



TESIS - TM 142501

**OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (EDM) *SINKING* MATERIAL BAJA PERKAKAS DAC DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-*GREY-FUZZY***

RAHAYU MEKAR BISONO  
NRP 2112201203

DOSEN PEMBIMBING  
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.  
Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



THESIS - TM 142501

**OPTIMIZATION OF MULTI-RESPONSE OF THE EDM  
SINKING PROCESS ON DAC TOOL STEEL USING  
TAGUCHI-GREY-FUZZY METHOD**

RAHAYU MEKAR BISONO  
NRP 2112201203

SUPERVISOR

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.  
Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA

MASTER PROGRAM  
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM  
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**RAHAYU MEKAR BISONO**

**NRP. 2112 201 203**

**Tanggal Ujian : 26 Januari 2015**

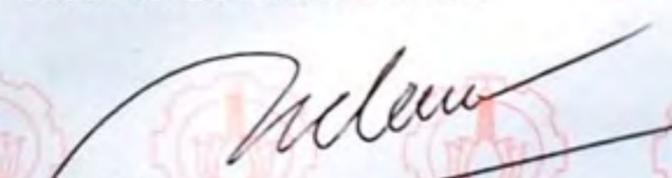
**Periode Wisuda : Maret 2015**

Disetujui oleh:



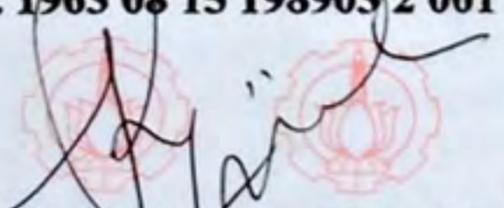
1. **Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.**  
**NIP. 1953 05 16 197803 1 001**

**(Pembimbing 1)**



2. **Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA.**  
**NIP. 1963 08 15 198903 2 001**

**(Pembimbing 2)**



3. **Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.**  
**NIP. 1973 03 22 200112 1 001**

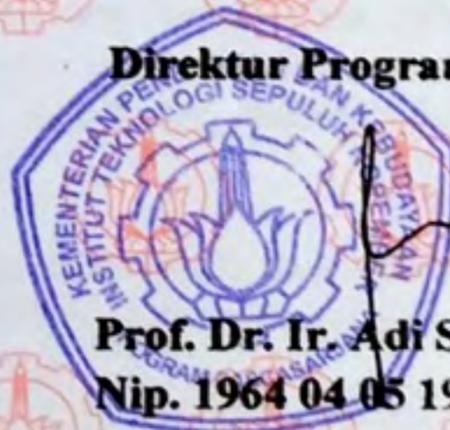
**(Penguji)**



4. **Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.**  
**NIP. 1960 06 23 198803 1 002**

**(Penguji)**

**Direktur Program Pascasarjana,**



**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.**

**Nip. 1964 04 05 199002 1 001**

# OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (EDM) *SINKING* MATERIAL BAJA PERKAKAS DAC DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY-FUZZY

Nama mahasiswa : Rahayu Mekar Bisono  
NRP : 2112201203  
Pembimbing : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D  
Co-Pembimbing : Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA

## ABSTRAK

Pada proses pemesinan EDM *sinking*, diperlukan pemilihan dan pengaturan variabel proses yang tepat agar kinerja proses pemesinan yang optimal dapat dicapai. Laju pengerjaan bahan, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan rasio keausan elektroda adalah beberapa variabel respon yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja dari proses pemesinan EDM *sinking*. Untuk memenuhi karakteristik kualitas dari masing-masing variabel respon yang diteliti, maka diperlukan penentuan dan pengaturan variabel proses yang tepat agar menghasilkan respon yang optimal. Karakteristik respon optimal yang digunakan adalah ‘semakin kecil semakin baik’ untuk respon kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan rasio keausan elektroda, sedangkan untuk respon laju pengerjaan bahan menggunakan karakteristik respon optimal ‘semakin besar semakin baik.’

Penelitian dilakukan dengan menggunakan material baja perkakas DAC dengan elektroda grafit. Rancangan percobaan menggunakan metode Taguchi dengan matriks ortogonal  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^3$ ). Variabel-variabel proses yang divariasikan adalah polaritas elektroda dengan dua level yaitu DCEN dan DCEP. Variabel *gap voltage* sebanyak tiga level yaitu 30 V, 40 V dan 50 V. Variabel *duty factor* sebanyak tiga level yaitu 0,3, 0,5 dan 0,7. Variabel *pulse current* sebanyak tiga level yaitu 6 A, 9 A dan 12 A. Penelitian dilakukan dengan dua replikasi. Optimasi pada laju pengerjaan bahan, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan rasio keausan elektroda dilakukan secara serentak dengan menggunakan metode *grey relational analysis* dan logika *fuzzy*.

Hasil penelitian menunjukkan kontribusi dari variabel-variabel proses dalam mengurangi variasi dari respon yang diamati secara serentak, secara berurutan adalah polaritas elektroda sebesar 46,41%, *gap voltage* sebesar 27,39%, *duty factor* sebesar 5,9% dan *pulse current* sebesar 5,48%. Dari hasil optimasi yang telah divalidasi dalam eksperimen konfirmasi, didapatkan kombinasi variabel proses yang menghasilkan nilai respon optimal yaitu polaritas elektroda pada positif, *gap voltage* pada 50 V, *duty factor* pada 0,5 dan *pulse current* pada 12 A.

Kata kunci: EDM *sinking*, kekasaran permukaan, laju pengerjaan bahan, lapisan *recast*, rasio keausan elektroda, Taguchi-*grey-fuzzy*

# **OPTIMIZATION OF MULTI-RESPONSE OF THE EDM SINKING PROCESS OF DAC TOOL STEEL USING TAGUCHI-GREY-FUZZY METHOD**

Student Name : Rahayu Mekar Bisono

NRP : 2112201203

Supervisor I : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D

Supervisor II : Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA

## **ABSTRACT**

In electrical discharge machining (EDM), it is important to select machining parameters for achieving optimal machining performance. Material removal rate, surface roughness, recast layer thickness and electrode wear ratio are some responses that used to evaluate the performance of EDM sinking process. The quality characteristic that used for surface roughness, recast layer thickness and electrode wear ratio is “smaller is better.” The quality characteristic for material removal rate is “larger is better.” This experiment was conducted by using DAC tool steel with graphite electrodes. Experimental design used in this study was an  $L_{18}$  orthogonal array. Optimization of multi-response was conducted by using combination of grey relational analysis and the fuzzy-based Taguchi method. The EDM sinking parameters (polarity, gap voltage, duty factor and pulse current) were optimized with considerations of multiple performance characteristics, i.e., material removal rate, surface roughness, recast layer thickness and electrode wear ratio. Polarity is the biggest contributing factors in reducing variation of the studied responses, followed by gap voltage, duty factor and pulse current. From the optimization result validated in the confirmation experiment, the process parameters combination that could produce the optimum responses are polarity at positive level, gap voltage 50 V, duty factor 0,5 and pulse current 12 A.

