabkan kenaikan intensitas loncatan bunga api listrik antara elektroda dan benda kerja sehingga cairan dielektrik terionisasi dengan cepat, dan akhirnya menyebabkan laju pembuangan material meningkat dan menurunkan ketelitian ukuran. Sedangkan nilai *tool lift time* dan *pulse off time* yang tinggi akan memperpendek durasi waktu terjadinya loncatan bunga api listrik sehingga ketelitian ukuran meningkat dan menurunkan laju pembuangan material.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

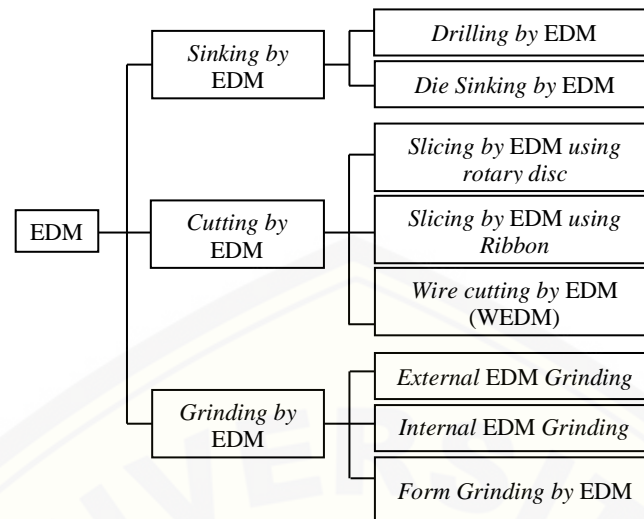
### 2.1 *Electrical Discharge Machining (EDM)*

Proses permesinan EDM merupakan salah satu proses permesinan non-konvensional yang menempati urutan ke empat metode paling banyak digunakan dalam dunia manufaktur. Salah satu faktor utama adalah EDM dapat mengerjakan pemotongan dengan cepat dengan memanfaatkan energi termal. Energi termal pada proses EDM berasal dari loncatan bunga api listrik akibat adanya perbedaan muatan antara elektroda dan benda kerja. Loncatan bunga api terjadi secara periodik terhadap waktu (Pandey dan Shan, 1980). Loncatan bunga api kemudian menyebabkan pelelehan lokal antara elektroda dan benda kerja sehingga kecepatan proses pemotongan bergantung pada temperatur leleh benda kerja itu sendiri. Hal ini yang membuat proses EDM mampu memotong material yang memiliki kekerasan dan kekuatan yang sangat tinggi yang tidak mampu dikerjakan dengan proses permesinan konvensional.

Beberapa keunggulan yang dimiliki proses permesinan EDM adalah sebagai berikut (Pandey dan Shan, 1980):

- a. Tidak terjadi kontak fisik sehingga benda kerja tidak mengalami *chatter* maupun deformasi mekanik.
- b. Mampu mengerjakan bentuk permukaan benda yang kompleks dengan kualitas permukaan yang sangat baik dan tingkat ketelitian yang tinggi.
- c. Dapat memotong benda kerja dengan kekerasan yang tinggi selama benda kerja bersifat konduktor.
- d. Hampir semua pekerjaan yang dilakukan pada proses permesinan dapat dikerjakan oleh proses ini.
- e. Distribusi kawah yang dihasilkan relatif kecil sehingga tidak akan menurunkan kekuatan benda kerja secara signifikan.
- f. Proses pengerjaan dapat di jalan secara otomatis menggunakan program CNC.

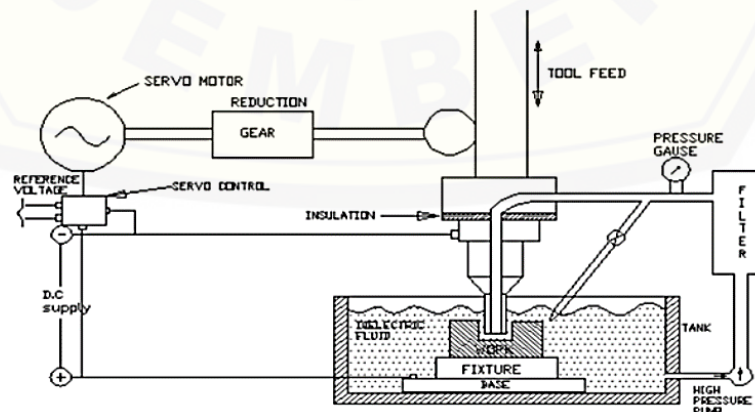
Proses permesinan EDM secara umum diklasifikasikan menjadi beberapa jenis seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1 Klasifikasi proses permesinan EDM (Sumber: Pandey dan Shan, 1980)

## 2.2 Ram Electrical Discharge Machining

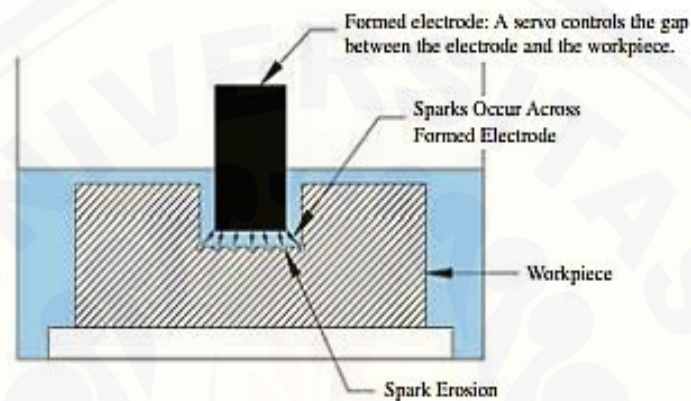
*Ram electrical discharge machining* atau sering disebut juga dengan konvensional EDM, *sinker EDM*, *Vertical EDM* dan *plunge EDM* yang sering digunakan untuk memproduksi *blind cavities*. Pada umumnya, cairan dielektrik mengalir melalui celah antara elektroda (biasanya dengan elektroda sebagai katode dan benda kerja sebagai anode), yang terhubung ke catu daya arus bolak-balik (DC) (Astakhov dan Outeiro, 2007). Proses pengurangan material benda kerja dilakukan oleh sejumlah loncatan bunga api listrik yang terjadi antara celah benda kerja dan elektroda. Bunga api listrik tersebut terjadi secara periodik terhadap waktu. Skema proses EDM ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema proses permesinan Ram EDM (Sumber: Dewangan, 2010)



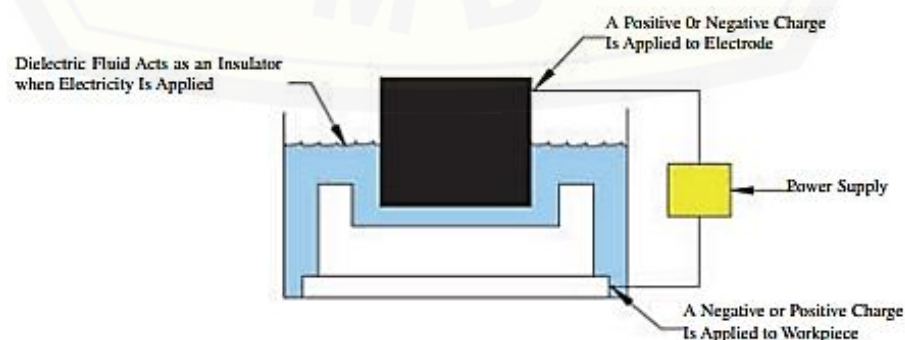
Pembentukan bunga api listrik pada proses Ram EDM diawali dengan pengisian beda potensial antara elektroda dan benda kerja, pada kondisi ini tidak ada arus listrik yang mengalir. Beda potensial yang terjadi antara benda kerja dan elektroda menyebabkan terjadinya medan listrik. Hal tersebut akan menyebabkan munculnya pergerakan ion positif dan elektron menuju kutub yang berlawanan. Dengan demikian terbentuklah saluran ion yang bersifat konduktor. Proses bunga api listrik pada proses Ram EDM ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pembentukan bunga api listrik (Sumber: Sommer, 2005)

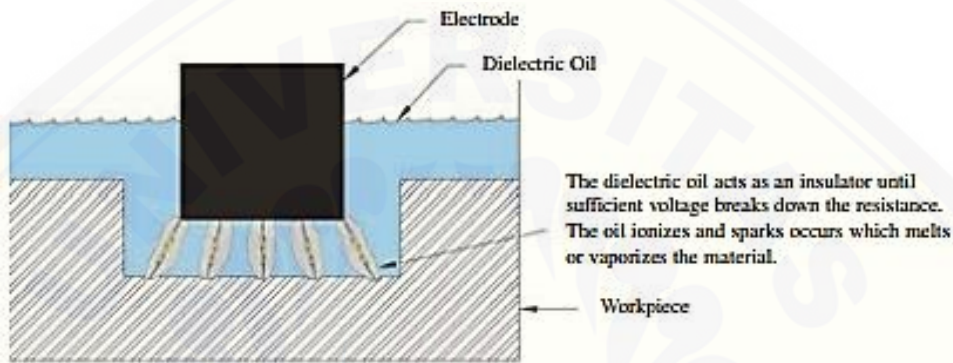
### 2.2.1 Mekanisme Pembuangan pada Ram EDM

Catu daya (*Power supply*) menyediakan arus listrik menuju elektroda dan benda kerja. pada umumnya, elektroda dihubungkan pada kutub negatif dan benda kerja pada kutub positif. Jarak (*gap*) antara elektroda dan benda kerja diatur oleh mekanisme servo yang terendam oleh cairan dielektrik. Minyak bertindak sebagai isolator yang memungkinkan arus cukup berkembang. Pembangkitan tegangan dan arus listrik pada proses Ram EDM ditunjukkan pada Gambar 2.4.



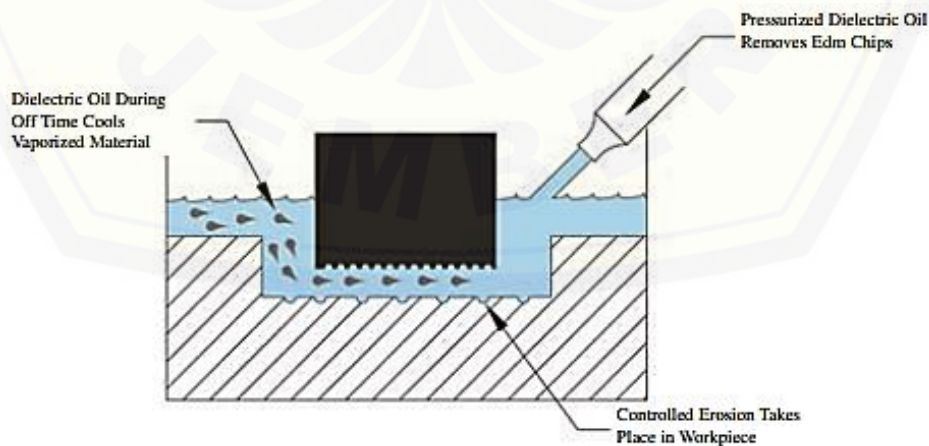
Gambar 2.4 Pembangkitan tegangan dan arus listrik (Sumber: Sommer, 2005)

Setelah listrik yang diaplikasikan pada elektroda dan benda kerja cukup, sifat isolasi minyak dielektrik turun, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Zona plasma terbentuk dengan cepat yang mencapai suhu sampai 14.500 °F hingga 22.000 °F (8.023,55 °C hingga 12.190,22 °C). Peningkatan termal tersebut menyebabkan cairan dielektrik mengion dan memungkinkan intensitas percikan yang cukup untuk melelehkan dan menguapkan benda kerja. Proses ini terjadi selama fase "*on time*" yang dikontrol dari catu daya.



Gambar 2.5 Proses pembuangan material (Sumber: Sommer, 2005)

Selama "*off time*", cairan dielektrik mendinginkan bahan yang menguap sementara cairan dielektrik bertekanan menghilangkan geram (*chip*) pada Ram EDM, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Jumlah Listrik selama "*on time*" menentukan kedalaman erosi benda kerja.



Gambar 2.6 Proses pembilasan geram (Sumber: Sommer, 2005)



### 2.2.2 Parameter Utama pada *Ram* EDM

Beberapa parameter utama pada proses permesinan *Ram* EDM yang berpengaruh terhadap laju pembuangan material dan ketelitian ukuran adalah sebagai berikut:

a. *Tool Lift Time* ( $T_{up}$ )

*Tool Lift Time* adalah lamanya waktu interval pengangkatan cekam elektroda dalam satuan detik. Parameter permesinan ini juga berpengaruh terhadap ketelitian ukuran yang dihasilkan.

b. *Pulse Current* ( $I_0$ )

*Pulse current* adalah besarnya arus yang digunakan selama proses permesinan. Nilai *pulse current* yang tinggi dapat mempercepat laju pembuangan material tetapi menghasilkan ketelitian ukuran yang kurang baik.

c. *Pulse on time* ( $T_{on}$ )

*Pulse on time* adalah durasi waktu ( $\mu s$ ) terjadinya loncatan bunga api berlangsung setiap siklus. Laju pembuangan material berbanding lurus dengan jumlah energi selama proses permesinan berlangsung. Jumlah energi tersebut sangat dipengaruhi oleh lamanya *pulse on time*.

d. *Pulse off time* ( $T_{off}$ )

*Off time* adalah jeda waktu antara loncatan bunga api. Nilai *off time* yang terlalu pendek dapat menyebabkan loncatan bunga api menjadi tidak stabil. Hal ini berpengaruh terhadap kecepatan permesinan dan stabilitas ketelitian ukuran.

e. *Spark Gap* ( $\delta$ )

*Spark gap* adalah jarak antara elektroda dan benda kerja yang diatur oleh mekanisme servo. Semakin kecil nilai *spark gap* semakin cepat proses pemotongan tetapi *gap* akan semakin kecil yang dapat menyebabkan *short circuit*.

f. *Duty Cyle* ( $\tau$ )

*Duty Cyle* merupakan persentase dari nilai *pulse on time* relatif dengan total waktu selama satu siklus. Parameter permesinan ini berpengaruh terhadap ketelitian ukuran di mana semakin tinggi nilai *duty cycle* maka ketelitian ukuran pun menjadi semakin kecil.

### 2.3 Jenis-jenis Pahat EDM (Elektroda)

Permesinan EDM memiliki keuntungan di mana benda kerja dengan kekerasan dan ketangguhan yang lebih tinggi dapat dikerjakan dengan material pahat yang memiliki kekerasan yang lebih rendah. Secara teoritis elektroda pada proses EDM bersifat konduktor. Dalam hal ini elektroda yang terbaik adalah material yang memiliki titik leleh yang tinggi dan tahanan listrik yang rendah (Darsin, 2006). Pada penelitian ini menggunakan elektroda tembaga karena elektroda tersebut yang digunakan di pabrik. Dalam memilih material elektroda perlu diperhatikan hal-hal sebagai berikut:

- a. Kemudahan material tersebut untuk dibentuk;
- b. Laju keausan dari material tersebut;
- c. Laju pengerjaan material sebesar mungkin;
- d. Pertimbangan ekonomis seperti harga dan ketersediaannya di pasaran.

Material elektroda yang dapat digunakan pada proses EDM dapat dikategorikan dalam tiga kelompok yaitu:

- a. Material elektroda dari logam
  - 1) Tembaga;
  - 2) Paduan tembaga: *Teliurium-copper*, *chromium-copper*, *Zinc-copper*, dan *wolfram-copper*;
  - 3) Paduan aluminium, silium;
  - 4) Kuningan;
  - 5) Tungsten;
  - 6) Baja.
- b. Material elektroda non logam
  - 1) Grafit.
- c. Kombinasi logam - non logam
  - 1) Tembaga-grafit.

### 2.4 Cairan Dielektrik

Cairan dielektrik memegang peranan yang sangat penting di dalam proses EDM, hal ini disebabkan karena fungsi yang dimiliki oleh fluida dielektrik tersebut.