Keywords: EDM sinking, surface roughness, material removal rate, recast layer, electrode wear ratio, Taguchi-grey-fuzzy

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT., karena atas Rahmat dan Kuasa-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis dengan judul **“OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (EDM) *SINKING* MATERIAL BAJA PERKAKAS DAC DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-*GREY-FUZZY*”** disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan, dukungan dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis selama penyusunan tesis ini. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. dan Ibu Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA sebagai dosen pembimbing.
2. Bapak Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen penguji tesis.
3. Suamiku tercinta Hanif Yudhaputra, yang selalu memberi semangat dan motivasi.
4. Ibu dan Bapak tersayang, Kartini dan Budi Bisono, yang telah banyak memberikan dukungan, semangat dan serta doa restunya.
5. Kakak tersayang dan istri, Fipka dan Eva, yang menjadi inspirasi dan memberikan banyak dukungan.
6. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS atas bantuan dan dukungannya.
7. Teman-teman mahasiswa S2 Sistem Manufaktur angkatan 2012 dan 2013.
8. Staf Lab. Manufaktur PPNS.
9. Segenap keluarga besar Teknik Mesin ITS yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis mengharapkan agar tesis ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca dan penelitian selanjutnya. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan sehingga tesis ini bisa lebih sempurna.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL INDONESIA

HALAMAN JUDUL INGGRIS

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv

### BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.2.1 Batasan Masalah .....	4
1.2.2 Asumsi Penelitian .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Manfaat Penelitian .....	5

### BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 <i>Electrical Discharge Machining</i> (EDM) .....	7
2.2 Proses EDM <i>Sinking</i> .....	9
2.2.1 Variabel-variabel Proses pada EDM <i>Sinking</i> .....	12
2.2.2 Elektroda .....	13
2.2.3 Pembilasan Geram ( <i>Flushing</i> ) .....	16
2.2.4 Cairan Dielektrik .....	17
2.3 Lapisan <i>Recast</i> .....	18
2.4 Kekasaran Permukaan Benda Kerja .....	19
2.5 Laju Pengerjaan Bahan .....	23
2.6 Rasio Keausan Elektroda .....	24
2.7 Desain Eksperimen .....	25

2.8	Metode Taguchi .....	26
2.9	Pengujian Asumsi Residual .....	34
2.10	Metode Taguchi- <i>Grey-Fuzzy</i> .....	35
2.11	Interpretasi Hasil Eksperimen .....	42
2.12	Eksperimen Konfirmasi .....	45

### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

3.1	Tahapan Penelitian .....	45
3.2	Variabel Penelitian .....	47
3.3	Karakteristik Variabel Respon Optimal .....	48
3.4	Bahan dan Peralatan Penelitian .....	48
3.4.1	Bahan Penelitian .....	48
3.4.2	Peralatan Eksperimen .....	49
3.5	Rancangan Percobaan .....	52
3.5.1	Pengaturan Variabel Proses pada Mesin EDM <i>Sinking</i> .....	52
3.5.2	Pemilihan Matriks <i>Orthogonal</i> .....	52
3.6	Prosedur Pelaksanaan Percobaan .....	55
3.7	Pengukuran dan Pengambilan Data .....	57
3.7.1	Pengambilan Data Kekasaran Permukaan .....	57
3.7.2	Pengambilan Data Tebal Lapisan Recast .....	58
3.7.3	Pengambilan Data Laju Pengerjaan Bahan .....	58
3.7.4	Pengambilan Data Rasio Keausan Elektroda .....	58

### **BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

4.1	Data Hasil Percobaan .....	59
4.2	Perhitungan Rasio S/N .....	63
4.3	Normalisasi Rasio S/N .....	65
4.4	<i>Grey Relational Coefficient</i> (GRC) .....	66
4.5	<i>Fuzzification</i> .....	68
4.6	<i>Fuzzy Rules</i> .....	69
4.7	Penegasan ( <i>defuzzification</i> ) .....	72
4.8	Hasil Optimasi .....	74

4.9	Analisa Variansi dan Persen Kontribusi .....	75
4.10	Pengujian Asumsi Residual .....	78
4.10.1	Uji Independen .....	79
4.10.2	Uji Identik .....	79
4.10.3	Uji Kenormalan .....	80
4.11	Prediksi Respon Optimal .....	81
4.12	Percobaan Konfirmasi .....	82
4.13	Perbandingan antara Hasil Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum .....	85
4.14	Pembahasan .....	90
4.14.1	Pengaruh Variabel yang Signifikan Terhadap Respon Individu .....	90
4.14.2	Pengaruh Variabel yang Signifikan Terhadap Multi Respon	92

## **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan .....	95
5.2	Saran .....	95

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Proses Pembentukan Bunga Api Listrik pada Proses EDM Sinking .....	10
Tabel 2.2	Nilai Kekasaran yang Dicapai Oleh Beberapa Pengerjaan .....	22
Tabel 2.3	Angka Kekasaran dan Panjang Sampel Standar .....	23
Tabel 2.4	Matriks Ortogonal Standar untuk $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ .....	29
Tabel 2.5	Tabel Analisis Variansi (ANAVA) .....	30
Tabel 2.6	Penempatan Rasio S/N .....	36
Tabel 2.7	Respon <i>Grey Fuzzy Reasoning Grade</i> .....	41
Tabel 3.1	Total Derajat Kebebasan Variabel Proses dan Level .....	52
Tabel 3.2	Rancangan Eksperimen berdasarkan Matriks Ortogonal $L_{18}$ .....	53
Tabel 3.4	Rancangan Eksperimen berdasarkan Matriks Ortogonal $L_{18}$ Replikasi pertama .....	54
Tabel 3.5	Rancangan Eksperimen berdasarkan Matriks Ortogonal $L_{18}$ Replikasi kedua .....	55
Tabel 4.1	Data Hasil Percobaan .....	63
Tabel 4.2	Rasio S/N dari Respon .....	64
Tabel 4.3	Data Normalisasi Rasio S/N .....	66
Tabel 4.4	<i>Deviation sequence</i> .....	67
Tabel 4.5	<i>Grey relational coefficient</i> .....	68
Tabel 4.6	<i>Fuzzy Rules</i> .....	70
Tabel 4.7	<i>Grey Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)</i> .....	73
Tabel 4.8	Rata-rata Nilai GFRG pada Masing-masing Level .....	74
Tabel 4.9	Kombinasi Faktor untuk Respon Optimum .....	75
Tabel 4.10	ANAVA dan Kontribusi GFRG .....	76
Tabel 4.11	Kondisi Hipotesis Nol Multi Respon .....	78
Tabel 4.12	Hasil Respon Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum .....	82
Tabel 4.13	Rasio S/N Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum .....	83
Tabel 4.14	GFRG Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum .....	83
Tabel 4.15	Pengaturan Level pada Kombinasi Awal .....	85
Tabel 4.16	Hasil Respon Percobaan pada Kombinasi Awal .....	86
Tabel 4.17	Rasio S/N pada Kombinasi Awal .....	86

Tabel 4.18 Perbandingan GFRG Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum ..	87
Tabel 4.19 Perbandingan Respon Individu pada Kondisi Awal dengan Kondisi Optimum .....	87
Tabel 4.20 Hasil Uji Kenormalan Data pada Kombinasi Awal .....	88
Tabel 4.21 Hasil Uji Kenormalan Data pada Kombinasi Optimum .....	88
Tabel 4.22 Hasil Uji Kesamaan Variasi .....	89
Tabel 4.23 Hasil Uji Kesamaan Rata-rata .....	89

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Proses Pemesinan <i>EDM</i> .....	8
Gambar 2.2	Skema mesin EDM <i>sinking</i> .....	9
Gambar 2.3	Lapisan yang dibentuk oleh proses EDM .....	19
Gambar 2.4	Parameter dalam profil permukaan .....	20
Gambar 2.5	Langkah-langkah optimasi Taguchi- <i>grey-fuzzy</i> .....	36
Gambar 2.6	Fungsi keanggotaan kurva segitiga .....	39
Gambar 2.7	Fungsi keanggotaan kurva trapezium .....	39
Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian .....	45
Gambar 3.2	Bentuk dan dimensi benda kerja .....	49
Gambar 3.3	Bentuk dan dimensi elektroda .....	49
Gambar 3.4	Mesin EDM <i>sinking</i> .....	50
Gambar 3.5	Neraca digital .....	51
Gambar 3.6	Mitutoyo <i>surftest</i> 301 .....	51
Gambar 3.7	<i>Scanning electron microscope</i> (SEM) INSPECT S50 .....	51
Gambar 3.8	Skema pengukuran kekasaran permukaan .....	58
Gambar 3.9	Skema pengukuran tebal lapisan <i>recast</i> .....	58
Gambar 4.1	Fungsi keanggotaan untuk LPB, RKE, KP dan LR .....	69
Gambar 4.2	Fungsi keanggotaan <i>grey fuzzy reasoning grade</i> (GFRG) .....	69
Gambar 4.3	Ilustrasi aturan <i>fuzzy</i> untuk proses <i>defuzzification</i> .....	72
Gambar 4.4	Plot nilai GFRG pada masing-masing level variabel proses .....	74
Gambar 4.5	Plot ACF .....	79
Gambar 4.6	Plot residual <i>versus fitted values</i> .....	80
Gambar 4.7	Plot uji distribusi normal .....	80
Gambar 4.8	Perbandingan interval keyakinan antara GFRG hasil optimasi dan hasil konfirmasi .....	84
Gambar 4.9	SEM lapisan <i>recast</i> (LR) .....	93



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses pemesinan non konvensional menjadi pilihan yang tepat ketika pembuatan benda kerja dengan proses pemesinan konvensional sulit dilakukan. Salah satu proses pemesinan non konvensional yang sering digunakan adalah *electrical discharge machining* (EDM) *sinking*. Proses ini telah digunakan secara efektif pada pemesinan material yang keras, berkekuatan tinggi dan tahan terhadap suhu tinggi. Oleh karena itu proses ini sering digunakan ketika geometri, dimensi dan toleransi dari benda kerja tidak dapat dicapai dengan proses pemesinan yang lain, seperti proses freis maupun sekrup. EDM *sinking* merupakan proses pemotongan logam dengan menggunakan erosi yang terjadi karena adanya sejumlah loncatan bunga api listrik. Loncatan bunga api listrik terjadi secara periodik pada celah di antara katoda (benda kerja) dengan anoda (pahat) di dalam cairan dielektrik, sehingga membuat EDM *sinking* mampu melakukan proses pemesinan untuk benda kerja dengan kontur yang kompleks.

Baja DAC merupakan salah satu jenis material yang memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik terhadap keausan dan memiliki stabilitas yang tinggi setelah dikeraskan. Material tersebut harus memiliki permukaan yang halus dan kepresisian yang tinggi untuk dapat digunakan sebagai *punch* dan *dies*, sehingga proses pemesinan EDM *sinking* dipilih dalam menyelesaikan kontur yang kompleks yang tidak dapat dikerjakan dengan proses pemesinan konvensional.

Untuk mencapai kinerja pemesinan yang optimal pada proses EDM *sinking*, perlu dilakukan pemilihan pada variabel-variabel prosesnya. Biasanya, variabel proses pemesinan yang diinginkan ditentukan berdasarkan pengalaman atau buku pedoman. Namun hal ini tidak menjamin bahwa variabel proses pemesinan yang dipilih menghasilkan kinerja mesin yang optimal atau mendekati optimal untuk mesin EDM *sinking* tertentu. Proses pemesinan EDM *sinking* tidak dipengaruhi oleh sifat mekanis benda kerja, tetapi dipengaruhi oleh titik lelehnya (*melting point*). Seperti pada proses pemesinan konvensional, elektroda (pahat)



pada proses EDM *sinking* juga mengalami keausan. Besarnya keausan elektroda dipengaruhi oleh jumlah loncatan bunga api listrik dari elektroda (pahat) menuju benda kerja. Jumlah loncatan bunga api listrik yang dibutuhkan untuk meraut hingga kedalaman yang diinginkan tergantung dari lama dan besar energi yang ditembakkan pada setiap loncatan bunga api listrik. Lama peloncatan bunga api dalam mesin EDM *sinking* diatur dengan mengubah nilai *on time* dan *off time*, sedangkan energi yang dibawa pada tiap loncatan diatur dengan mengubah nilai *pulse current* dan tegangan listrik (*gap voltage*).

Beberapa penelitian pernah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan variabel yang berpengaruh pada proses EDM *sinking*. Lin dkk. (2002) telah meneliti pengaruh *pulse on time*, *duty factor*, dan *discharge current* terhadap laju pengerjaan bahan (LPB), nilai kekasaran permukaan (KP) dan rasio keausan elektroda (RKE) pada material SKD11 dengan elektroda tembaga. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa variabel *discharge current* mampu mengoptimalkan LPB, nilai kekasaran permukaan dan rasio keausan elektroda.

Vaani dan Hameedullah (2005) mengoptimalkan variabel proses *pulse on time*, *discharge current*, *discharge voltage* dan *flushing pressure* pada proses pemesinan EDM *sinking* dengan material *tool steel* yang dikeraskan. Elektroda yang digunakan adalah aluminium yang dilapisi tembaga. Variabel respon yang diteliti adalah LPB dan KP. Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah *discharge voltage* dan *pulse on time* dapat mempengaruhi LPB, sedangkan *discharge voltage*, *discharge current* dan *pulse on time* dapat mempengaruhi KP.

Lin dan Lin (2005) juga meneliti seberapa efektif peranan variabel *pulse on time*, *duty factor* dan *discharge current* (arus) untuk mengoptimalkan rasio keausan elektroda, laju pembuangan material dan kekasaran permukaan dengan menggunakan metode *grey-fuzzy*. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah SKD11 dengan elektroda tembaga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel *discharge current*, *pulse on time* dan *duty factor* mampu menurunkan rasio keausan elektroda dari 5,07% menjadi 1,81%, meningkatkan LPB dari 0,0057 g/min menjadi 0,0059 g/min dan menurunkan kekasaran permukaan dari 2,38  $\mu\text{m}$  menjadi 2,05  $\mu\text{m}$ .



---

Dalam bidang industri manufaktur, perkembangan penelitian proses pemesinan bukan hanya mengenai pengaruh variabel proses terhadap variabel respon, tetapi juga optimasi secara serentak pada beberapa respon. Optimasi dilakukan pada proses pemesinan untuk mendapatkan kombinasi variabel proses pemesinan EDM *sinking* yang tepat sehingga menghasilkan respon yang optimum. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk optimasi pada proses pemesinan adalah metode Taguchi, *response surface methodology* (RSM), *artificial neural network* (ANN) dan *genetic algorithm* (GA) (Mukherjee, 2006).

Metode Taguchi hanya dapat digunakan untuk optimasi dengan satu respon. Namun optimasi beberapa respon secara serentak dapat dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi, yang digabungkan dengan metode *grey relational analysis* (GRA) dan logika *fuzzy*. Kusumaningrum (2012) melakukan optimasi terhadap KP dan LPB pada material SKD11 menggunakan metode Taguchi-Fuzzy dengan variabel-variabel proses *pulse current*, *on time*, *gap voltage* dan *duty factor* pada proses EDM *sinking*. Respon yang diteliti adalah KP dan LPB. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa *gap voltage* memberikan kontribusi terbesar dalam mengurangi variasi respon secara serentak. Anas (2013) menggunakan pendekatan Taguchi-grey-fuzzy untuk meneliti optimasi multi respon pada proses EDM *sinking* material SKD11 dengan variabel-variabel proses *off time*, *pulse current*, *on time* dan *gap voltage*. Respon-respon yang diteliti adalah laju keausan elektroda (LKE) dan kedalaman potong akhir (KPA). Dari penelitian ini diketahui bahwa *on time* memberikan kontribusi terbesar dalam mengurangi variasi respon secara serentak.