Fluida yang sering digunakan dalam permesinan EDM yaitu air (Aqua-destilasi), minyak mineral, kerosin, dan lain-lain (Sulistiyawan, 2015). Pada penelitian ini menggunakan cairan dielektrik *esso LECTOR 40* karena cairan dielektrik tersebut yang digunakan di pabrik. Cairan dielektrik yang digunakan pada proses EDM memiliki fungsi sebagai berikut:

- a. Membawa geram-geram yang terbentuk pada proses tersebut;
- b. Dalam keadaan terionisasi, cairan dielektrik akan menjadi semacam konduktor sehingga memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik;
- c. Sebagai media pendingin antara pahat dan benda kerja.

Syarat dari cairan dielektrik agar dapat berfungsi pada proses EDM yaitu (Bagiasna, 1987):

- a. Tidak mudah terbakar;
- b. Sebagai media isolator sampai kebutuhan *break down voltage* tercapai;
- c. Tidak menghasilkan gelembung-gelembung gas yang berbahaya bagi operator;
- d. Mempunyai viskositas yang optimum;
- e. Harus memiliki sifat penghantar arus listrik yang baik.

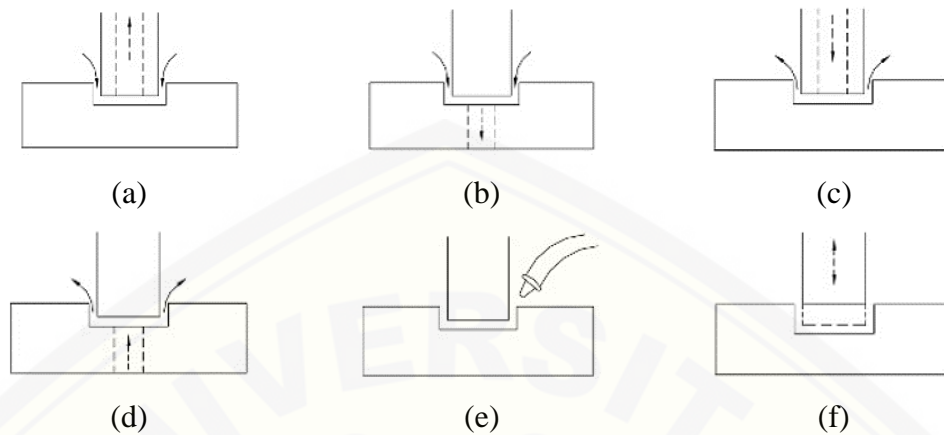
## 2.5 Pembilasan Geram (*Flushing*)

Pembilasan geram (*flushing*) adalah pembuangan geram yang dihasilkan saat proses permesinan pada EDM (Sommer, 2005). Proses ini dilakukan oleh cairan dielektrik yang mengalir dari dua buah nozel yang berada di bagian atas dan bawah benda kerja. Pembilasan geram yang tidak sempurna akan menyebabkan terjadinya penimbunan geram yang dihasilkan dan menurunkan efisiensi proses pengerjaan material. Akibat yang ditimbulkan apabila pada proses EDM tidak menggunakan *flushing* adalah:

- a. Terjadinya hubungan singkat antara elektroda dan benda kerja;
- b. Terjadinya busur api listrik yang dapat merusak benda kerja dan pahat;
- c. Loncatan bunga api listrik yang terjadi menjadi tidak teratur atau tidak normal.

Ada beberapa macam metode *flushing* yang dikenal, yaitu *pressure*, *suction*, *external*, dan *pulse flushing*. Pada penelitian ini menggunakan metode *Jet flushing*

karena metode tersebut yang diaplikasikan di pabrik. Pada Gambar 2.7 disajikan ilustrasi dari tipe metode *flushing* pada proses permesinan EDM.



(a) *Suction through electrodes*; (b) *Suction through work piece*; (c) *Pressure through electrodes*; (d) *Pressure through electrodes*; (e) *Jet flushing*; (f) *Periodic cycling electrode*

Gambar 2.7 Metode *flushing* (Sumber: Astakhov dan Outeiro, 2007)

## 2.6 Ketelitian Ukuran (*Overcut*)

Ketelitian didefinisikan sebagai hasil penyesuaian antara hasil pengukuran dengan hasil sebenarnya (Darsin, 2006). Adapun harga yang ditentukan tersebut hanyalah harga yang paling dianggap benar, perbedaan harga yang diukur dengan benar secara berulang-ulang disebut dengan kesalahan sistematik. Semakin kecil kesalahannya maka proses pengukuran dikatakan teliti.

Kesalahan-kesalahan sehubungan dengan perhitungan dan pengukuran dapat ditandai dengan presisi dan akurasi. Presisi mengacu pada:

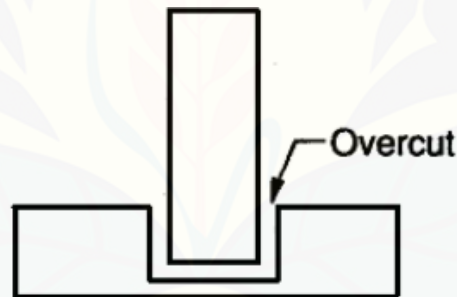
- a. Jumlah angka signifikan yang menyatakan suatu besaran.
- b. Penyebaran dalam bacaan berulang dari sebuah alat yang menggunakan fisik tertentu.

Bila nilai pengukuran hasilnya hampir sama (dekat) antara satu dengan lainnya dalam suatu proses tiap nilai pengukuran yang diamati berdasarkan pada dekatnya nilai hasil pengukuran tersebut. Akurasi mengacu pada dekatnya sebuah angka pendekatan atau pengukuran terhadap harga sebenarnya, nilai yang hendak dinyatakan hasil pengukuran mendekati nilai target maka proses ini disebut akurat.

Akurat juga sering disebut sebagai ketelitian, tiap pengukuran yang diamati berdasarkan pada dekatnya titik tersebut pada target.

Ketelitian ukuran pada proses permesinan EDM dari pengaturan lebar gap, semakin kecil gap akurasi semakin baik, tetapi semakin kecil gap yang diberikan dalam benda kerja voltase yang rendah dapat kita ketahui semakin rendah rata-rata laju pembuangan material. Faktor lain yang mempengaruhi ketelitian adalah ketelitian dari elektroda pahat itu sendiri dan jarak loncatan api yang tidak stabil. Tentu ke tidak telitian kedalaman lubang dihasilkan oleh bunga api yang terjadi antara sisi elektroda dan sisi benda kerja. Ketelitian ukuran dalam proses EDM antara 0,001-0,05.

Beberapa penelitian telah mencoba untuk meminimalkan hal yang sama dengan menggunakan berbagai macam metode (Sulistiyawan, 2015; Tiwari, 2013; Kumar dkk., 2011; Singh dkk., 2012). Hal ini bisa dikurangi dengan menggunakan metode *suction flushing*. Kondisi ini bisa digambarkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema ketelitian ukuran (Sumber: Shashikant, 2014)

## 2.7 Laju Pembuangan Material

Laju pembuangan material atau *material removal rate* (MRR) pada proses permesinan EDM adalah terjadinya pembentukan kawah-kawah halus pada permukaan benda kerja akibat loncatan bunga api antara elektroda dan benda kerja. Nilai dari laju pembuangan material dipengaruhi oleh beberapa parameter permesinan seperti banyaknya arus tiap *discharge*, *frekuensi discharge*, material elektroda, dan kondisi *flushing* cairan dielektrik (Krar dan Check, 1996). Laju pembuangan material juga dipengaruhi oleh titik leleh benda kerja tersebut (Schey, 1987). Laju pembuangan material pada proses permesinan EDM lebih lambat



dibandingkan dengan proses permesinan konvensional sehingga perlu dilakukan pemilihan pengaturan parameter permesinan yang benar untuk menghasilkan laju pembuangan yang tinggi dengan ketelitian yang presisi sehingga biaya produksi dapat diminimalkan.

Laju pembuangan material dihitung dengan cara menghitung waktu potong menggunakan *stop watch*. Dilakukan selama proses permesinan berlangsung mulai dari saat pertama kali terlihat loncatan bunga api listrik (*spark*) sampai dengan loncatan bunga api terakhir. Kemudian dilakukan penimbangan terhadap massa benda kerja sebelum uji dan massa benda kerja yang terbuang akibat pembuangan material oleh EDM sehingga didapatkan nilai massa yang terbuang. Massa yang terbuang dibagi dengan massa jenis spesimen uji (AISI P20 =  $7,85 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ ) didapatkan volume benda kerja yang tertutup. Menurut Indriani (1997) laju pembuangan material didefinisikan sebagai besarnya volume material yang dihasilkan per satuan waktu, biasanya  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Laju pembuangan material dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$MRR = \frac{\text{Volume Material yang Terkikis (mm}^3\text{)}}{\text{Waktu Proses (min)}} \quad (2.1)$$

dengan:

MRR = Laju pembuangan material (*material removal rate*)

## 2.8 Desain Eksperimen

### 2.8.1 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan metode baru dalam bidang teknik yang berprinsip pada perbaikan mutu/kualitas produk dan proses, serta bertujuan untuk menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin dengan memperkecil akibat dari variasi tanpa menghilangkan penyebabnya. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional (Soejanto, 2009). Metode Taguchi juga disebut sebagai *robust design* karena menjadikan produk dan proses memiliki sifat terhadap faktor-faktor gangguan tersebut.

Beberapa kelebihan metode Taguchi dibandingkan dengan metode desain eksperimen lain, di antaranya (Soejanto, 2009):

- a. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak parameter permesinan dan banyak level.
- b. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap parameter gangguan yang tidak dapat dikontrol
- c. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari parameter permesinan yang menghasilkan respons optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang kompleks dan mengorbankan pengaruh interaksi yang cukup signifikan. Oleh karena itu, pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu disebut dengan desain eksperimen (Soejanto, 2009). Parameter permesinan dan level parameternya harus dibuat bervariasi sehingga didapatkan hasil kombinasi pengujian yang efektif. Kombinasi pengujian tertentu diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk mencari parameter-parameter yang berpengaruh dan tindakan yang dapat membuat perbaikan lebih lanjut.

### 2.8.2 Rancangan Percobaan Taguchi

Secara umum, rancangan percobaan metode Taguchi dibagi menjadi tiga tahap yang mencakup semua pendekatan penelitian. Ketiga tahap tersebut adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

#### a. Tahap Perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan penelitian yang memberikan informasi positif dan negatif. Apabila penelitian memberikan indikasi tentang parameter dan level yang mengarah pada peningkatan



performansi produk makan informasi yang terjadi adalah positif, begitu pula sebaliknya. Langkah-langkah pada tahap ini antara lain:

1) Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti harus dirumuskan secara spesifik dan jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam penelitian yang akan dikerjakan.

2) Penentuan Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang ditentukan harus dapat menjawab rumusan masalah yang dirumuskan.

3) Penentuan Parameter Respons

Parameter respons memiliki nilai yang tergantung pada parameter-parameter yang lain.

4) Pengidentifikasian Parameter permesinan

Parameter permesinan adalah parameter yang tidak tergantung pada parameter lain. Pada langkah ini, akan dipilih parameter-parameter yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap parameter respons yang bersangkutan. Dalam suatu penelitian, tidak semua parameter yang diperkirakan mempengaruhi respons harus diselidiki. Dengan demikian, penelitian dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

5) Pemisahan Parameter permesinan dan Parameter Gangguan

Parameter yang diamati dapat dibagi menjadi dua yaitu, parameter permesinan dan parameter gangguan. Dalam rancangan percobaan Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua parameter tersebut berbeda. Parameter permesinan adalah parameter yang nilainya dapat dikendalikan, sedangkan parameter gangguan adalah parameter yang nilainya tidak dapat dikendalikan atau biasa disebut dengan *factor noise*.

6) Penentuan Jumlah dan Nilai Parameter permesinan

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan penelitian. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil

penelitian yang diperoleh semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.

#### 7) Perhitungan Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan adalah sebuah konsep untuk mendeskripsikan seberapa besar penelitian harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan oleh penelitian tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah penelitian yang akan dilakukan untuk menyelidiki parameter permesinan yang akan diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal ( $v_{mo}$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{jumlah percobaan} - 1 \quad (2.2)$$

Derajat kebebasan dari parameter permesinan dan level ( $v_{fl}$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level variabel proses} - 1 \quad (2.3)$$

#### 8) Pemilihan Matriks Ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah parameter permesinan dan jumlah levelnya. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah parameter permesinan dengan jumlah percobaan yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$L_a(b^c)$

dengan:

L = rancangan bujur sangkar latin

a = banyaknya percobaan

b = banyaknya level parameter permesinan

c = banyaknya parameter permesinan

Matriks ortogonal untuk dua level, tabel OA terdiri dari  $L_4(2^3)$ ,  $L_8(2^7)$ ,  $L_{12}(2^{11})$ ,  $L_{16}(2^{15})$ ,  $L_{32}(2^{31})$ , dan  $L_{64}(2^{63})$ . Sedangkan untuk tiga level tabel OA terdiri dari  $L_9(3^4)$ ,  $L_{18}(3^{13})$ ,  $L_{27}(3^{40})$ . Matriks ortogonal  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  adalah salah satu contoh matriks ortogonal standar ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Matriks Ortogonal  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ 

Kombinasi	Parameter permesinan			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Matriks ortogonal pada Tabel 2.1 terdiri dari tiga parameter permesinan (A, B, dan C) dan dua level (1 dan 2). Untuk matriks ini diperlukan empat kali percobaan karena berdasarkan matriks ortogonalnya terdapat 4 macam kombinasi.

b. Tahap Pelaksanaan

Pada tahap pelaksanaan terdiri dari dua hal, di antaranya adalah menentukan jumlah pengulangan dan pengacakan pelaksanaan eksperimen.

1) Pengulangan

Pengulangan adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan serta memperoleh harga taksiran dari kesalahan.

2) Pengacakan

Dalam percobaan, selain faktor-faktor yang diselidiki pengaruhnya terhadap suatu parameter, juga terdapat faktor-faktor lain yang tidak dapat dikendalikan atau tidak diinginkan seperti kelelahan operator, naik atau

turun daya mesin, dan lain-lain. Hal tersebut dapat mempengaruhi hasil percobaan. Pengaruh faktor-faktor tersebut diperkecil dengan menyebarkan pengaruh selama percobaan melalui pengacakan (*randomisasi*) urutan percobaan. Secara umum, pengacakan dimaksudkan untuk :

- a) Meratakan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit percobaan.
- b) Memberikan kesempatan yang sama pada setiap unit percobaan untuk menerima suatu perlakuan sehingga diharapkan ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.
- c) Mendapatkan hasil pengamatan yang bebas (*independen*) satu sama lain. Jika pengulangan dengan tujuan yang memungkinkan dilakukannya uji signifikan, maka pengacakan bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikan tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

c. Tahap Analisis

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dan pengolahan data. Meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data sesuai dengan suatu percobaan yang dipilih. Pada tahap ini juga dilakukan perhitungan dan pengujian data statistik pada data hasil percobaan. Dalam metode Taguchi terdapat dua macam analisis yang dilakukan dengan tujuan yang berbeda-beda, yaitu:

1) Analisis Variansi (ANAVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data guna mencari besarnya pengaruh dari setiap parameter permesinan terhadap suatu proses. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom atau dengan membandingkan nilai *sum of square* dari suatu parameter permesinan terhadap seluruh parameter permesinan.