Berdasarkan hal-hal yang telah dijelaskan, maka akan dilakukan penelitian tentang pengaturan variabel-variabel proses pada pemesinan EDM *sinking* dengan material baja perkakas DAC dan elektroda grafit untuk menghasilkan respon KP, tebal lapisan *recast* (LR), dan RKE yang minimum, serta LPB yang maksimum. Rancangan eksperimen ditetapkan berdasarkan metode Taguchi. Metode optimasi yang digunakan adalah GRA dan logika *fuzzy*.



## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kontribusi variabel-variabel proses polaritas elektroda, *gap voltage*, *duty factor* dan *pulse current* dalam mengurangi variasi dari respon KP, LR, LPB dan RKE secara serentak?
2. Bagaimana pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses tersebut pada proses pemesinan EDM *sinking* sehingga dapat meminimumkan KP, LR dan RKE serta memaksimumkan LPB?

### 1.2.1 Batasan Masalah

Untuk lebih memfokuskan penelitian dan dapat mencapai tujuan yang diinginkan, maka diberlakukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan sesuai dengan karakteristik dan batas kemampuan dari mesin yang digunakan.
2. Tidak membahas komponen biaya pada proses pemesinan.
3. Tidak membahas sistem elektronika, sistem kontrol dan pemrograman EDM *sinking* yang digunakan pada proses pemesinan.
4. Tidak membahas proses perlakuan panas pada benda kerja.
5. Tidak membahas perubahan struktur mikro pada lapisan *recast* yang timbul setelah proses pemesinan dilakukan.

### 1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi-asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel-variabel proses yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Material yang digunakan memiliki kehomogenan sifat mekanik dan komposisi kimia.
3. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi baik.
4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.



5. Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara variabel-variabel proses yang diteliti.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian berdasarkan perumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kontribusi variabel-variabel proses polaritas elektroda, *gap voltage*, *duty factor* dan *pulse current* dalam mengurangi variasi dari respon KP, LR, LPB dan RKE secara serentak.
2. Menentukan pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses tersebut pada proses pemesinan EDM *sinking* sehingga dapat meminimumkan KP, LR dan RKE serta memaksimalkan LPB.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Dengan melakukan optimasi pada variabel-variabel proses pemesinan EDM *sinking* ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat membantu dunia industri dalam menentukan pengaturan yang tepat pada proses pemesinan EDM *sinking* menggunakan material DAC dengan elektroda grafit.
2. Menambah database tentang pengaturan variabel proses yang tepat pada proses EDM *sinking* untuk pembuatan cetakan, sehingga biaya produksi dapat diminimumkan.
3. Menambah database penelitian yang mengangkat masalah tentang optimasi KP, LR, LPB dan RKE pada proses pemesinan EDM *sinking*.
4. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenis dalam rangka pengembangan ilmu pengetahuan tentang pengaruh parameter pemesinan terhadap optimasi KP, LR, LPB dan RKE pada proses pemesinan EDM *sinking*.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



---

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

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

Pada tahun 1770, Joseph Priestly seorang ilmuwan Inggris menemukan efek erosi dari percikan arus listrik yang menjadi asal mula dari EDM (Widarto dkk., 2008). Kemudian pada tahun 1943 Lazarenko bersaudara memiliki gagasan untuk memanfaatkan efek erosi dari percikan arus listrik tersebut untuk membuat proses yang terkontrol pada pemesinan bahan konduktif secara elektrik. Gagasan ini disempurnakan dengan menempatkan cairan dielektrik dimana percikan arus listrik terjadi diantara dua konduktor (Widarto dkk., 2008). Dari gagasan inilah akhirnya proses EDM mulai dikembangkan.

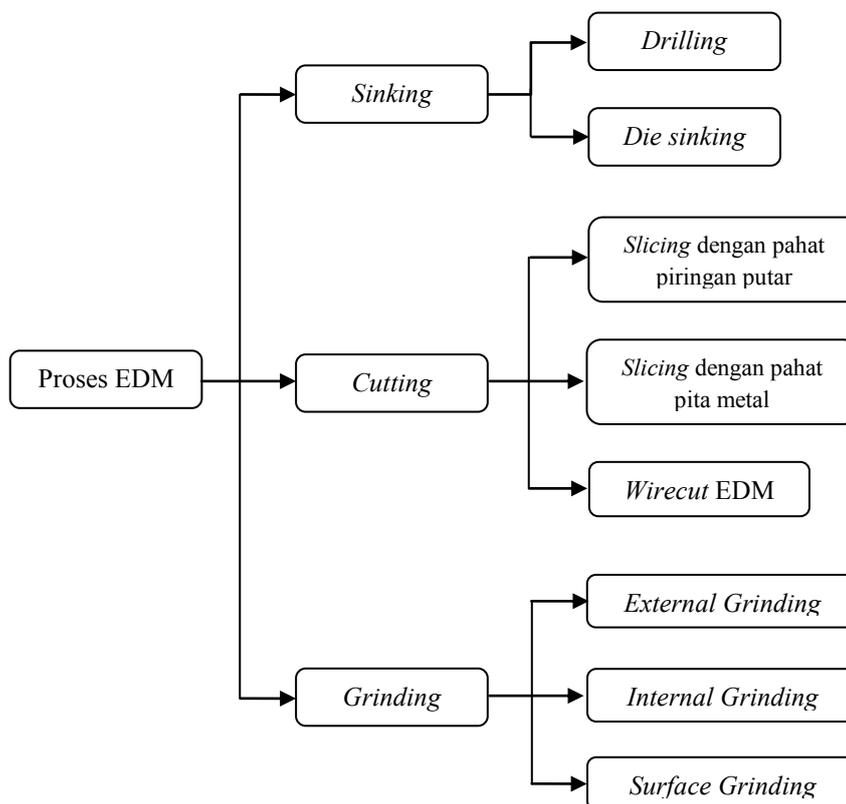
Secara umum proses pemesinan non konvensional muncul karena adanya penemuan-penemuan logam paduan baru yang memiliki kekerasan sangat tinggi, sehingga akan menjadi kendala jika dilakukan perautan secara konvensional. Desain yang kompleks juga menjadi faktor penting yang melatarbelakangi munculnya mesin-mesin non konvensional. Proses EDM merupakan proses pemesinan secara non konvensional yang memanfaatkan energi termal. Energi termal pada proses EDM didapat dari proses peloncatan bunga api listrik pada celah diantara elektroda dan benda kerja yang terjadi secara tidak kontinyu tetapi periodik terhadap waktu (Pandey dan Shan, 1980). Panas dari loncatan bunga api akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja dan elektroda, yang kemudian terbawa oleh aliran fluida yang berada pada celah diantara benda kerja dan elektroda. Proses pemesinan EDM memiliki banyak keunggulan, antara lain (Pandey dan Shan, 1980):

- a. Tidak terdapat kontak fisik antara benda kerja dan pahat, sehingga benda kerja tidak mengalami *chatter* dan deformasi mekanik.
- b. Hampir semua pekerjaan yang dilakukan pada mesin konvensional biasa dapat dilakukan dengan proses ini.
- c. Mampu mengerjakan bentuk-bentuk benda kerja yang dengan derajat kepresisian dan kualitas permukaan yang sangat tinggi.



- d. Mampu mengerjakan benda kerja yang memiliki kekerasan dan kekuatan yang sangat tinggi, karena proses pengerjaan benda kerja dipengaruhi oleh temperatur leleh dari benda kerja itu sendiri.
- e. Distribusi kawah kecil yang dihasilkan tidak akan menurunkan kekuatan benda kerja.
- f. Faktor operator dalam menghasilkan kualitas benda kerja dapat diabaikan karena proses ini dijalankan secara otomatis.

Umumnya proses pengerjaan material dengan pemesinan EDM dibagi dalam tiga kategori utama, yaitu proses *sinking*, proses *cutting* dan proses *grinding*. Klasifikasi proses EDM ditunjukkan pada Gambar 2.1 dibawah ini.