ANAVA dua arah digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua parameter permesinan atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (*degree of*

*freedom*, *df*), jumlah kuadrat (*sum of square*, *SS*), kuadrat tengah (*mean of square*, *MS*), dan *F* hitung ( $F_{\text{ratio}}$ ,  $F_0$ ) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tabel Analisis Variansi (ANAVA)

Sumber Variasi	Degree of freedom (df)	Sum of square (SS)	Mean of square (MS)	F hitung ( $F_0$ )
Faktor A	$V_A = k_A - 1$	$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Faktor B	$V_B = k_B - 1$	$SS_B = n_B \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Residual	$V_E = df_T - df_A - df_B$	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$	
Total	$V_T = N - 1$	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$		

Sumber: Ross, 1988

dengan:

$k_A$  = banyaknya level pada parameter permesinan A

$k_B$  = banyaknya level pada parameter permesinan B

$n_A$  = banyaknya pengulangan level parameter permesinan A

$n_B$  = banyaknya pengulangan level parameter permesinan B

$\bar{y}$  = rata-rata total

$N$  = jumlah total pengamatan

## 2) Uji distribusi F

Pengujian uji distribusi F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing parameter permesinan dan residual. Variansi residual adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena parameter-parameter yang tidak dapat dikendalikan. Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk parameter permesinan yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

$H_1$  : sedikitnya ada satu pasangan  $\mu_1$  yang tidak sama

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respons yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai



respons tersebut. Respons pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk (Bhattacharyya dan Johnson, 1977):

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (2.4)$$

Oleh karena itu, hipotesis yang dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

$$\begin{aligned} \text{Taraf parameter permesinan A} \rightarrow & H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_i = 0 \\ & H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \alpha_i \neq 0 \\ \text{Taraf parameter permesinan B} \rightarrow & H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_j = 0 \\ & H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0 \end{aligned}$$

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya pengaruh parameter permesinan A dan parameter permesinan B terhadap respons serta tidak ada interaksi antara parameter permesinan A dengan parameter permesinan B, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya pengaruh parameter permesinan A dan parameter permesinan B terhadap respons serta adanya interaksi antara parameter permesinan A dengan parameter permesinan B. Kegagalan menolak atau penolakan  $H_0$  berdasarkan pada nilai  $F_{hitung}$  yang dirumuskan:

$$\text{Taraf parameter permesinan A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.5)$$

$$\text{Taraf parameter permesinan B} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.6)$$

Kegagalan menolak  $H_0$  pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi berikut:

$$\text{Taraf parameter permesinan A} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.7)$$

$$\text{Taraf parameter permesinan B} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.8)$$

Bila menggunakan perangkat lunak statistik, kegagalan menolak  $H_0$  dilakukan jika *P-value* lebih besar daripada  $\alpha$  (taraf signifikansi).

### 3) Rasio S/N

Rasio S/N (*signal to noise ratio*) digunakan untuk memilih parameter permesinan yang memiliki kontribusi dalam mengurangi variansi, mengetahui level parameter permesinan mana yang berpengaruh terhadap hasil eksperimen dan meminimalkan karakteristik kualitas terhadap parameter gangguan. Perhitungan rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu:

#### a) Semakin kecil semakin baik (*lower the better*)

Semakin kecil semakin baik adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negatif, sehingga nilai semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut (Park, 1996):

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \quad (2.9)$$

dengan:

$n$  = jumlah data

$i$  = data respons pengukuran

#### b) Tertuju pada nilai tertentu (*Nominal the better*)

Karakteristik ini adalah karakteristik kualitas dengan nilai/target tidak nol dan terbatas, sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut (Park, 1996):

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.10)$$

#### c) Semakin besar semakin baik (*Higher the better*)

Semakin besar semakin baik adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut (Park, 1996):

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.11)$$

## 2.9 Uji Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dengan nilai dugaannya  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ . Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), mempunyai rata-rata sama dengan nol dan variansi yang konstan  $\sigma^2$  (identik), serta terdistribusi normal atau  $\varepsilon_i \sim IIDN(0, \sigma^2)$ . Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak.

### a. Uji independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak terdapat korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan *plot autocorrelation function* (ACF).

### b. Uji homogenitas

Pengujian homogenitas varians atau uji identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot  $e_i$  terhadap  $\hat{Y}_i$  (secara visual). Jika penyebaran datanya acak (menyebar di sekitar garis nol) dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

### c. Uji kenormalan

*Normal probability plot* pada Minitab menyatakan probabilitas dari residual suatu respons. Selain itu, dengan *Kolmogorov-Smirnov normality test* juga dapat digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : residual berdistribusi normal.

$H_1$  : residual tidak berdistribusi normal.

Gagal tolak  $H_0$  apabila  $P\text{-value} > \alpha$

## 2.10 Metode Taguchi-fuzzy

Optimasi pada metode Taguchi hanya dapat dilakukan untuk satu respons saja. Untuk melakukan optimasi multirespons secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi dan logika *fuzzy*.

Logika *fuzzy* pertama kali diformulasikan oleh Dr. Zadeh pada tahun 1965. Metode ini diformulasikan dalam upaya mencari nilai tengah antara nol dan satu. Dr. Zadeh melakukan modifikasi pada teori himpunan, di mana setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang selalu bernilai kontinu antara nol sampai satu. Himpunan ini disebut sebagai himpunan kabur (*fuzzy set*).

Logika *fuzzy* mempunyai kemampuan untuk merespons parameter respons yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara pasti, misalnya tinggi, lambat, dan bising. Ketidakjelasan dalam menggambarkan suatu parameter respons dapat secara alami dimodelkan dengan menggunakan logika *fuzzy* (Dhavmani dan Alwarsamy, 2011). Dalam logika *fuzzy*, parameter respons yang bersifat kabur dipresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai tegas (*crisp*) dan derajat keanggotaan (*membership function*). Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan menggunakan metode Taguchi-*fuzzy* adalah sebagai berikut:

a. Menghitung rasio S/N untuk masing-masing respons

Rasio S/N digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respons. Rasio S/N merupakan rancangan untuk melakukan transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Karakteristik kualitas yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik untuk ketelitian ukuran dan semakin besar semakin baik untuk laju pembuangan material. Perhitungan rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.11.

b. Normalisasi data untuk masing-masing respons

Normalisasi data dilakukan pada rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Karakteristik semakin besar semakin baik (*higher the better*) berlaku untuk parameter respons laju pembuangan material yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.12 dan karakteristik semakin kecil semakin baik (*lower the better*) berlaku untuk parameter respons ketelitian ukuran yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.13 (Dewangan dan Biswas, 2013). Tabel 2.3 menunjukkan penempatan nilai respons untuk proses normalisasi.

Tabel 2.3 Penempatan Rasio S/N

	Rasio S/N 1	Rasio S/N 2	...	Rasio S/N k
Kombinasi 1	$X_1(1)$	$X_1(2)$	...	$X_1(k)$
Kombinasi 2	$X_2(1)$	$X_2(2)$	...	$X_2(k)$
...	...	...	...	...
Kombinasi i	$X_i(1)$	$X_i(2)$	...	$X_i(k)$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.12)$$

Proses normalisasi untuk respons dengan karakteristik “semakin kecil semakin baik” menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.13)$$

dengan:

$$\min_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terkecil dari } X_i(k)$$

$$\max_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terbesar dari } X_i(k)$$

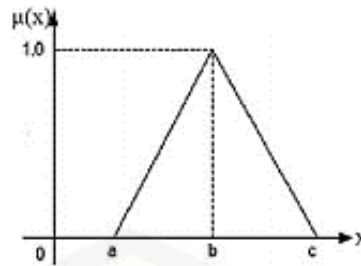
### c. Fuzzification

*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 disebut derajat keanggotaan). Interval nilai keanggotaan yang digunakan adalah antara 0 sampai 1. Bentuk dari fungsi keanggotaan yang digunakan adalah kurva segitiga di mana fungsi keanggotaan kurva segitiga adalah sebagai berikut (Ratnawati, 2011)

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & a \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.14)$$

Fungsi keanggotaan kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.9.





Gambar 2.9 Fungsi keanggotaan kurva segitiga

d. *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 parameter *input* juga sebagai alat penarik kesimpulan yang akan menghasilkan nilai *fuzzy* berdasarkan logika *fuzzy*. Biasanya *fuzzy rules* dibuat berdasarkan pengelompokan dengan bentuk batasan aturan *if-then* (jika-maka), contohnya sebagai berikut:

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

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

Aturan ke-3: Jika  $x_1$  adalah  $A_n$ ,  $x_2$  adalah  $B_n$ , ..., dan  $x_k$  adalah  $Y_n$  maka  $y$  adalah  $Z_n$ ,

Derajat keragaman dari keanggotaan himpunan *fuzzy* akan dihitung berdasarkan nilai dari  $x_1, x_2$ , hingga  $x_k$ , dan  $y$ , sedangkan  $A, B$ , hingga  $Y$  adalah himpunan *fuzzy* yang ditetapkan berdasarkan fungsi keanggotaan.

e. *Defuzzification*

*Defuzzification* merupakan proses perubahan nilai *fuzzy* menjadi *Multi Response Performance Indeks* (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* multirespons ( $\mu C_0$ ) menjadi *non-fuzzy value* ( $Y_0$ ), atau yang disebut MRPI.

f. Analisis variansi (ANAVA)

Analisis Variansi (ANAVA) digunakan untuk mengetahui parameter permesinan yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respons dan besarnya kontribusi parameter permesinan terhadap respons. Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada MRPI yang merupakan respons yang mewakili keseluruhan respons.

Secara statistik, nilai  $F_{hitung}$  menunjukkan keputusan faktor mana yang mempunyai pengaruh besar terhadap respons. Semakin besar nilai  $F_{hitung}$  mengindikasikan bahwa variasi faktor tersebut akan sangat berpengaruh terhadap nilai respons. Faktor dikatakan berpengaruh secara signifikan terhadap respons ketika mempunyai nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dibandingkan  $F_{\alpha, v_1, v_2}$  (nilai dapat dilihat pada tabel statistik).

g. Memprediksi nilai MRPI hasil optimasi

Nilai prediksi MRPI berdasarkan kombinasi level parameter permesinan untuk menghasilkan respons yang optimal dapat dihitung menggunakan rumus (Lin dan Lin, 2002):

$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (2.15)$$

dengan:

$\gamma_m$  = nilai rata-rata dari keseluruhan MRPI

$\bar{\gamma}_i$  = rata-rata MRPI pada level optimal

$q$  = jumlah parameter permesinan yang mempengaruhi respon secara signifikan

## 2.11 Interpretasi Hasil Percobaan

Interpretasi yang dilakukan pada hasil percobaan dengan menggunakan kombinasi metode Taguchi dan logika *fuzzy* adalah sebagai berikut:

a. Persentase kontribusi

Persentase kontribusi menunjukkan porsi (kekuatan relatif) masing-masing faktor terhadap total variansi yang diamati. Jika persentase kontribusi residual (< 15%), maka tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan. Tetapi, jika persentase kontribusi residual (>15%) mengindikasikan terdapat faktor yang

berpengaruh terabaikan sehingga residual yang terjadi terlalu besar. Persentase kontribusi suatu parameter permesinan dirumuskan dengan menggunakan persamaan (Ross, 1988)

$$\rho_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (2.16)$$

$$SS'_A = SS_A - df_A \cdot MS_{Res} \quad (2.17)$$

dengan:

$SS_A$  = jumlah kuadrat dari parameter permesinan A

$SS_T$  = jumlah kuadrat total

$df_A$  = derajat kebebasan dari parameter permesinan A

$MS_{Res}$  = rata-rata kuadrat residual

b. Interval keyakinan untuk kondisi optimum prediksi

Interval kepercayaan merupakan harga taksiran yang mungkin dapat dicapai dengan kondisi yang telah ditentukan. Harga taksiran untuk menaksirkan harga optimum yang diperoleh dari faktor dan taraf optimum dapat dihitung menggunakan rumus (Ross, 1988).

$$N_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan}} \quad (2.18)$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(\alpha, 1, Ve)} MS_{Res}}{N_{eff}}} \quad (2.19)$$

Untuk menghitung interval keyakinan untuk memprediksi percobaan konfirmasi menggunakan rumus (Ross, 1988):

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha, 1, Ve)} MS_{Res} \left[ \frac{1}{N_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.20)$$

dengan:

$CI_p$  = interval kepercayaan

$F_{(\alpha, 1, Ve)}$  = harga derajat kebebasan

$N_{eff}$  = jumlah pengamatan efektif

$r$  = jumlah sampel dalam percobaan konfirmasi

Interval kepercayaan untuk rata-rata proses optimum dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Ross, 1988):

$$\hat{\mu} - CI_p \leq \hat{\mu} \leq \hat{\mu} + CI_p \quad (2.21)$$

### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di UPT Industri Logam dan Perencanaan Sidoarjo Dinas Perindustrian dan Perdagangan Provinsi Jawa Timur Jl. Raya Trosobo Km 20 Taman-Sidoarjo Jawa Timur. Waktu penelitian dijadwalkan pada tanggal 08 Mei – 08 Juni 2018.

#### 3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

##### 3.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### a. Mesin EDM

Mesin EDM yang digunakan pada penelitian ini adalah HSIU FONG tipe ED-252 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, sedangkan spesifikasi mesin tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi mesin EDM

Model	ED-252	Satuan
Ukuran meja	600x300	mm
Sumbu X, Y	300x200	mm
Ukuran tangki kerja	770x510x270	mm
Jarak antara pelat pemegang elektroda dengan meja kerja	150-500	mm
Berat mesin	1060	kgs
Berat maksimal elektroda	60	kgs
Berat maksimal benda kerja	500	kgs
Ukuran maksimal benda kerja	600x300x240	mm
Ukuran pelat pemegang elektroda	150x80	mm
Arus maksimum	50	Ampere
Tegangan maksimum	380	V
<i>On time</i> maksimum	1200	$\mu$ s
<i>Off time</i> maksimum	12	$\mu$ s
Mesin <i>head stroke</i>	200	mm
Dimensi luar	1600x1000x2000	mm

Sumber: *Instruction manual book EDM HSIU FONG ED-252*



Gambar 3.1 Mesin Ram EDM

b. Peralatan Ukur

Peralatan ukur yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1) Neraca Digital

Alat ukur ini digunakan untuk mencari nilai berat benda uji, baik sebelum dan sesudah proses pembuangan. Neraca digital yang digunakan pada penelitian ini adalah *Professional Digital Table Top Scale* yang mempunyai ketelitian ukuran 0,01 gram.

2) Mikrometer

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur dimensi dari benda uji dan elektroda baik sebelum dan sesudah proses pembuangan material. Mikrometer yang digunakan pada penelitian ini adalah MITUTOYO yang mempunyai ketelitian ukuran 0,01 mm.

3) *Stop Watch*

Alat ukur ini digunakan untuk menghitung waktu aktual selama proses pembuangan material berlangsung. *Stop watch* yang digunakan pada penelitian ini mempunyai ketelitian 0,1 detik.



## 4) Mistar Ingsut

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur tebal benda kerja dan panjang elektroda. Mistar insut yang digunakan pada penelitian ini mempunyai ketelitian 0,05 mm.

5) *Profile Projector*

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur diameter hasil pembuangan material pada proses EDM.