**Gambar 2.1** Klasifikasi proses pemesinan EDM (Pandey dan Shan, 1980)

Pembagian ketiga kategori tersebut didasarkan atas perbedaan jenis pahat yang digunakan (Pandey dan Shan, 1980), yaitu:

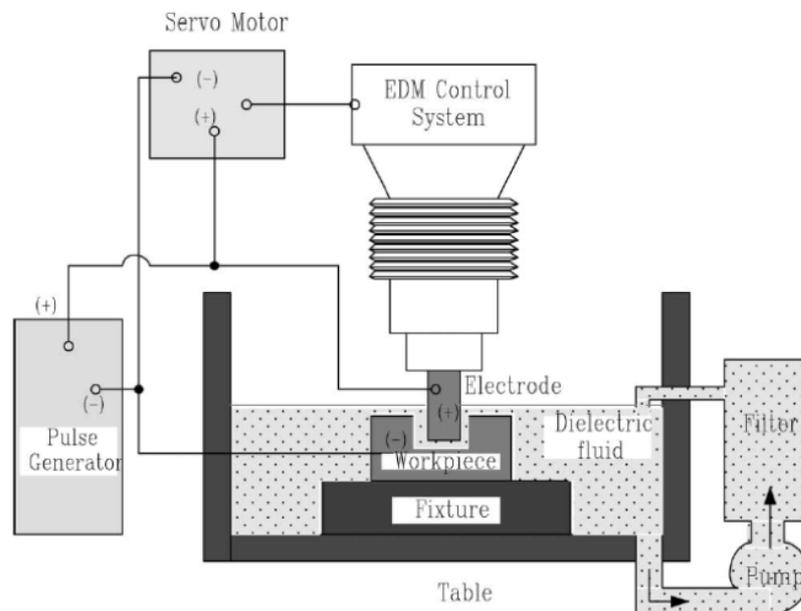
1. *Sinking*, mempunyai bentuk pahat negatif dari bentuk yang direncanakan pada benda kerja. Pahat melakukan gerak penetrasi ke benda kerja.



2. *Cutting*, menggunakan pahat yang berbentuk antara lain plat, pita, kawat, atau piringan. Arah gerakan pahat tegak lurus terhadap benda kerja. Pahat yang berupa pita memotong benda kerja dengan arah melintang. Pahat yang berupa piringan sambil berputar pada sumbunya bergerak dengan arah tegak lurus terhadap benda kerja.
3. *Grinding*, menggunakan pahat yang bentuknya serupa dengan pahat gerinda konvensional. Pahat ini juga berputar pada sumbunya selain melakukan gerakan pemakanan.

## 2.2 Proses EDM *Sinking*

Pada proses EDM *sinking*, elektroda dan benda kerja berada dalam cairan dielektrik. Secara umum, komponen utama pada mesin EDM *sinking* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Skema mesin EDM *sinking* (Lin dkk., 2002)

Proses pembentukan bunga api listrik hingga terjadinya pengikisan benda kerja dan elektroda pada proses EDM *sinking* dapat dijelaskan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:



**Tabel 2.1** Proses Pembentukan Bunga Api Listrik pada Proses EDM *Sinking*

No.	Gambar	Grafik Tegangan dan Arus	Keterangan
1.			<p>Pada proses awal EDM, elektroda yang berisi tegangan listrik turun mendekati benda kerja. Elektroda dan benda kerja terendam didalam suatu cairan dielektrik.</p>
2.			<p>Beda potensial yang terjadi diantara elektroda dan benda kerja menyebabkan terjadinya medan listrik. Hal tersebut akan menyebabkan munculnya pergerakan ion positif dan elektron menuju kutub yang berlawanan. Pada tahap ini, tegangan telah mencapai nilai maksimal, namun arus masih nol.</p>
3.			<p>Karena jumlah ion partikel meningkat, sifat isolasi dari cairan dielektrik mulai berkurang dan membentuk saluran ion yang terpusat. Pada tahap ini, tegangan mulai menurun, arus mulai naik.</p>
4.			<p>Terbentuknya saluran ion menyebabkan tahanan listrik pada saluran tersebut menjadi sangat rendah, sehingga terjadilah pelepasan energi listrik dalam waktu yang sangat singkat berupa loncatan bunga api. Loncatan bunga api menyebabkan terjadinya pemusatan aliran elektron yang bergerak dengan kecepatan yang tinggi dan menumbuk permukaan benda kerja. Tahapan ini selanjutnya disebut sebagai <i>discharge phase</i>. Temperatur meningkat dengan cepat diiringi dengan meningkatnya arus dan turunnya tegangan. Panas menguapkan sebagian cairan dielektrik, benda kerja dan elektroda. dan saluran pembuangan mulai terbentuk antara elektroda dan benda kerja.</p>

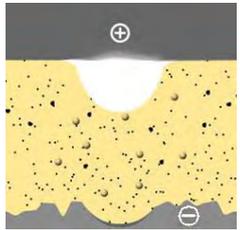
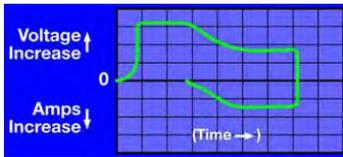
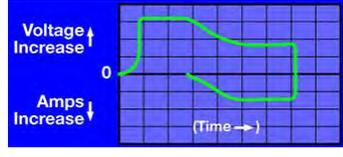


**Tabel 2.1** Proses Pembentukan Bunga Api Listrik pada Proses EDM *Sinking* (lanjutan)

No.	Gambar	Grafik Tegangan dan Arus	Keterangan
5.			<p>Kenaikan temperatur pada bagian yang terkena tumbukan menimbulkan terjadinya selubung gas. Kenaikan temperatur busur bunga api listrik yang mencapai 8000°C-12000°C akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja maupun pada elektroda. Pada saat yang bersamaan juga terjadi penguapan, baik pada benda kerja, elektroda maupun cairan dielektrik. Kenaikan temperatur juga menyebabkan peningkatan volume dan tekanan pada selubung uap yang terjadi. Arus terus meningkat dan tegangan menurun.</p>
6.			<p>Menjelang akhir <i>on time</i>, arus dan tegangan telah stabil, temperatur dan tekanan di dalam selubung uap telah mencapai kondisi maksimum. Sebagian material telah berhasil di erosi.</p>
7.			<p>Pada awal kondisi <i>off time</i>, arus dan tegangan turun sampai nilai nol (terputus). Terhentinya loncatan bunga api menyebabkan suhu menurun dengan cepat, sehingga selubung gas yang terjadi akan mengkerut dengan cepat dan menjadi vakum.</p>



**Tabel 2.1** Proses Pembentukan Bunga Api Listrik pada Proses EDM *Sinking* (lanjutan)

No.	Gambar	Grafik Tegangan dan Arus	Keterangan
8.			<p>Turunnya temperatur dengan sangat cepat pada selubung gas menyebabkan selubung gas akan mengkerut dan meledak. Bagian material yang meleleh akan terpecar keluar dari permukaan dan meninggalkan bekas berupa kawah-kawah halus (<i>crater</i>) pada permukaan material. Bagian yang terpecar ini dengan cepat membeku kembali dan membentuk partikel halus yang kemudian terbawa pergi oleh aliran cairan dielektrik.</p>
9.			<p>Partikel-partikel yang mencair kemudian membeku kembali. Minimnya waktu <i>off time</i> menyebabkan aliran cairan dielektrik tidak mampu membawa pergi partikel-partikel halus yang tersebar di dalamnya, sehingga partikel-partikel tersebut akan terkumpul dan membentuk percikan bunga api yang tidak stabil. Situasi ini bisa membentuk DC <i>arc</i> yang dapat merusak elektroda dan benda kerja.</p>

Sumber: edmtechman.com

### 2.2.1 Variabel-variabel Proses pada EDM *Sinking*

Pada proses EDM *sinking*, ada beberapa variabel-variabel proses yang dapat diteliti yaitu *on time*, *off time*, polaritas elektroda, *flushing pressure*, *gap width*, *gap voltage*, *pulse current*, fluida dielektrik, *supply voltage*, *duty factor* dan lain-lain. Pada penelitian ini variabel-variabel proses pada mesin EDM *sinking* yang akan diteliti adalah:



1. Polaritas elektroda

Polaritas menyatakan sifat dari sebuah objek yang mempunyai dua arah kerja atau kutub. Polaritas elektroda dapat bersifat negatif (DCEN) atau positif (DCEP).

2. *Gap voltage*

*Gap voltage* menyatakan besarnya tegangan yang terjadi saat proses perautan benda kerja. *Gap voltage* yang optimal akan menghasilkan loncatan bunga api listrik yang stabil serta proses perautan yang efisien.

3. *Duty factor*

*Duty factor* menyatakan perbandingan antara *pulse duration (on time)* dengan *cycle time*. *Cycle time* adalah waktu total antara *pulse duration* dan *pulse off time* dalam satu siklus.

4. *Pulse current*

*Pulse current* menyatakan besarnya arus listrik yang mengalir pada proses EDM. Semakin besar arus listrik yang dialirkan, semakin besar pula energi listrik yang dilepaskan, sehingga luasan daerah benda kerja yang mampu dilelehkan semakin besar. Akibatnya LPB dan KP yang terjadi akan semakin besar pula.

### 2.2.2 Elektroda

Secara teoritis setiap material yang bersifat konduktor dapat digunakan sebagai elektroda pada proses EDM. Fungsi elektroda adalah menghantarkan tegangan listrik dan mengerosi benda kerja menjadi bentuk yang diinginkan. Bahan elektroda yang berbeda memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap proses pemesinan. Beberapa elektroda akan menghilangkan material dari benda kerja secara efisien tetapi dengan keausan yang tinggi, sedangkan elektroda lain memiliki keausan yang rendah tetapi kemampuan menghilangkan material benda kerja sangat lambat. Oleh sebab itu, maka material elektroda harus memiliki karakteristik sebagai berikut (Widarto dkk., 2008):

1. Dapat menghantarkan panas dan listrik dengan baik.
2. Bentuk elektroda mudah dikerjakan dengan proses pemesinan.
3. Menghasilkan pemindahan geram yang efisien dari benda kerja.



---

Elektroda yang baik adalah yang memiliki temperatur leleh yang tinggi dan hambatan listriknya rendah. Secara umum elektroda untuk *tool* pada proses EDM dibagi menjadi dua, yaitu kelompok metalik dan grafit. Beberapa logam dari kelompok metalik yang biasanya digunakan sebagai elektroda antara lain adalah (Guitrau, 1997):

1. *Brass/Zinc*

*Brass/Zinc* adalah logam pertama yang digunakan sebagai elektroda. Brass memiliki keausan yang tinggi. Karena tingginya keausan yang terjadi, maka dalam penggunaannya sering dilapisi dengan *copper* setebal 0.005 sampai 0.1 inci.

2. *Copper*

*Copper* memiliki resistensi listrik dan titik leleh yang rendah, yaitu 1083°C. Semakin rendah resistensi listrik yang dimiliki elektroda, semakin cepat juga laju pengerjaan benda kerja. Semakin tinggi titik leleh yang dimiliki elektroda, semakin rendah juga laju keausan elektroda. Umumnya dalam penggunaan *copper* sering dilakukan penambahan elemen *telurium* sebanyak antara 0.5% sampai 1%, dengan tujuan untuk mempermudah proses pemesinan dari *copper*.

3. *Tungsten*

*Tungsten* murni memiliki resistensi listrik yang sangat besar, tetapi titik lelehnya sangat tinggi yaitu 3370°C. *Tungsten* murni umumnya digunakan untuk proses pembuatan lubang kecil.

4. *Copper Tungsten*

Paduan antara *copper* dan *tungsten* akan menghasilkan keausan elektroda yang rendah dan selain itu resistensi listriknya juga rendah. Keausan elektroda yang rendah disebabkan oleh pengaruh elemen *tungsten*, sedangkan resistensi listrik yang rendah didapat karena pengaruh elemen *copper*. Rasio antara *tungsten* dan *copper* yang sering digunakan untuk elektroda adalah 70/30.



## 5. *Silver Tungsten*

Paduan ini memiliki resistensi yang lebih rendah dari *copper tungsten*, namun ketahanan terhadap keausannya sama. Paduan ini harganya mahal, sehingga hanya digunakan pada kondisi tertentu saja.

Elektroda grafit memiliki ketahanan termal yang sangat tinggi. Hal tersebut ditunjukkan pada titik sublimasinya yang tinggi, yaitu pada temperatur 3700°C. Grafit tidak mengalami peleburan tetapi langsung berubah ke gas. Ketahanan termal inilah yang menyebabkan keausan elektroda pada grafit sangat kecil.

Penggunaan elektroda dari metalik atau grafit tergantung dari spesifikasi produk yang diinginkan. Beberapa keuntungan dan kerugian dari penggunaan metalik dan grafit sebagai elektroda dapat dijelaskan sebagai berikut:

### 1. Keuntungan:

#### ▪ Metalik

Elektroda dari metalik memiliki harga yang murah, kekuatan yang tinggi, proses pemesinan yang aman dan ukuran butir yang sangat kecil, sehingga memungkinkan untuk proses *mirror finishing*. Selain itu, elektroda ini bersih dan dapat dilapisi serta bisa digunakan pada proses *wirecut*.

#### ▪ Grafit

Elektroda grafit mudah untuk diproses, kecepatan pengerjaan benda kerjanya tinggi, ketahanan terhadap keausannya sangat baik serta dapat diabrasi dengan menggunakan mesin ultrasonik.

### 2. Kerugian:

#### ▪ Metalik

Elektroda metalik memiliki indeks kemampuan untuk digerinda yang rendah, kecepatan proses *machining* yang lambat serta tingkat keausan yang tinggi.

#### ▪ Grafit

Elektroda grafit memiliki harga yang mahal dan debu dari hasil pengerjaannya cukup berbahaya walaupun tidak beracun. Pada waktu dipotong dengan menggunakan *wirecut*, prosesnya akan berjalan sangat



lambat. Grafit adalah material yang getas sehingga harus berhati-hati sewaktu membuat pahat dengan sisi yang tajam.

Penggunaan elektroda grafit tidak semudah penggunaan elektroda yang terbuat dari metalik. Penggunaan elektroda grafit pada proses EDM akan menghasilkan keausan elektroda yang sangat rendah pada frekuensi rendah. Namun jika mesin EDM tersebut dioperasikan pada frekuensi tinggi, maka akan menyebabkan keausan elektroda yang tinggi pula, bahkan lebih tinggi dari pada keausan elektroda metalik.

### 2.2.3 Pembilasan Geram (*Flushing*)

Ketika proses EDM dimulai, cairan dielektrik yang digunakan masih bersih dari kotoran-kotoran yang berupa geram dan karbon sisa pembakaran, sehingga loncatan bunga api masih stabil. Geram yang terbentuk dari proses perautan akan terbawa oleh cairan dielektrik. Bentuk benda kerja yang rumit dan celah antara elektroda dan benda kerja yang sempit menyebabkan sebagian geram yang dihasilkan dapat terjebak pada celah diantara elektroda dan benda kerja. Partikel-partikel geram pada celah dielektrik dapat menjadi batu loncatan bagi elektron-elektron. Apabila jumlah partikel geram cukup banyak, maka dapat menjadi jembatan bagi elektron untuk bergerak dari anoda menuju katoda, sehingga menimbulkan loncatan bunga api listrik. Loncatan bunga api listrik ini dapat menyebabkan kerusakan elektroda. Oleh sebab itu maka harus dilakukan pembilasan (*flushing*).