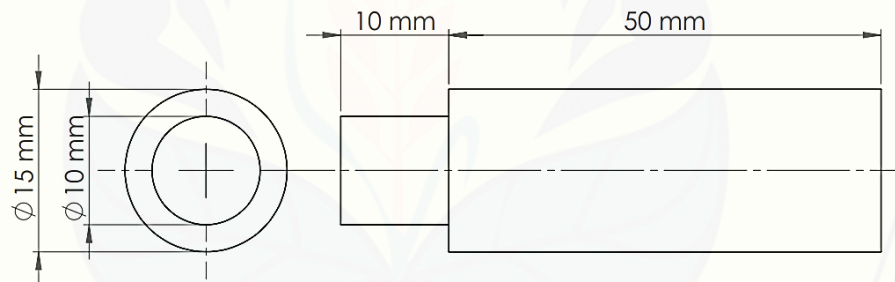
## 3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

## a. Elektroda Tembaga

Spesifikasinya adalah sebagai berikut:

- 1) Nilai konduktivitas listrik :  $6,0 \times 10^7 (\text{ohm}^{-1} \cdot \text{m}^1)$
- 2) Titik lebur :  $1085 \text{ }^\circ\text{C}$



Gambar 3.2 Dimensi Elektroda

b. Cairan dielektrik menggunakan *esso LECTOR 40*. Spesifikasinya adalah sebagai berikut:

- 1) Titik Nyala (*Flare Point*) :  $132 \text{ }^\circ\text{C}$
- 2) Massa jenis :  $6,8 \text{ g/cm}^3$
- 3) Viskositas :  $6,8 \text{ cSt}$

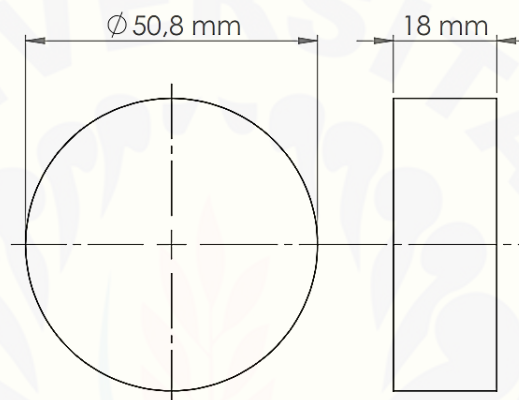
## c. Baja perkakas AISI P20 dengan komposisi kimia dan sifat mekanik disajikan pada Tabel 3.2 dan 3.3 (Kumar dkk., 2012). sedangkan untuk dimensi benda kerja pada penelitian ini disajikan pada Gambar 3.3.

Tabel 3.2 Komposisi kimia baja AISI P20

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,37 %	0,30 %	1,40 %	2,0 %	1,0 %	0,20 %

Tabel 3.3 Sifat mekanik baja AISI P20

Suhu (°C)	Massa jenis $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Panas Spesifik (J/kg °C)	Modulus elastisitas (MPa)
20	7.800	460	205.000



Gambar 3.3 Dimensi benda kerja

### 3.1 Parameter Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari hasil percobaan. Parameter-parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.1.1 Parameter Permesinan

Parameter permesinan merupakan parameter yang mempengaruhi terjadinya sesuatu atau parameter penyebab. Parameter permesinan dalam penelitian ini adalah:

- Tool lift time* ( $T_{up}$ )
- Pulse current* ( $I_o$ )
- Pulse on time* ( $T_{on}$ )
- Pulse off time* ( $T_{off}$ )

### 3.1.2 Parameter Respons

Parameter respons merupakan parameter yang diamati dalam penelitian. Nilai parameter ini dipengaruhi oleh nilai parameter permesinan yang telah ditentukan. Berikut adalah parameter respons yang digunakan dalam penelitian ini

- a. Laju pembuangan material (MRR)
- b. Ketelitian ukuran (*Overcut*)

### 3.1.3 Parameter Konstan

Parameter konstan merupakan parameter yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai parameter ini dijaga konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga mempengaruhi parameter respons. Parameter-parameter yang menjadi parameter konstan pada penelitian ini adalah:

- a. *Gap*
- b. *Working voltage* ( $V_w$ )
- c. *Polaritas*
- d. Cairan dielektrik
- e. Pembilasan geram (*flushing*)
- f. *Tool work time*
- g. Tipe Elektroda
- h. *Duty Cycle* ( $T_{au}$ )

### 3.1.4 Parameter Gangguan

Parameter gangguan atau biasa disebut sebagai *noise factor* adalah parameter yang memiliki pengaruh terhadap parameter respons, tetapi sangat sulit atau tidak bisa dikendalikan. Parameter-parameter yang mungkin menjadi *noise factor* dalam penelitian ini adalah temperatur cairan dielektrik, konsentrasi partikel-partikel lain dalam cairan dielektrik dan kondisi permukaan elektroda. Parameter-parameter ini tidak dimasukkan ke dalam rancangan percobaan, sehingga pengambilan data dilakukan dengan pengulangan untuk mengatasi pengaruh *noise factor* pada hasil penelitian.

### 3.2 Rancangan Percobaan

#### 3.2.1 Pengaturan Parameter pada Mesin EDM

Pengaturan Parameter-parameter pada mesin EDM dilakukan berdasarkan buku *Electrical Discharge Machining Data Manual* dan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Pengaturan nilai dari parameter permesinan yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter permesinan dan level yang digunakan

Simbol	Parameter permesinan	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
A	<i>Tool lift time</i> ( $T_{up}$ )	s	3	6	-
B	<i>Pulse current</i> ( $I_p$ )	A	2	4	6
C	<i>Pulse on time</i> ( $T_{on}$ )	$\mu s$	200	600	1000
D	<i>Pulse off time</i> ( $T_{off}$ )	%	3	5	7

#### 3.2.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal berdasarkan jumlah parameter permesinan yang akan digunakan dan jumlah level dari setiap parameter permesinan. matriks ortogonal harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan parameter permesinan yang telah ditetapkan. Pada penelitian ini tidak terjadi interaksi antar parameter permesinan. derajat kebebasan dari parameter permesinan tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 dan disajikan pada Tabel 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3.5 Total derajat kebebasan parameter permesinan

Simbol	Parameter permesinan	Jumlah level	df = (k-1)
A	<i>Tool lift time</i> ( $T_{up}$ )	2	1
B	<i>Pulse current</i> ( $I_p$ )	3	2
C	<i>Pulse on time</i> ( $T_{on}$ )	3	2
D	<i>Pulse off time</i> ( $T_{off}$ )	3	2
Total			7

Tabel 3.5 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan adalah tujuh, sedangkan menurut jumlah level pada rancangan penelitian ini termasuk *mixed level*. Maka matriks ortogonal yang dipilih untuk percobaan dengan derajat kebebasan tujuh dan memiliki satu parameter dengan dua level dan tiga parameter

dengan tiga level adalah  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ . Rancangan percobaan Taguchi matriks ortogonal  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  ditunjukkan oleh Tabel 3.6 sebagai berikut:

Tabel 3.6 Rancangan percobaan matriks ortogonal  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$

Kombinasi	Parameter permesinan			
	A	B	C	D
1	3	2	200	3
2	3	2	600	5
3	3	2	1000	7
4	3	4	200	3
5	3	4	600	5
6	3	4	1000	7
7	3	6	200	5
8	3	6	600	7
9	3	6	1000	3
10	6	2	200	7
11	6	2	600	3
12	6	2	1000	5
13	6	4	200	5
14	6	4	600	7
15	6	4	1000	3
16	6	6	200	7
17	6	6	600	3
18	6	6	1000	5

Pada penelitian ini, percobaan dilakukan dengan pengulangan sebanyak dua kali untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan serta memperoleh harga taksiran dari kesalahan dan dilakukan pengacakan agar faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan seperti kelelahan operator atau naik turunnya daya mesin dapat di perkecil.

Tabel 3.7 menunjukkan urutan percobaan yang sesuai dengan kombinasi matriks ortogonal  $L_{18}$  setelah dilakukan pengacakan untuk pengulangan pertama, sedangkan untuk pengulangan kedua ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.7 Urutan percobaan matriks ortogonal  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  pengulangan pertama

Urutan	Kombinasi	Parameter permesinan			
		A	B	C	D
1	5	3	4	600	5
2	4	3	4	200	3
3	6	3	4	1000	7
4	16	6	6	200	7



Urutan	Kombinasi	Parameter permesinan			
		A	B	C	D
5	18	6	6	1000	5
6	13	6	4	200	5
7	12	6	2	1000	5
8	1	3	2	200	3
9	7	3	6	200	5
10	11	6	2	600	3
11	9	3	6	1000	3
12	15	6	4	1000	3
13	2	3	2	600	5
14	3	3	2	1000	7
15	8	3	6	600	7
16	17	6	6	600	3
17	10	6	2	200	7
18	14	6	4	600	7

Urutan percobaan untuk pengulangan kedua disajikan pada Tabel 3.8 sebagai berikut:

Tabel 3.8 Urutan percobaan matriks ortogonal  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  pengulangan kedua

Urutan	Kombinasi	Parameter permesinan			
		A	B	C	D
1	17	6	6	600	3
2	16	6	6	200	7
3	13	6	4	200	5
4	6	3	4	1000	7
5	3	3	2	1000	7
6	9	3	6	1000	3
7	12	6	2	1000	5
8	14	6	4	600	7
9	7	3	6	200	5
10	4	3	4	200	3
11	18	6	6	1000	5
12	5	3	4	600	5
13	2	3	2	600	5
14	11	6	2	600	3
15	8	3	6	600	7
16	15	6	4	1000	3
17	10	6	2	200	7
18	1	3	2	200	3

### 3.2.3 Pengambilan Data

#### a. Pengambilan Data Laju Pembuangan Material

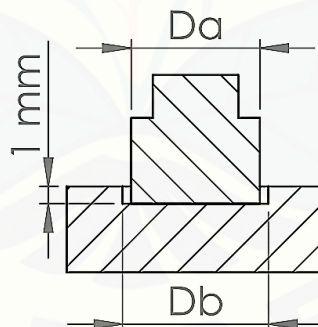
Laju pembuangan material dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1. Caranya adalah dengan mengurangi berat awal dengan berat setelah proses pemotongan dibagi massa jenis baja perkakas AISI P20 ( $7,85 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ ) kemudian membagi volume benda kerja yang terbuang dengan waktu yang dibutuhkan. Hasil perhitungan laju pembuangan material kemudian dimasukkan ke dalam Tabel 3.9. Laju pembuangan material dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$MRR = \frac{\text{Volume Material yang Terkikis (mm}^3\text{)}}{\text{Waktu Proses (min)}}$$

#### b. Pengambilan Data Ketelitian Ukuran

Ketelitian ukuran diidentikkan dengan nilai *overcut*, yaitu besarnya penyimpangan antara ukuran produk yang dihasilkan dengan ukuran elektroda (Prayogo, 2010). Hasil perhitungan ketelitian ukuran kemudian dimasukkan ke dalam Tabel 3.9. Pengukuran ketelitian dapat dilihat pada Gambar 3.4.

$$\text{Overcut} = D_b - D_a$$



Gambar 3.4 Pengukuran diameter ketelitian ukuran

Data dalam penelitian yang akan diambil seperti yang terlihat pada Tabel 3.9 sebagai berikut:

Tabel 3.9 Data hasil penelitian

Komb.	Parameter permesinan				MRR ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Overcut (mm)
	Tup	Ip	Ton	Toff		
1	3	2	200	3		
2	3	2	600	5		

Komb.	Parameter permesinan				MRR (mm <sup>3</sup> /min)	Overcut (mm)
	Tup	Ip	Ton	Toff		
3	3	2	1000	7		
4	3	4	200	3		
5	3	4	600	5		
6	3	4	1000	7		
7	3	6	200	5		
8	3	6	600	7		
9	3	6	1000	3		
10	6	2	200	7		
11	6	2	600	3		
12	6	2	1000	5		
13	6	4	200	5		
14	6	4	600	7		
15	6	4	1000	3		
16	6	6	200	7		
17	6	6	600	3		
18	6	6	1000	5		

### 3.2.4 Perhitungan Rasio S/N

Metode Taguchi menggunakan pendekatan rasio S/N untuk meneliti faktor *noise* terhadap variasi yang timbul. Perhitungan nilai rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respons. Respons laju pembuangan material memiliki karakteristik semakin besar semakin baik, nilai S/N rasio dihitung menggunakan rumus 2.11. sedangkan rasio S/N ketelitian ukuran dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 karena memiliki karakteristik kualitas respons semakin kecil semakin baik.

Perhitungan rasio S/N laju pembuangan material dengan karakteristik semakin besar semakin baik adalah sebagai berikut:

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

Perhitungan rasio S/N ketelitian ukuran dengan karakteristik semakin kecil semakin baik adalah sebagai berikut:

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

Data dari perhitungan rasio S/N dari respons-respons menggunakan rumus di atas kemudian digunakan sebagai parameter *input* pembuatan *fuzzy rules*. Data perhitungan kemudian dimasukkan ke dalam Tabel 3.10 sebagai berikut:

Tabel 3.10 Data rasio S/N

Komb.	MRR		Overcut	
	(mm <sup>3</sup> /min)	S/N	(mm)	S/N
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
	Maks			
	Min			

### 3.2.5 Normalisasi Rasio S/N

Normalisasi dilakukan untuk mentransformasikan nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Normalisasi pada penelitian ini dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respons rasio S/N. Karakteristik semakin besar semakin baik berlaku untuk parameter respons laju pembuangan material dan semakin kecil semakin baik berlaku untuk ketelitian ukuran. Perhitungan normalisasi rasio S/N untuk setiap respons menggunakan persamaan 2.12 dan 2.13. Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}$$

Proses normalisasi untuk respons dengan karakteristik “semakin kecil semakin baik” menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}$$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N masing-masing respon pada setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 3.11 sebagai berikut:

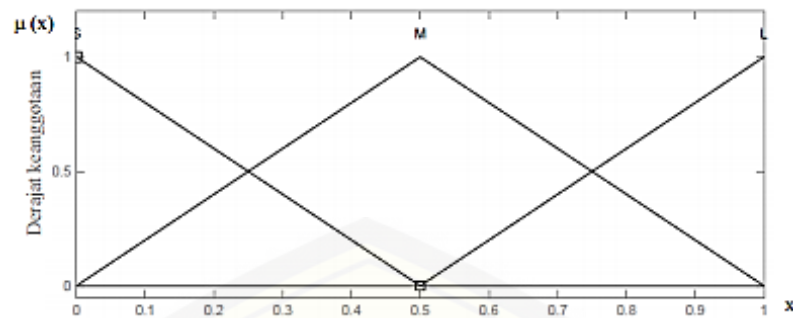
Tabel 3.11 Data normalisasi rasio S/N

Komb.	Rasio S/N		$X_i^*$	
	MRR	Overcut	MRR	Overcut
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				

### 3.2.6 Fuzzification

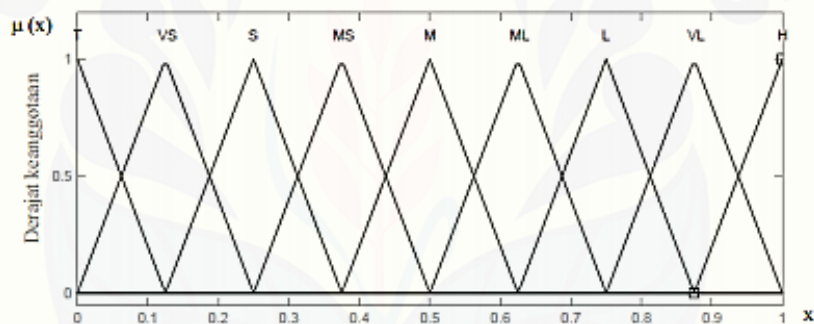
Parameter-parameter *input* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah menggunakan nilai rasio S/N dari masing-masing respons laju pembuangan material dan ketelitian ukuran. Nilai-nilai rasio S/N dari masing-masing respons akan diubah menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang digunakan pada parameter *input* adalah bentuk segitiga (*triangle*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. fungsi keanggotaan dari masing-masing respons dikelompokkan kedalam tiga kelas bilangan *fuzzy* yaitu *small* (S), *medium* (M), dan *large* (L).





Gambar 3.5 Grafik fungsi keanggotaan

Parameter *output* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah *multi response performance indeks* (MRPI). Fungsi keanggotaan yang digunakan sama dengan fungsi keanggotaan pada parameter *input* yaitu bentuk segitiga (*triangle*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Grafik fungsi keanggotaan untuk MRPI

Gambar 3.6 menunjukkan fungsi keanggotaan MRPI dikelompokkan kedalam sembilan kelas bilangan *fuzzy* yaitu *tiny* (T), *very small* (VS), *small* (S), *smaller middle* (SM), *middle* (M), *larger middle* (LM), *larger* (L), *very larger* (VL), dan *huge* (H).