Kunci keberhasilan dari proses pemesinan EDM adalah *flushing*. Beberapa manfaat dari *flushing* adalah (Guitrau, 1997):

1. Memberikan bilasan dengan menggunakan cairan dielektrik bersih yang berguna saat proses perautan.
2. Menghilangkan geram dari celah diantara elektroda dan benda kerja.
3. Mendinginkan elektroda dan benda kerja.

Metode *flushing* yang tepat akan meningkatkan efisiensi proses pengerjaan material. Apabila tidak ada *flushing*, akan terjadi penimbunan partikel-partikel geram pada celah dan akan menimbulkan keadaan sebagai berikut (Groover, 2002):



1. Loncatan bunga api menjadi tidak teratur.
2. Terjadi hubungan singkat antara elektroda dan benda kerja.
3. Terjadinya busur api listrik yang dapat merusak benda kerja dan elektroda.

Metode *flushing* yang sering digunakan pada proses EDM *sinking* adalah sebagai berikut (Khan dkk., 2009):

1. *Injection flushing*, yaitu cairan dielektrik yang diinjeksikan melalui benda kerja atau melalui elektroda. Cairan dielektrik mengalir melalui *spark gap* dan melalui lubang pada benda kerja.
2. *Suction flushing* atau pembilasan hisap, yaitu cairan dielektrik dihisap melalui lubang pada benda kerja atau pada elektrodanya.
3. *Side flushing* atau pembilasan melalui sisi, yaitu metode yang digunakan apabila tidak memungkinkan untuk membuat satu atau lebih lubang, baik pada benda kerja maupun elektrodanya. *Side flushing* menggunakan *nozzle* sehingga seluruh permukaan elektroda dapat dibilas.
4. *Flushing* kombinasi, yaitu kombinasi dari beberapa jenis metode *flushing*.

#### 2.2.4 Cairan Dielektrik

Hal lain yang harus diperhatikan selain metode *flushing* adalah cairan dielektrik. Cairan dielektrik pada proses EDM memiliki beberapa fungsi, antara lain (Guitrau, 1997):

1. Dalam keadaan terionisasi, fluida dielektrik ini berubah menjadi konduktor sehingga memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik.
2. Untuk menggerus geram-geram yang terjadi didalam proses pengerjaan material.

Fluida dielektrik yang dipergunakan pada proses EDM harus memenuhi persyaratan sebagai berikut (Groover, 2002):

1. Memiliki viskositas yang optimum.
2. Tidak menghasilkan gelembung-gelembung uap atau gas yang berbahaya selama proses berlangsung.
3. Tidak mudah terbakar.

Secara umum terdapat dua macam fluida dielektrik yang biasanya digunakan didalam proses EDM, yaitu (Yan dkk., 2002):



a. Air (*aqua-distillation*)

*Aqua-distillation* ini digunakan untuk proses pengerjaan produk yang sangat kecil (*micromachining*), misalnya pengerjaan dengan mesin *wire-EDM*.

b. Liquid dengan senyawa hidrokarbon

Senyawa hidrokarbon umumnya digunakan untuk proses EDM *sinking*. Ada dua macam liquid senyawa hidrokarbon yang sering digunakan untuk proses EDM, yaitu:

1. Minyak mineral (*mineral oil*)

Minyak mineral digunakan secara luas dalam proses EDM dan memberikan hasil yang baik bila tidak ditambahkan zat pencampur. Bila viskositas minyak mineral tinggi, maka cairan dielektrik akan sulit mengalir melalui celah yang sempit, tetapi akan memberikan efisiensi tinggi untuk proses *roughing*.

2. *Kerosene*

*Kerosene* memiliki viskositas rendah sehingga cocok untuk pengerjaan *finishing* dan *super finishing*. Untuk benda kerja dari *tungsten* karbida dianjurkan menggunakan *kerosene* sebagai cairan dielektrik.

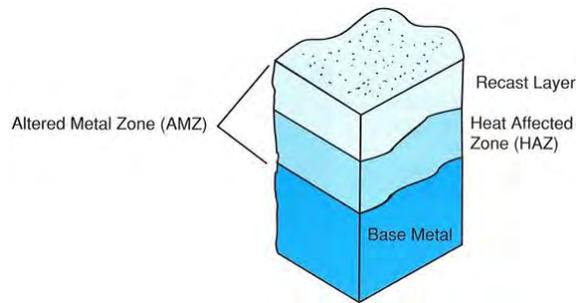
### 2.3 Lapisan *Recast*

Lapisan *recast* (LR) adalah lapisan putih pada permukaan benda kerja yang terbentuk akibat pengaruh panas yang ditimbulkan oleh loncatan bunga api listrik (Guitrau, 1997). Lapisan *recast* merupakan bagian benda kerja (material induk) yang meleleh kemudian membeku kembali dan membentuk lapisan baru pada permukaan benda kerja. Lapisan *recast* tidak mungkin dihilangkan dalam proses pemesinan EDM *sinking* sehingga pengaturan variabel-variabel proses yang ada hanya dapat meminimalkan ketebalan lapisan *recast* yang terbentuk.

Benda kerja yang mengalami proses pemesinan dengan EDM *sinking* memiliki tiga lapisan baru dengan karakteristik yang berbeda-beda. Ketiga lapisan ini adalah lapisan *recast*, *heat affected zone* (HAZ) dan material induk. Gambar 2.3 menunjukkan benda kerja hasil proses pemesinan EDM. Struktur paling atas dari lapisan permukaan benda kerja hasil proses pemesinan EDM adalah lapisan



yang mencair dan membeku kembali dengan cepat akibat dari proses pembilasan. Lapisan ini juga biasa disebut lapisan *recast*. Lapisan berikutnya disebut lapisan HAZ, lapisan ini juga terpengaruh panas tetapi tidak sampai mencair.

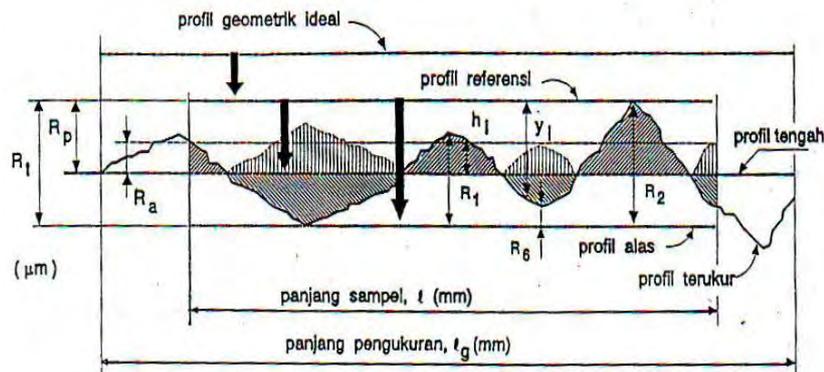


**Gambar 2.3** Lapisan yang dibentuk oleh proses EDM (edmtchman.com)

Lapisan *recast* dan HAZ telah mengalami perubahan struktur kristal karena pengaruh panas selama proses pemesinan berlangsung. Hal ini menyebabkan struktur kristal baru yang terbentuk berbeda dengan struktur kristal material induk sehingga bersifat sangat keras dan getas. Proses pengukuran dan optimasi hanya dilakukan pada ketebalan lapisan *recast*. Hal ini dilakukan karena lapisan *recast* berwarna putih sehingga mudah dikenali tanpa harus melakukan proses etsa.