### 3.2.7 Penentuan *Fuzzy Rules*

Dasar aturan *fuzzy* adalah sekelompok aturan pengontrolan jika-maka (*if-then control*) yang menyatakan hubungan antara parameter *input* dan *output*. Pada penelitian ini terdapat dua parameter *input* yaitu MRPI dari respons laju pembuangan material dan ketelitian ukuran dengan masing-masing memiliki tiga

bilangan *fuzzy*. Tabel 3.12 menunjukkan *fuzzy rules* yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.12 *Fuzzy rules*

		Ketelitian ukuran		
		Small (S)	Medium (M)	Large (L)
Laju pembuangan material	Small (S)	T	VS	S
	Medium (M)	SM	M	ML
	Large (L)	L	VL	H

### 3.2.8 *Defuzzification*

*Defuzzification* merupakan proses perubahan himpunan *fuzzy* menjadi *Multi Response Performance Indeks* (MRPI) dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke dalam himpunan tegas (*crisp*). Proses *defuzzification* dilakukan dengan menggunakan metode *centroid* (titik tengah).

Hasil proses *defuzzification* yang berupa nilai MRPI untuk tiap-tiap kombinasi parameter respons kemudian dimasukkan ke dalam Tabel 3.13. MRPI akan digunakan sebagai parameter respons yang mewakili respons laju pembuangan material dan ketelitian ukuran secara serentak.

Tabel 3.13 *Multi response performance indeks* (MRPI)

Kombinasi faktor ke-	Parameter input $X_i^*$		MRPI
	MRR	Overcut	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			

### 3.2.3 Hasil Optimasi

Rancangan percobaan Taguchi berupa matriks ortogonal mampu untuk mengelompokkan pengaruh dari masing-masing parameter pada level yang berbeda. Rata-rata masing-masing level dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Perhitungan rata-rata nilai MRPI pada masing-masing level dari parameter permesinan kemudian dimasukkan ke dalam Tabel 3.14.

Tabel 3.14 Rata-rata nilai MRPI untuk setiap level parameter permesinan

Simbol	Parameter permesinan	MRPI		
		Level 1	Level 2	Level 3
A	<i>Tool lift time</i> ( $T_{up}$ )			
B	<i>Pulse current</i> ( $I_p$ )			
C	<i>Pulse on time</i> ( $T_{on}$ )			
D	<i>Pulse off time</i> ( $T_{off}$ )			
Rata-rata				

### 3.2.4 Analisis Variansi dan Persentase Kontribusi

Analisis variansi (ANAVA) digunakan untuk mencari parameter permesinan yang berpengaruh secara signifikan dan besarnya kontribusi terhadap parameter respons yang diteliti. Perhitungan ANAVA MRPI setiap parameter permesinan dapat dihitung menggunakan rumus pada Tabel 3.15 sebagai berikut:

Tabel 3.15 Tabel Analisis Variansi (ANAVA)

Parameter permesinan	Degree of freedom (df)	Sum of square (SS)	Mean of square (MS)	F hitung ( $F_0$ )
Faktor A	$V_A = kA - 1$	$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Faktor B	$V_B = kB - 1$	$SS_B = n_B \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Faktor C	$V_C = kC - 1$	$SS_C = n_C \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{y})^2$	$MS_C = \frac{SS_C}{df_C}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
Faktor D	$V_D = kD - 1$	$SS_D = n_D \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{y})^2$	$MS_D = \frac{SS_D}{df_D}$	$\frac{MS_D}{MS_E}$
Residual	$V_E = df_T - df_A - df_B - df_C - df_D$	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D$	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$	
Total	$V_T = N - 1$	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$		

Sumber: Ross, 1988

Perhitungan analisis variansi MRPI dilakukan menggunakan rumus pada Tabel 3.14 adalah sebagai berikut:

- a. Menghitung jumlah kuadrat total (*sum of square*)

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

- b. Menghitung jumlah kuadrat setiap parameter pemesinan (*sum of square*)

$$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$$

- c. Menghitung kuadrat tengah (*mean of square*)

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$$

Hasil perhitungan analisis variansi di atas untuk MRPI pada setiap parameter pemesinan kemudian dimasukkan ke dalam Tabel 3.16.

Tabel 3.16 Hasil ANAVA dan kontribusi parameter pemesinan pada MRPI

Parameter pemesinan	DF	SS	MS	F <sub>hitung</sub>	P-value	$\rho$
T <sub>up</sub>						
I <sub>p</sub>						
T <sub>on</sub>						
T <sub>off</sub>						
Residual						
Total						

Nilai F<sub>hitung</sub> yang lebih besar daripada F<sub>tabel</sub> menunjukkan bahwa parameter pemesinan tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap parameter respons. Pada penelitian ini taraf signifikansi atau nilai  $\alpha$  yang digunakan adalah 5%. Hipotesis awal (H<sub>0</sub>) dan hipotesis alternatif (H<sub>1</sub>) yang digunakan sebagai uji hipotesis menggunakan distribusi F sebagai berikut:

Parameter pemesinan

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Kesimpulan: F<sub>hitung</sub> > F<sub>( $\alpha, v_A, v_E$ )</sub>. Maka H<sub>0</sub> ditolak, artinya rata-rata parameter pemesinan yang diteliti pada level satu tidak sama dengan rata-rata parameter pemesinan yang diteliti pada level dua. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa parameter pemesinan yang diteliti memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons MRPI.

### 3.3 Langkah-langkah Percobaan

Langkah-langkah pelaksanaan percobaan yang akan dilaksanakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

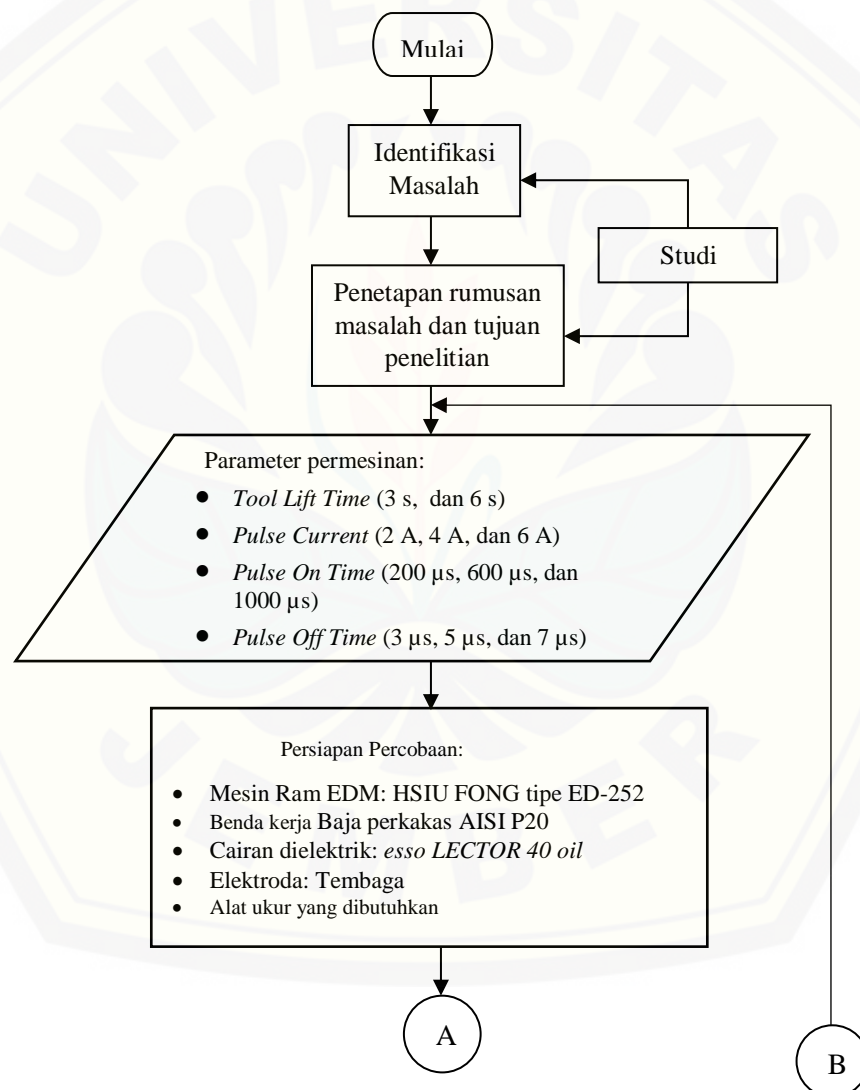
- a. Mempersiapkan peralatan, benda kerja dan elektroda:
  - 1) Menyiapkan elektroda seperti Gambar 3.2 dengan menggunakan mesin bubut;
  - 2) Ukur diameter awal elektroda sebelum proses permesinan dilakukan;
  - 3) Potong benda kerja seperti Gambar 3.3 sesuai dengan ukuran yang akan diujikan;
  - 4) Menghaluskan permukaan benda kerja dengan mesin bubut untuk meratakan permukaan benda kerja;
  - 5) Membersihkan benda kerja dan elektroda dari kotoran-kotoran yang bersifat isolator yang dapat menghambat proses pembuangan material;
  - 6) Timbang benda kerja sebelum proses pembuangan material dilakukan.
- b. Memasang elektroda pada *holder* mesin EDM kemudian dikencangkan dan atur kelurusannya menggunakan *dial indikator*;
- c. Memasang benda kerja pada meja mesin EDM kemudian dikencangkan;
- d. Menyentuhkan elektroda dan benda kerja sampai ada tanda alarm berbunyi;
- e. Mengatur kedalaman pemakanan z dengan mengatur *dial indicator* yang terdapat pada bagian atas mesin;
- f. Mengatur titik referensi pada benda kerja dengan menyentuhkan elektroda ke benda kerja dan putar eretan sesuai diameter benda kerja dan elektroda;
- g. Mengatur parameter permesinan pada mesin EDM sesuai dengan rancangan percobaan yang telah ditetapkan;
- h. Melakukan proses pembuangan material sesuai dengan urutan percobaan yang telah ditetapkan pada Tabel 3.6, 3.7 dan 3.8;
- i. Mencatat waktu yang dibutuhkan untuk meraut benda kerja sedalam z untuk masing-masing percobaan;
- j. Matikan mesin kemudian melepas dan membersihkan benda kerja dari cairan dielektrik yang dapat menyebabkan karat setelah proses pembuangan material;
- k. Timbang berat benda kerja setelah proses pembuangan material dilakukan;



- l. Mengukur diameter hasil pemotongan dengan menggunakan *profile projector*;
- m. Hitung laju pembuangan material dan ketelitian ukuran menggunakan persamaan 2.1 dan catat pada Tabel 3.9.

### 3.4 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan agar penelitian lebih fokus dan terarah pada tujuan penelitian. Tahapan yang dilakukan pada penelitian ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Diagram alir metode penelitian

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Hasil percobaan, proses optimasi dan analisis hasil menunjukkan bahwa dari penelitian yang berjudul “Optimasi Parameter Permesinan pada *Electrical Discharge Machining* (EDM) Baja Perkakas AISI P20 Menggunakan Metode Tahuchi-*Fuzzy*” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Kontribusi dari parameter permesinan yang paling signifikan dalam menghasilkan laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal secara berurutan dipengaruhi oleh *Pulse current* ( $I_p$ ) memberikan kontribusi sebesar 79,3%, parameter *Pulse on time* ( $T_{on}$ ) memberikan kontribusi sebesar 10,3%, parameter *Pulse off time* ( $T_{off}$ ) memberikan kontribusi sebesar 3,0% dan terakhir parameter *Tool lift time* ( $T_{up}$ ) memberikan kontribusi sebesar 2,6%.
- b. Pengaturan parameter permesinan pada proses EDM yang dapat menghasilkan respons laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimum adalah *Tool lift time* ( $T_{up}$ ) pada level 1 yaitu 3 s, *Pulse current* ( $I_p$ ) pada level 3 yaitu 6 A, *Pulse on time* ( $T_{on}$ ) pada level 2 yaitu 600  $\mu$ s dan *Pulse off time* ( $T_{off}$ ) pada level 1 yaitu 3  $\mu$ s.
- c. Harga laju pembuangan material dan ketelitian ukuran optimum yang didapatkan setelah dilakukan optimasi secara berurutan yaitu sebesar 49,597  $\text{mm}^3/\text{min}$  dan 0,350 mm.

### 5.2 Saran

Metode optimasi multi respons yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Taguchi-*Fuzzy*, pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai bahan perbandingan. Beberapa parameter masih dianggap konstan sehingga untuk penelitian selanjutnya menggunakan parameter permesinan yang belum digunakan dan level parameter permesinan dengan rentang yang berbeda sehingga didapatkan hasil laju pembuangan material dan ketelitian ukuran yang optimal.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Astakhov, V. P., dan J. C. Outeiro. 2007. *Machining: Fundamentals and Recents Advances*. Aveiro: Department of Mechanical Engineering University of Aveiro.
- Badan Pusat Statistik. 2017. *Pembangunan Indeks Produksi Industri Manufaktur 2015-2017*. November. Jakarta: BPS Jakarta-Indonesia.
- Bagiasna, K. 1987. *Proses-proses Permesinan Non Konvensional*. Bandung: Departemen Teknik Mesin ITB.
- Barenji, R. V., H. H. Pourasi, dan V. M. Khojastehnezhad. 2016. Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: Prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio. *Precision Engineering*. 45: 435-444.
- Bhattacharyya, G. K., dan R. A. Johnson. 1977. *Statistical Concept and Methods*. Edisi Pertama. New York: Wiley.
- Darsin, M. 2006. *Proses Produksi: Pemesinan non-konvensional*. Jember: Badan Penerbit Universitas Jember.
- Das, M. K., K. Kumar, T. K. Barman, dan P. Sahoo. 2014. Application of Artificial bee Colony Algorithm for Optimization of MRR and Surface Roughness in EDM of EN31 tool steel. *Procedia Materials Science*. 6: 741-751.
- Dehnad, K. 1989. *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*. Edisi Pertama. Pacific Grove: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.
- Dewangan, S. K. 2010. Experimental Investigation of Machining Parameters for EDM Using U-shaped Electrode of AISI P20 Tool Steel. *Tesis*. Rourkela: Department of Mechanical Engineering National institute of technology.
- Dewangan, S., dan C. K Biswas. 2013. Optimisation of Machining Parameter using Grey relation analysis for EDM with impulse flushing. *Int. J. Mechanics and Manufacturing System*. 6(2):144-158.
- Dewangan, S., S. Gangopadhyay, dan C.K. Biswas. 2014. Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and Sensitivity Analysis. *Measurement* 63: 364-376.
- Dey, A., S. Debnath, dan K. M. Pandey. 2017. Optimization of electrical discharge machining process parameters for Al6061/cenosphere composite using grey-

- based hybrid approach. *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*. 27(5): 998-1010.
- Dhavamani, C., dan T. Alwarsamy. 2011. Review on Optimization of Machining Operation. *Internasional Journal of Academic Research*. 3(3): 476-485.
- Fisher, R. A., dan F. Yates. 1974. *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*. London: Longman Group Ltd.
- Indriani, L. 1997. Analisa Pengaruh Parameter Pemesinan terhadap Laju Pengerjaan Material pada Proses Wirecut Electrical Discharge Machine. *Tugas Akhir*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh November.
- Kalpakkian, S., dan S. R. Schmid. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology*. Edisi Keenam. New York: Pearson Education.
- Kohli, A., A. Wadhwa, T. Virmani, dan U. Jain. 2012. Optimization of Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining Using Fuzzy Logic. *Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 6(12): 2839-2844.
- Krar, S. F., dan A. F. Check. 1996. *Technology of Machine Tools*. Edisi Kelima. US: McGraw-Hill Inc.
- Kumar, D., N. Beri, dan A. Kumar. 2011. Study of Overcut during Electric Discharge Machining of Hastelloy Steel with different Electrodes using the taguchi method. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. 2(1): 306-312.
- Kumar, N., L. Kumar, H. Tewatia, dan R. Yadav. 2012. Comparative Study for MRR on Die-Sinking EDM Using Electrode of Copper & Graphite. *International Journal of Advanced Engineering Technology & Engineering Research*. 2(2): 170-174
- Lin, J. L., dan C. L. Lin. (2002). The use of orthogonal array with grey relation analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. *Intenational Journal of Machine Tools and Manufacture* 42(2). 237-244.
- Pandey, P. C., dan H. S. Shan. 1980. *Modern Machining Processes*. New Delhi: Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited.
- Park, S. H. 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. Edisi Pertama. London: Chapman & Hall.



- Prayogo, G. S., N. Lusi, dan D. R. Pamuji. 2016. Optimasi Multirespon pada Proses EDM Sinking Baja ST 42 dengan menggunakan metode taguchi dan fuzzy logic. *ROTOR*. 9(2): 88-93.
- Prayogo, G. S. 2010. Optimasi Parameter Permesinan terhadap Laju Pembuangan Material dan Ketelitian Ukuran (*OVERCUT*) pada Proses *Electrical Discharge Machining* (EDM). *Skripsi*. Jember: Program Studi Teknik Mesin Universitas Jember.
- Purnomo, D. A. 2015. Optimasi Multi Respon pada Proses Pemesinan Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Baja Perkakas Buderus 2080 dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy. *Tesis*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri ITS.
- Ratnawati, D. A. 2011. *Fuzzy logic controler (FLC), Jaringan Saraf tiruan (JST), Algoritma Genetik (AG) dan Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Ross, P. J. 1988. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Santoki, P. N. 2015. A Review - Status of Recent Developments & Effect of Machining Parameters on Performance Parameters in EDM. *Internasional Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*. 2(1): 32-41
- Santoki, P. N. 2015. Parametric Study For Overcut Using EDM With Tool of Graphite, Copper & Silver. *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*. 2(3): 31-38.
- Schey, J. A. 1987. *Introduction to Manufacturing Processes*. Edisi Kedua. New York : McGraw-Hill Education.
- Shashikant, A., K. Roy, dan K. Kumar. 2014. Optimization of Machine Process Parameters on Overcut in EDM for EN19 Material using RSM. *International Journal of Current Engineering and Technology*. ISSN 2277 – 4106: 50-53.
- Singh, P., N. Beri, dan A. Mahajan. 2012. Determination of best parameter setting for Overcut during Electrical Discharge Machining of H-13 tool steel using taguchi method. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. 3(4): 101-103.
- Soejanto, I. 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Sommer, C., dan S. Sommer. 2005. *Complete EDM handbook*. Houston: Advance Publishing Inc.



- Sulistiyawan, E. 2015. Analisis Optimasi Ketelitian Dimensi, Kekasaran Permukaan dan Laju Keausan Elektrode pada Proses Electric Discharge Machining dengan metode taguchi multi respon. *J Statistika*. 7: 43-56.
- Sultan, T., A. Kumar, dan R. D. Gupta. 2014. Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, and Surface Roughness Evaluation in Die Sinking EDM with Hollow Tool through Response Surface Methodology. *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2014: 16 halaman.
- Tiwari, S. 2013. Effect of Different Process Parameters on Over Cut in Optimizing of Electrical Discharge Machining (EDM) Process. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2(7): 1796-1799.
- Universitas Jember. 2016. *Pedoman Penulisan Karya Ilmiah*. Jember: Badan Penerbit Universitas Jember.
- Widarto. 2008. *Teknik Pemesinan*. Edisi Pertama. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Yahya, A., T. Andromeda, A. Baharom, A. A. Rahim, dan N. Mahmud. 2011. Material Removal Rate Prediction of Electrical Discharge Machining Process Using Artificial Neural Network. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 1: 298-302.

LAMPIRAN

Lampiran 6.1 Data spesifikasi mesin EDM



ITEM	UNIT	ED - 252
Work tank volume (W × D × H)	mm (in)	770 × 510 × 270 (30 5/16 × 20 1/16 × 10 5/8)
Max. workpiece weight	kgs (lbs)	500 (1100)
Work table area (L × W)	mm (in)	600 × 300 (23 5/8 × 11 13/16)
Travel (X,Y Axes)	mm (in)	300 × 200 (11 13/16 × 7 7/8)
Quill stroke	mm (in)	150 (5 7/8)
Type of servo motor		DC SERVO MOTOR
Machine head stroke	mm (in)	200 (7 7/8)
Max. electrode load	kgs (lbs)	60 (132)
Distance between working table and electrode holder plate	mm (in)	150 - 500(5 7/8 - 19 11/16)
Size of electrode holder plate	mm (in)	150 × 80 (5 7/8 × 3 1/8)
Machine weight	kgs (lbs)	1060 (2332)
Machine Installation Dimensions (including generator) (W × D × H)	mm (in)	1600 × 1000 × 2000 (63 × 39 3/8 × 78 3/4)
Max. workpiece dimensions (W × D × H)	mm (in)	600 × 300 × 240 (23 5/8 × 11 13/16 × 9 7/16)

Sumber: *Instruction manual book EDM HSIU FONG ED-252*

## Lampiran 6.2 Data waktu proses pemotongan

Komb.	Parameter permesinan				Waktu (m)			Berat awal (g)			Berat akhir (g)			MRR (mm <sup>3</sup> /m)			$\bar{x}$
	Tup	Ip	Ton	Toff	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	
1	3	2	200	3	50,36	51,43	51,48	248,69	256,66	269,83	247,43	255,64	268,76	3,21	2,54	2,66	2,805
2	3	2	600	5	42,58	42,08	39,32	247,43	257,71	271	246,13	256,66	269,83	3,91	3,20	3,81	3,643
3	3	2	1000	7	88,33	65,36	70,32	250,74	251,8	268,88	249,34	250,79	267,84	2,03	1,98	1,90	1,970
4	3	4	200	3	17,06	14,49	16,12	249,54	299,35	251,73	248,52	298,41	250,57	7,67	8,32	9,23	8,403
5	3	4	600	5	10,53	8,04	12	251,8	254,6	253,14	250,62	253,49	251,73	14,37	17,70	15,06	15,710
6	3	4	1000	7	10,5	9,31	10,23	250,62	242,07	256,57	249,31	240,83	255,34	16,00	17,08	15,41	16,162
7	3	6	200	5	9,56	9,16	10,1	285,7	243,03	238,61	284,72	242,07	237,6	13,14	13,44	12,82	13,133
8	3	6	600	7	5,49	4,5	6,05	284,72	249,24	287,52	283,4	247,94	286,2	30,83	37,04	27,97	31,945
9	3	6	1000	3	3,2	3,1	3,42	255,24	240,64	257,66	253,85	239,32	256,15	55,69	54,59	56,61	55,628
10	6	2	200	7	76,58	81,58	104,05	253,85	263,51	236,32	252,84	262,62	235,35	1,69	1,40	1,20	1,428
11	6	2	600	3	40,23	39,23	43,21	257,69	252,84	267,84	256,61	251,8	266,69	3,44	3,40	3,41	3,418
12	6	2	1000	5	84,41	78,07	90,26	256,61	262,62	235,35	255,59	261,58	234,13	1,55	1,71	1,73	1,663
13	6	4	200	5	25	24,32	21,49	256,18	247,94	247,7	255,22	246,93	246,79	4,92	5,32	5,43	5,225
14	6	4	600	7	13,42	15,22	16,4	255,22	241,77	239,75	254,03	240,64	238,61	11,37	9,52	8,91	9,933
15	6	4	1000	3	8,22	7,18	8,47	251,85	255,4	256,15	250,62	254,21	254,77	19,18	21,25	20,89	20,440
16	6	6	200	7	13,58	14,41	15,49	250,62	298,41	286,2	249,55	297,24	285	10,10	10,41	9,93	10,148
17	6	6	600	3	4,45	4,12	5,03	250,86	254,21	255,34	249,65	253,07	253,88	34,86	35,47	37,21	35,849
18	6	6	1000	5	5,09	5,15	4,57	249,65	255,8	248,9	248,26	254,6	247,7	35,01	29,87	33,66	32,849

**Lampiran 6.3 Data lebar pemotongan**

Komb.	Parameter permesinan				Lebar pemotongan (mm)			Ketelitian ukuran			$\bar{x}$
	Tup	Ip	Ton	Toff	R1	R2	R3	R1	R2	R3	
1	3	2	200	3	15,16	15,06	15,18	0,16	0,06	0,18	0,133
2	3	2	600	5	15,1	15,23	15,23	0,1	0,23	0,23	0,187
3	3	2	1000	7	15,16	15,16	15,14	0,16	0,16	0,14	0,153
4	3	4	200	3	15,16	15,18	15,17	0,16	0,18	0,17	0,170
5	3	4	600	5	15,25	15,27	15,26	0,25	0,27	0,26	0,260
6	3	4	1000	7	15,22	15,25	15,26	0,22	0,25	0,26	0,243
7	3	6	200	5	15,36	15,33	15,29	0,36	0,33	0,29	0,327
8	3	6	600	7	15,35	15,36	15,32	0,35	0,36	0,32	0,343
9	3	6	1000	3	15,43	15,33	15,42	0,43	0,33	0,42	0,393
10	6	2	200	7	15,1	15,04	15,09	0,1	0,04	0,09	0,077
11	6	2	600	3	15,17	15,13	15,18	0,17	0,13	0,18	0,160
12	6	2	1000	5	15,2	15,21	15,17	0,2	0,21	0,17	0,193
13	6	4	200	5	15,26	15,2	15,14	0,26	0,2	0,14	0,200
14	6	4	600	7	15,22	15,13	15,19	0,22	0,13	0,19	0,180
15	6	4	1000	3	15,28	15,22	15,27	0,28	0,22	0,27	0,257
16	6	6	200	7	15,27	15,29	15,23	0,27	0,29	0,23	0,263
17	6	6	600	3	15,38	15,31	15,31	0,38	0,31	0,31	0,333
18	6	6	1000	5	15,31	15,38	15,34	0,31	0,38	0,34	0,343

**Lampiran 6.4 Hasil percobaan konfirmasi kombinasi optimal**

Percobaan	Parameter permesinan				Waktu (min)	Berat awal (g)	Berat akhir (g)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)	Lebar pemotongan (mm)	Ketelitian ukuran (mm)
	Tup	Ip	Ton	Toff						
1	3	6	600	3	3,5	230,42	229,05	50,183	15,37	0,370
2	3	6	600	3	3,77	228,98	227,56	48,289	15,32	0,320
3	3	6	600	3	3,72	238,47	237,01	50,317	15,36	0,360
Rata-rata								49,597		0,350



**Lampiran 6.5 Analisis individu laju pembuangan material (MRR)**

Analisis variansi rata-rata untuk MRR

Parameter permesinan	DF	SS	MS	F	P <sub>value</sub>	ρ
T <sub>up</sub>	1	44,95	44,95	0,89	0,368	0%
I <sub>p</sub>	2	2309,19	1154,60	22,81	0,000	57,2%
T <sub>on</sub>	2	665,99	332,99	6,58	0,015	14,6%
T <sub>off</sub>	2	331,74	167,87	3,28	0,080	5,9%
Residual	10	506,12	50,61			22,3%
Total	17	3857,99				100%

Contoh perhitungan persen kontribusi untuk parameter permesinan I<sub>p</sub>

$$SS'_{I_p} = SS_{I_p} - df_{I_p} \cdot MS_{Res}$$

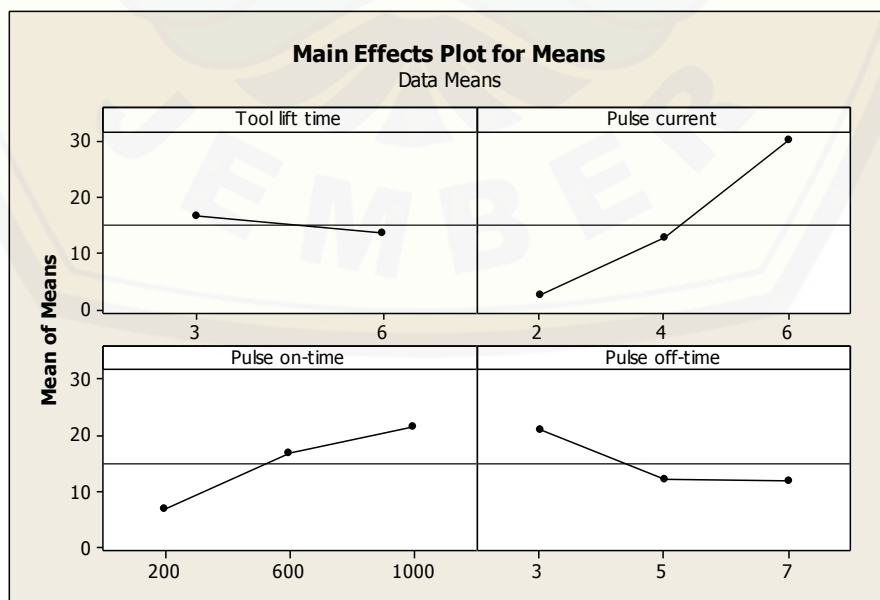
$$SS'_{I_p} = 2309,19 - 2 \times 50,61$$

$$SS'_{I_p} = 2207,97$$

$$\rho_{I_p} = \frac{SS'_{I_p}}{SS_T} \times 100\%$$

$$\rho_{I_p} = \frac{2207,97}{3857,99} \times 100\%$$

$$\rho_{I_p} = 57,2\%$$



Gambar plot nilai rata-rata MRR pada masing-masing level dari parameter permesinan

**Lampiran 6.6 Analisis individu ketelitian ukuran (*overcut*)**

Analisis variansi rata-rata untuk ketelitian ukuran

Parameter permesinan	DF	SS	MS	F	P <sub>value</sub>	ρ
T <sub>up</sub>	1	0,002297	0,002297	8,50	0,015	1,6%
I <sub>p</sub>	2	0,103116	0,051558	190,78	0,000	79,6%
T <sub>on</sub>	2	0,015072	0,007536	27,88	0,000	11,3%
T <sub>off</sub>	2	0,005631	0,002815	10,42	0,004	3,9%
Residual	10	0,002702	0,000270			3,6%
Total	17	0,128818				100%

Contoh perhitungan persen kontribusi untuk parameter permesinan I<sub>p</sub>

$$SS'_{I_p} = SS_{I_p} - df_{I_p} \cdot MS_{Res}$$

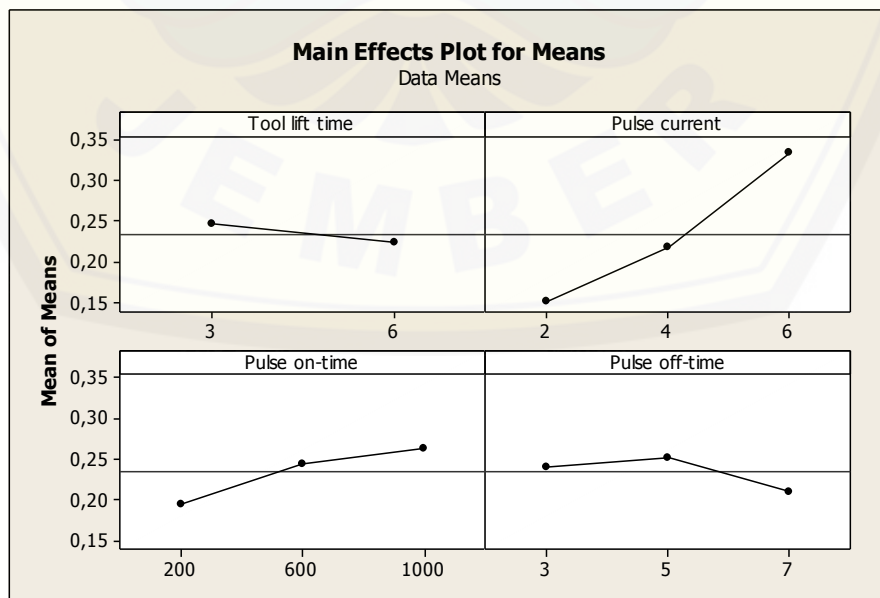
$$SS'_{I_p} = 0,103116 - 2 \times 0,000270$$

$$SS'_{I_p} = 0,102576$$

$$\rho_{I_p} = \frac{SS'_{I_p}}{SS_T} \times 100\%$$

$$\rho_{I_p} = \frac{0,102576}{0,128818} \times 100\%$$

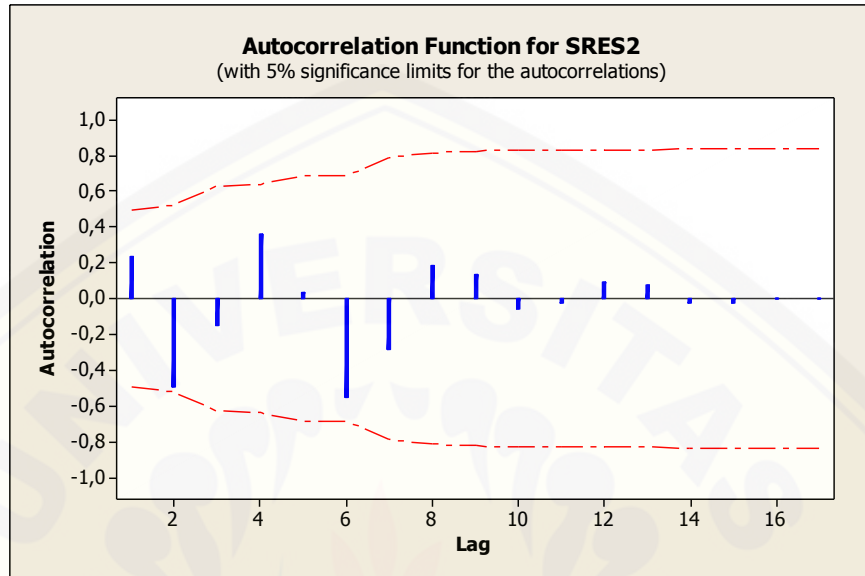
$$\rho_{I_p} = 79,6\%$$



Gambar plot nilai rata-rata *overcut* pada masing-masing level dari parameter permesinan

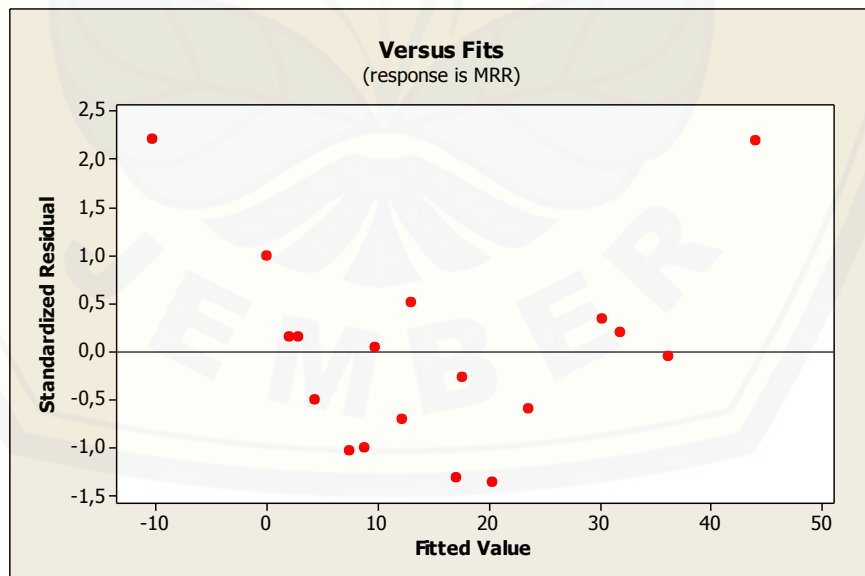
**Lampiran 6.7 Pengujian residual laju pembuangan material (MRR)**

a. Uji independen



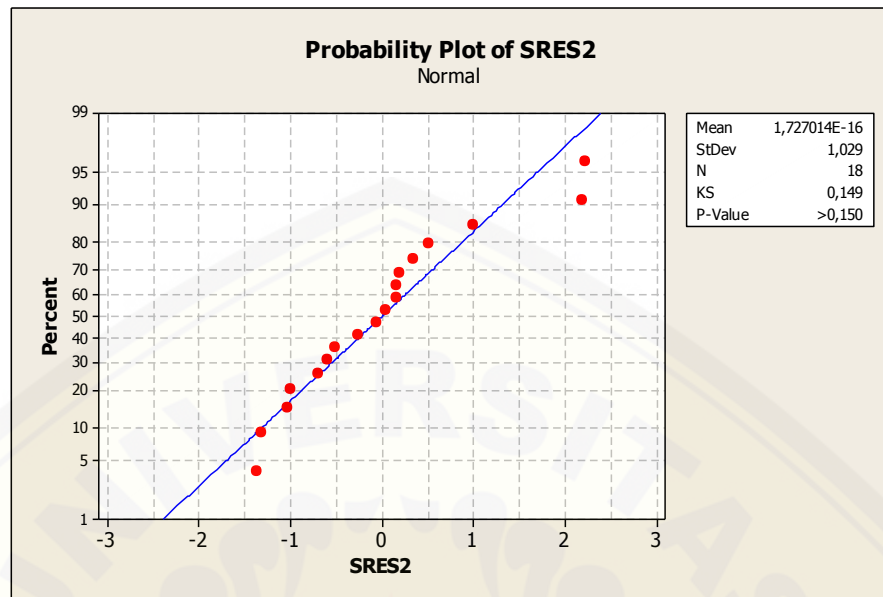
Gambar plot ACF respons MRR

b. Uji homogenitas



Gambar plot uji identik respons MRR

## c. Uji kenormalan

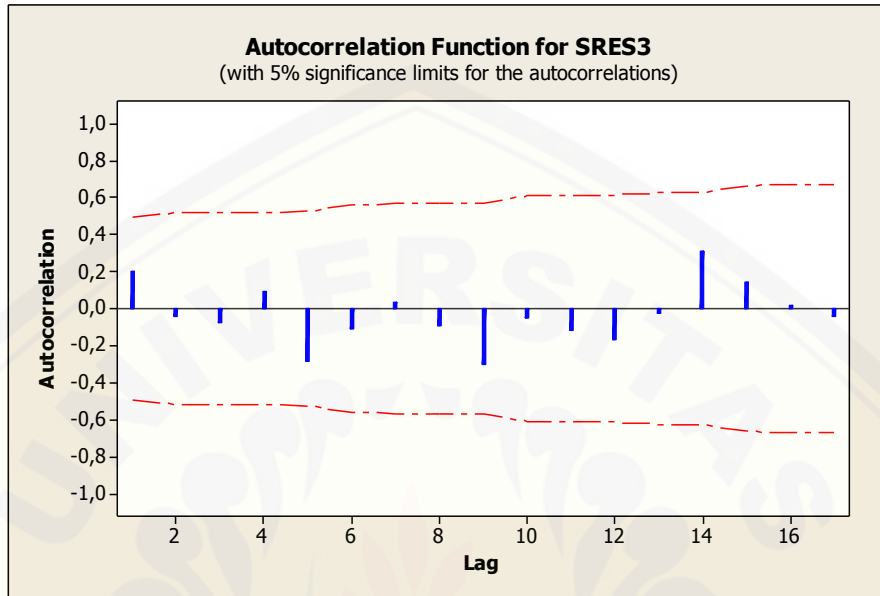


Gambar plot uji distribusi normal respons MRR

Nilai  $p_{value}$  lebih besar dari  $\alpha=0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data laju pembuangan material telah terdistribusi normal.

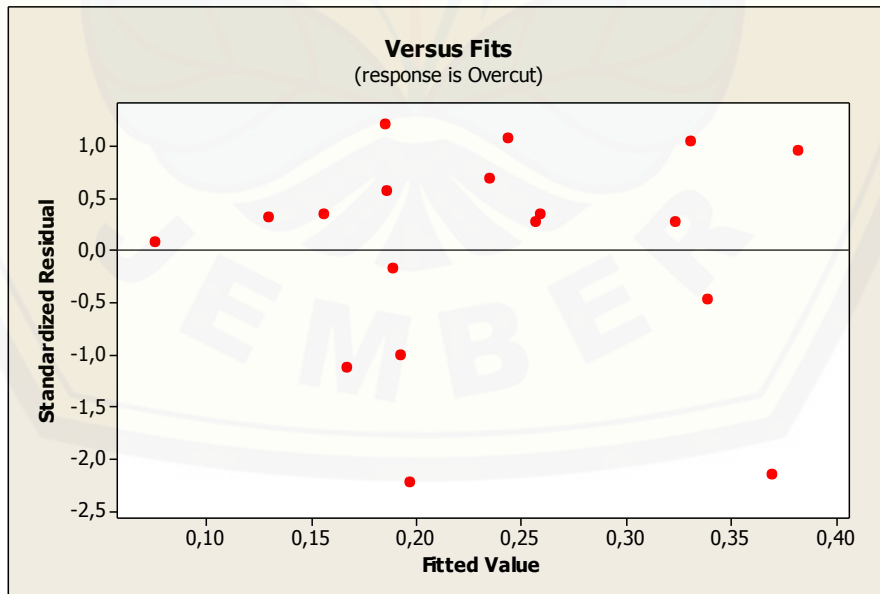
**Lampiran 6.8 Pengujian residual ketelitian ukuran (*overcut*)**

a. Uji independen



Gambar plot ACF respons ketelitian ukuran

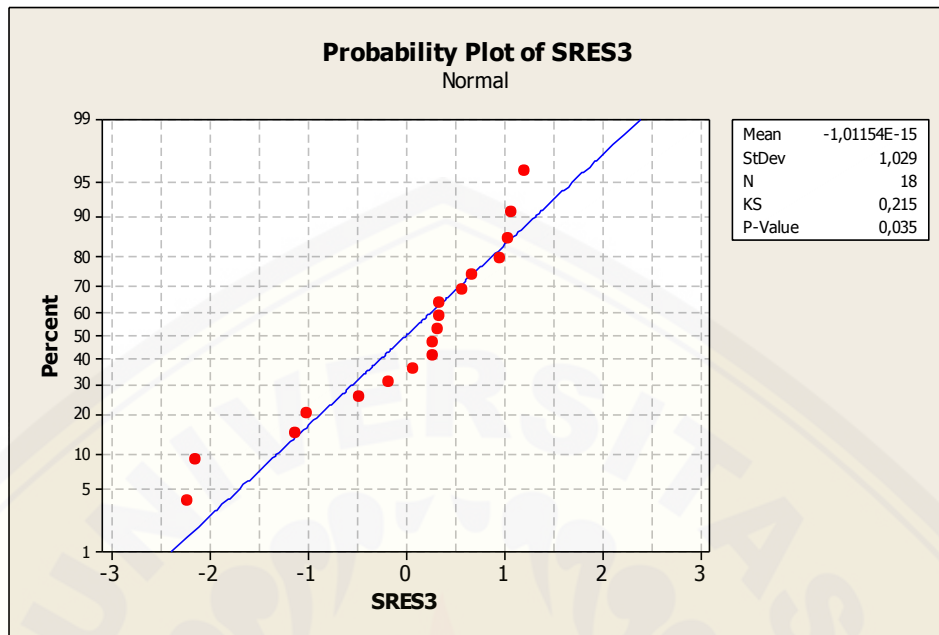
b. Uji homogenitas



Gambar plot uji identik respons ketelitian ukuran



## c. Uji kenormalan



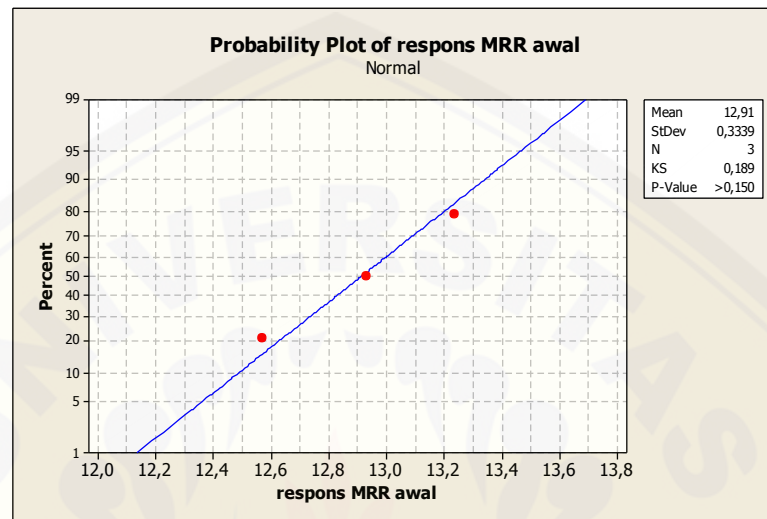
Gambar plot uji distribusi normal respons ketelitian ukuran

Nilai Kolmogorov hitung =  $0,215 \leq$  Kolmogorov tabel =  $0,309$ ,  $\alpha = 0,05$  dan  $n=18$ , maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data ketelitian ukuran telah terdistribusi normal.

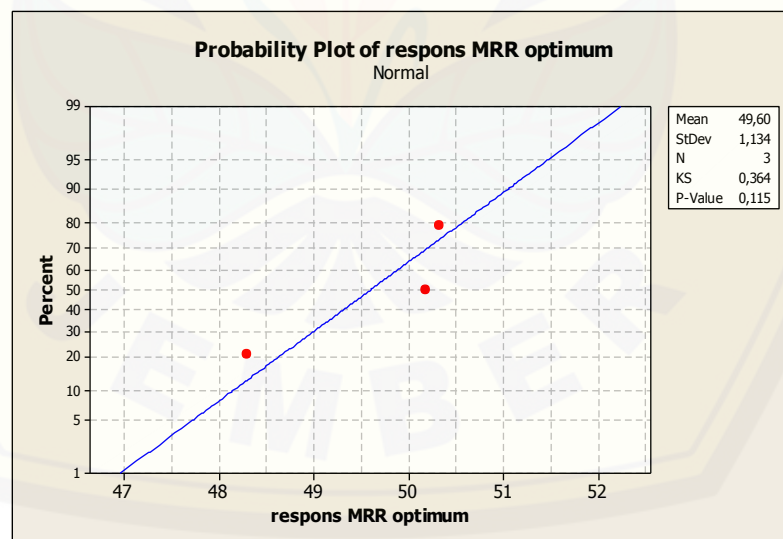
**Lampiran 6.9 Uji kesamaan rata-rata MRR kombinasi awal dan optimum**

Langkah-langkah dari uji kesamaan rata-rata adalah sebagai berikut:

- a. Uji kenormalan data



Gambar *probability plot* MRR kombinasi awal



Gambar *probability plot* MRR kombinasi optimum

Nilai *P-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data laju pembuangan material kombinasi awal dan kombinasi optimum adalah terdistribusi normal.

b. Uji kesamaan variansi

**Test and CI for Two Variances: respons MRR awal; respons MRR optimum**

Method

Null hypothesis       $\text{Sigma}(\text{respons MRR awal}) / \text{Sigma}(\text{respons MRR optimum}) = 1$   
 Alternative hypothesis  $\text{Sigma}(\text{respons MRR awal}) / \text{Sigma}(\text{respons MRR optimum}) \text{ not} = 1$   
 Significance level     $\text{Alpha} = 0,05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
respons MRR awal	3	0,334	0,111
respons MRR optimum	3	1,134	1,286

Ratio of standard deviations = 0,294  
 Ratio of variances = 0,087

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for	
	CI for Ratio	StDev Ratio
Normal	(0,047; 1,839)	(0,002; 3,381)
Continuous	( *; * )	( *; * )

Tests

Method	Test			
	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	0,09	0,160
Levene's Test (any continuous)	1	4	0,53	0,505

Nilai *P-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data laju pembuangan material pada kombinasi awal dan kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c. Uji kesamaan rata-rata

Two-sample T for respons MRR awal vs respons MRR optimum

	N	Mean	StDev	SE Mean
respons MRR awal	3	12,913	0,334	0,19
respons MRR optimum	3	49,60	1,13	0,65

Difference =  $\mu$  (respons MRR awal) -  $\mu$  (respons MRR optimum)  
Estimate for difference: -36,684  
95% CI for difference: (-38,579; -34,789)  
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -53,75 P-Value = 0,000 DF = 4  
Both use Pooled StDev = 0,8359

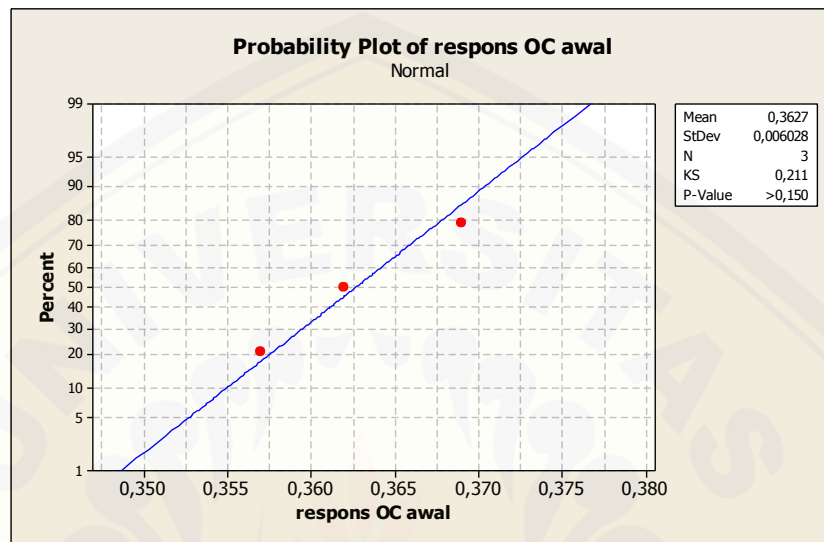
Nilai *P-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data laju pembuangan material pada kombinasi awal dan kombinasi optimum adalah berbeda.



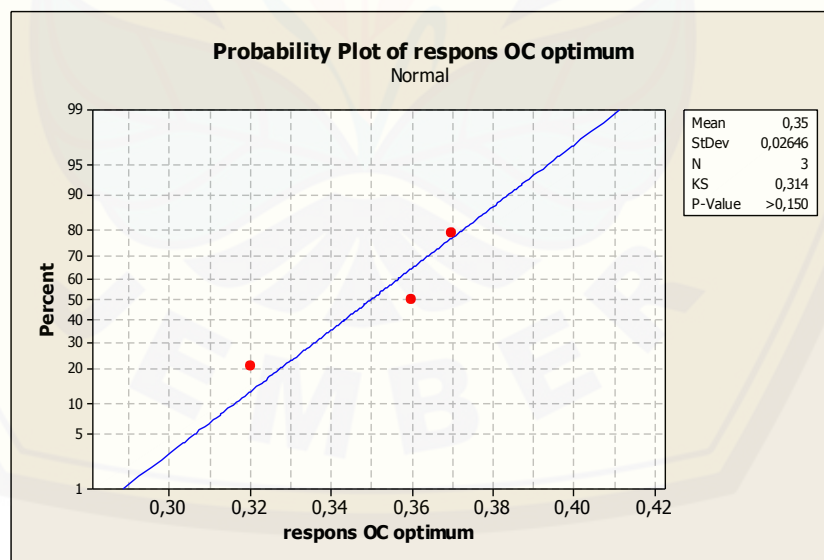
**Lampiran 6.10 Uji kesamaan rata-rata *overcut* kombinasi awal dan optimum**

Langkah-langkah dari uji kesamaan rata-rata adalah sebagai berikut:

a. Uji kenormalan data



Gambar probability plot overcut kombinasi awal



Gambar probability plot overcut kombinasi optimum



Nilai *P-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data laju pembuangan material kombinasi awal dan kombinasi optimum adalah terdistribusi normal.

b. Uji kesamaan variansi

**Test and CI for Two Variances: respons OC awal; respons OC optimum**

Method

Null hypothesis       $\text{Sigma}(\text{respons OC awal}) / \text{Sigma}(\text{respons OC optimum}) = 1$   
 Alternative hypothesis  $\text{Sigma}(\text{respons OC awal}) / \text{Sigma}(\text{respons OC optimum}) \text{ not } = 1$   
 Significance level     $\text{Alpha} = 0,05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
respons OC awal	3	0,006	0,000
respons OC optimum	3	0,026	0,001

Ratio of standard deviations = 0,228  
 Ratio of variances = 0,052

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for	
	CI for StDev Ratio	Variance Ratio
Normal Continuous	(0,036; 1,423)	(0,001; 2,024)
	( *; * )	( *; * )

Tests

Method	Test			
	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	0,05	0,099
Levene's Test (any continuous)	1	4	1,08	0,358

Nilai *P-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data ketelitian ukuran pada kombinasi awal dan kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c. Uji kesamaan rata-rata

Two-sample T for respons OC awal vs respons OC optimum

	N	Mean	StDev	SE Mean
respons OC awal	3	0,36267	0,00603	0,0035
respons OC optimum	3	0,3500	0,0265	0,015
Difference = mu (respons OC awal) - mu (respons OC optimum)				

Estimate for difference: 0,0127

95% CI for difference: (-0,0308; 0,0562)

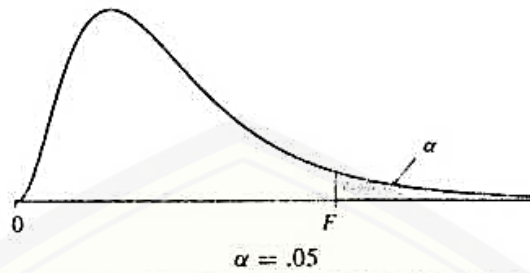
T-Test of difference = 1 (vs not =): T-Value = -63,02 P-Value = 0,000 DF = 4

Both use Pooled StDev = 0,0192

Nilai *P-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data ketelitian ukuran pada kombinasi awal dan kombinasi optimum adalah berbeda.



Lampiran 6.11 Tabel F statistik



$df_2$	$df_1$									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	$\infty$
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	238.9	243.9	249.0	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.37	19.41	19.45	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.84	8.74	8.64	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.04	5.91	5.77	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.82	4.68	4.53	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.15	4.00	3.84	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.73	3.57	3.41	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.44	3.28	3.12	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.23	3.07	2.90	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.07	2.91	2.74	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	2.95	2.79	2.61	2.40
12	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.85	2.69	2.50	2.30
13	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.77	2.60	2.42	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.70	2.53	2.35	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.64	2.48	2.29	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.59	2.42	2.24	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.55	2.38	2.19	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.51	2.34	2.15	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.48	2.31	2.11	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.45	2.28	2.08	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.42	2.25	2.05	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.40	2.23	2.03	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.38	2.20	2.00	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.36	2.18	1.98	1.73
25	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.34	2.16	1.96	1.71
26	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.32	2.15	1.95	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.30	2.13	1.93	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.44	2.29	2.12	1.91	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.54	2.43	2.28	2.10	1.90	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.27	2.09	1.89	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.18	2.00	1.79	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.52	2.37	2.25	2.10	1.92	1.70	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.02	1.83	1.61	1.25
$\infty$	3.84	2.99	2.60	2.37	2.21	2.09	1.94	1.75	1.52	1.00

Sumber: Fisher, R. A., dan F. Yates.1974. *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*. London: Longman Group Ltd.

Lampiran 6.12 Tabel nilai kritis uji Kolmogorov-Smirnov



$n$	$\alpha = 0,20$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,02$	$\alpha = 0,01$
1	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995
2	0,684	0,776	0,842	0,900	0,929
3	0,565	0,636	0,708	0,785	0,829
4	0,493	0,565	0,624	0,689	0,734
5	0,447	0,509	0,563	0,627	0,669
6	0,410	0,468	0,519	0,577	0,617
7	0,381	0,436	0,483	0,538	0,576
8	0,359	0,410	0,454	0,507	0,542
9	0,339	0,387	0,430	0,480	0,513
10	0,323	0,369	0,409	0,457	0,486
11	0,308	0,352	0,391	0,437	0,468
12	0,296	0,338	0,375	0,419	0,449
13	0,285	0,325	0,361	0,404	0,432
14	0,275	0,314	0,349	0,390	0,418
15	0,266	0,304	0,338	0,377	0,404
16	0,258	0,295	0,327	0,366	0,392
17	0,250	0,286	0,318	0,355	0,381
18	0,244	0,279	0,309	0,346	0,371
19	0,237	0,271	0,301	0,337	0,361
20	0,232	0,265	0,294	0,329	0,352
21	0,226	0,259	0,287	0,321	0,344
22	0,221	0,253	0,281	0,314	0,337
23	0,216	0,247	0,275	0,307	0,330
24	0,212	0,242	0,269	0,301	0,323
25	0,208	0,238	0,264	0,295	0,317
26	0,204	0,233	0,259	0,290	0,311
27	0,200	0,229	0,254	0,284	0,305
28	0,197	0,225	0,250	0,279	0,300
29	0,193	0,221	0,246	0,275	0,295
30	0,190	0,218	0,242	0,270	0,290
35	0,177	0,202	0,224	0,251	0,269
40	0,165	0,189	0,210	0,235	0,252
45	0,156	0,179	0,198	0,222	0,238
50	0,148	0,170	0,188	0,211	0,226
55	0,142	0,162	0,180	0,201	0,216
60	0,136	0,155	0,172	0,193	0,207
65	0,131	0,149	0,166	0,185	0,199
70	0,126	0,144	0,160	0,179	0,192
75	0,122	0,139	0,154	0,173	0,185
80	0,118	0,135	0,150	0,167	0,179
85	0,114	0,131	0,145	0,162	0,174
90	0,111	0,127	0,141	0,158	0,169
95	0,108	0,124	0,137	0,154	0,165
100	0,106	0,121	0,134	0,150	0,161

## Pendekatan

$n$	$1,07/\sqrt{n}$	$1,22/\sqrt{n}$	$1,35/\sqrt{n}$	$1,52/\sqrt{n}$	$1,63/\sqrt{n}$
200	0,076	0,086	0,096	0,107	0,115




## Lampiran 6.13 Surat keterangan penelitian

	PEMERINTAH PROVINSI JAWA TIMUR DINAS PERINDUSTRIAN DAN PERDAGANGAN <b>UPT INDUSTRI LOGAM DAN PEREKAYASAAN SIDOARJO</b> Jl. Raya Trosobo Km 20 Taman Telp; (031) 7884333, 7882610, Fax (031) 7875197, E-mail: bptlik@yahoo.com SIDOARJO 61257.	
	<hr/>	
Nomor	: 423.4 / 1034/125.7.03/2018	Sidoarjo, 08 Juni 2018
Sifat	: Penting	
Lampiran	: -	Kepada
Perihal	: <b>Penelitian Skripsi</b>	Yth. Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember di-
		<b>JEMBER</b>
<p>Sehubungan dengan surat Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember, nomor : 1566/UN25.11/EP/2018, tanggal 14 Maret 2018 perihal Ijin Penelitian Skripsi, serta menyusuli surat kami nomor : 423.4/458/125.7.03/2018 tanggal 28 Maret 2018 perihal Ijin Penelitian Skripsi, bersama ini di sampaikan bahwa nama tersebut di bawah ini:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rizqi Nur Muhammad NIM 141910101002</li> <li>2. Haris Naqihul Adib NIM 141910101050</li> </ol> <p>Telah selesai melakukan penelitian di UPT Industri Logam dan Perekayasaan Sidoarjo, mulai tanggal 08 Mei 2018 s/d 08 Juni 2018.</p> <p>Selanjutnya kami mohon laporan hasil penelitian mahasiswa tersebut dapat ditembuskan kepada kami sebagai bahan untuk evaluasi kami.</p> <p>Demikian agar maklum atas perhatian dan kerja samanya disampaikan terima kasih.</p>		
KEPALA UNIT PELAKSANA TEKNIS INDUSTRI LOGAM DAN PEREKAYASAAN SIDOARJO		
 <b>Drs. YANNEDI, MM</b> Pembina Tk. I NIP. 19630512 198603 1 027		
<b>Tembusan</b> 1. Yth Bpk. Kepala Dinas Perindustrian		



## Lampiran 6.14 Sertifikat material baja perkakas AISI P20

**ASSAB**  PT. ASSAB STEELS INDONESIA

---

## CERTIFICATE

**No: 637 / 618 S / 18**  
Issuing date : 14 - 05 - 2018  
Validity : One year upon date of issue  
If attached with " Surat Keterangan Material"


This is to certify that **ASSAB 618 S** we supply to **Bpk. Rizki Nur Muhammad** is guaranteed to meet the specifications as mentioned below :

Typical Chemical Analysis :



**C 0.37 – Si 0.3 – Mn 1.4 – Cr 2.0 – Ni 1.0 – Mo 0.2**

**Delivery condition :**  
**Hardened & Tempered to approx. 290-330 HB**

Typical Microstructure :



Issued by,



Susanti Dian Pertiwi  
Technical Manager

---

Jl. Rawagelam III No. 5 | Jakarta Industrial Estate Pulogadung | Jakarta Timur | 13930 Indonesia  
Ph: +62-21-461 1314 | Fax: +62-21-461 1306 | Email: assab@assabindonesia.co.id

**Lampiran 6.15 Alat dan bahan penelitian**



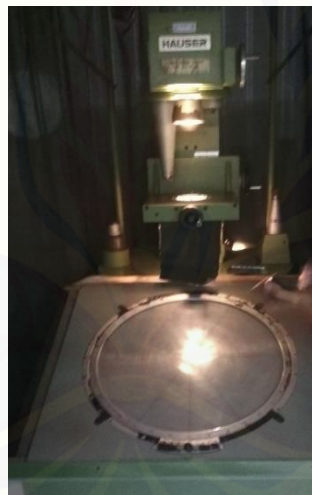
(a)



(b)

(a) Material benda kerja; (b) Material elektroda

Gambar bahan penelitian



Gambar mesin *profile projector*



Gambar neraca digital

**Lampiran 6.16 Proses pelaksanaan penelitian**

Gambar proses pengukuran berat awal benda kerja



(a)



(b)

(a) Proses pembubutan elektroda; (a) Proses pembubutan benda kerja

Gambar proses persiapan bahan penelitian



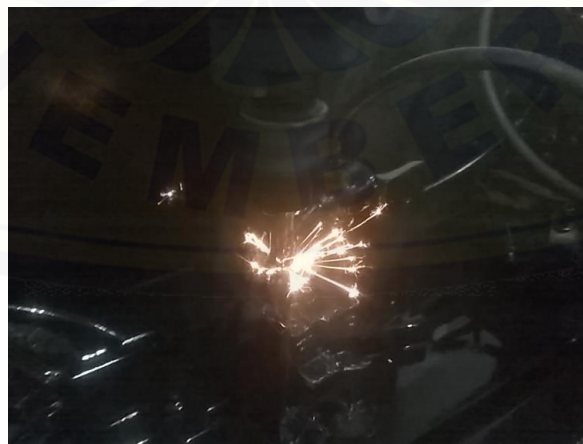
Gambar proses pengukuran hasil lebar pemotongan



Gambar proses pengaturan kedalaman pemakanan z



Gambar proses *set up* mesin EDM



Gambar proses pembuangan material



**Lampiran 6.17 Hasil penelitian**

(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Percobaan 15(R1); (b) Percobaan 2(R3); (c) Percobaan 4(R3); (d) Percobaan 7(R3)

Gambar hasil percobaan kombinasi parameter permesinan