#### 2.4 Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakraturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Hal ini terjadi karena terjadinya berbagai penyimpangan selama proses pemesinan, sehingga permukaan yang mempunyai bentuk sempurna tidak dapat dibuat. Posisi  $R_a$ , bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)

Keterangan Gambar 2.4 adalah sebagai berikut:

a. Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)

Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran dan garis lengkung.

b. Profil Referensi/Acuan/Puncak (*Reference Profile*)

Profil ini digunakan sebagai acuan untuk menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometrik ideal, serta menyinggung puncak tertinggi tertinggi profil terukur dalam suatu panjang sampel.

c. Profil Terukur (*Measured Profile*)

Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan terukur.

d. Profil Alas (*Root Profile*)

Profil alas adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sehingga menyinggung pada titik paling terendah profil terukur.

e. Profile Tengah (*Center Profile*)

Profil tengah merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai profil terukur sama dengan jumlah luas daerah-daerah dibawah profil tengah sampai profil terukur.



Berdasarkan profil-profil yang diterangkan diatas, dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan, yaitu yang berhubungan dengan dimensi pada arah tegak dan arah memanjang/mendatar. Untuk dimensi arah tegak dikenal beberapa parameter (Rochim, 2001), yaitu:

a. Kekasaran Total ( $R_t$ )

Kekasaran total adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.

b. Kekasaran Perataan ( $R_p$ )

Kekasaran perataan adalah jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur.

$$R_p = \frac{1}{l} \int_0^l y_i dx \quad (2.1)$$

c. Kekasaran Rata-rata Aritmatik ( $R_a$ )

Kekasaran rata-rata aritmatik adalah harga rata-rata jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Secara umum  $R_a$  dirumuskan:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |h_i| dx \quad (2.2)$$

Harga  $R_a$  tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n |h_i| \quad (2.3)$$

$$R_a = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{l} \quad (2.4)$$

Dengan:

$R_a$  : nilai kekasaran aritmatika.

$h_n$  : tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba.

$n$  : frekuensi pengukuran.

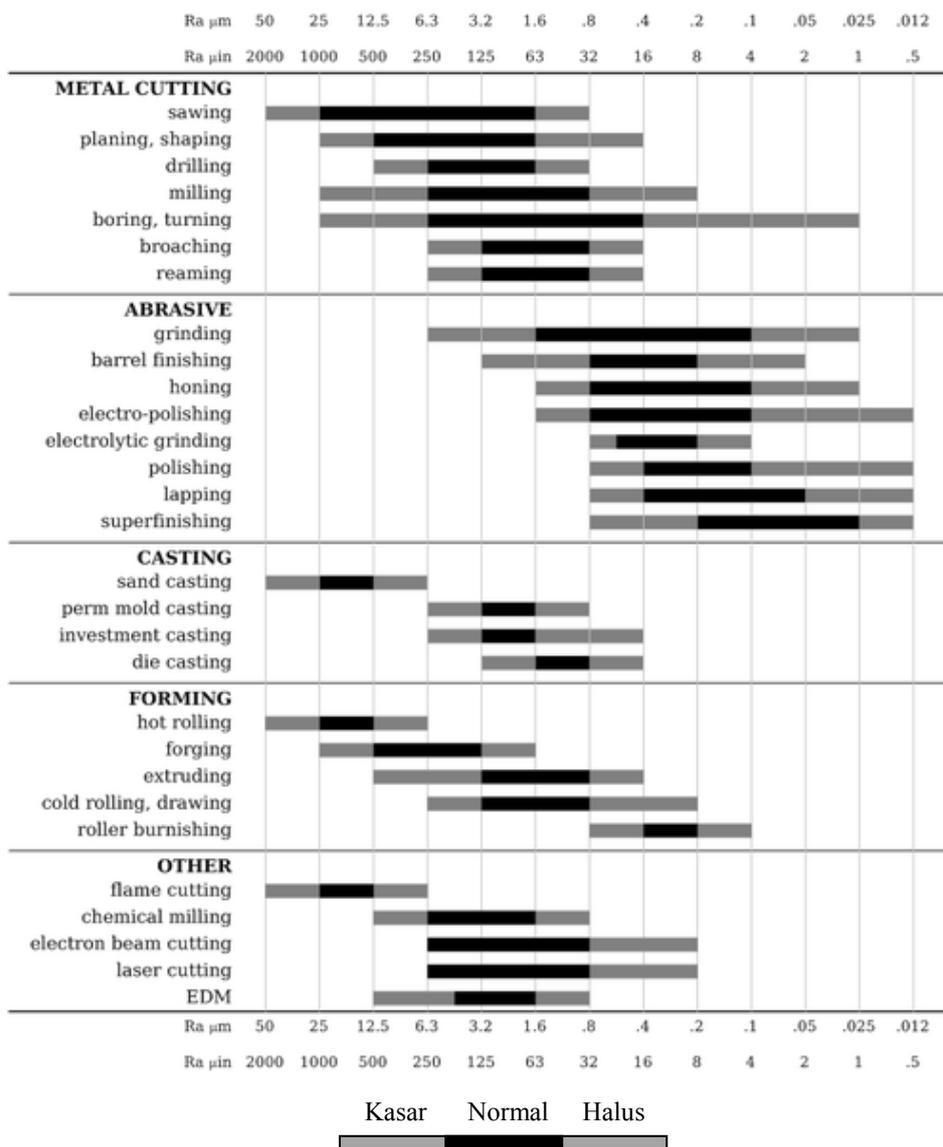
$l$  : panjang sampel yang telah ditentukan.

Dari bermacam-macam parameter permukaan yang disebutkan diatas, parameter  $R_a$  relatif lebih banyak digunakan untuk mengidentifikasi permukaan. Hal ini disebabkan harga  $R_a$  lebih sensitif terhadap perubahan/penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan. Dengan demikian,



jika ada tanda-tanda kenaikan kekasaran maka pencegahan dapat cepat dilakukan. Beberapa contoh nilai kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan ditunjukkan pada Tabel 2.2 (Rochim, 1993).

**Tabel 2.2** Nilai Kekasaran yang Dicapai Oleh Beberapa Pengerjaan



**Kasar** : nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan kasar.

**Normal** : nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan normal.

**Halus** : nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan khusus.

ISO telah mengklasifikasikan nilai kekasaran rata-rata aritmetik ( $R_a$ ) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3. Angka



kekasaran permukaan ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan satuan harga kekasaran permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga  $R_a$  atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO.

**Tabel 2.3** Angka Kekasaran dan Panjang Sampel Standar

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)	Keterangan
50	N12	8	Sangat kasar
25	N11		
12,5	N10	2,5	Kasar
6,3	N9		
3,2	N8	0,8	Normal
1,6	N7		
0,8	N6		
0,4	N5		
0,2	N4	0,25	Halus
0,1	N3		
0,05	N2		
0,025	N1	0,08	Sangat halus

Sumber: Rochim, 2001

## 2.5 Laju Pengerjaan Bahan

Laju pengerjaan bahan (LPB) adalah proses terjadinya pembentukan kawah-kawah halus pada permukaan benda kerja. Variabel-variabel proses yang mempengaruhi laju pengerjaan bahan adalah frekuensi *discharge*, banyaknya arus dan tegangan listrik tiap *discharge*, material elektroda, material benda kerja dan kondisi *flushing* cairan dielektrik (Krar dan Check, 1997).

LPB dapat didefinisikan sebagai besarnya volume bahan (material) yang terbuang tiap satuan waktu ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) dan dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$LPB = \frac{\text{Volume Bahan yang Terbuang}}{\text{Waktu Pemesinan}} (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2.5)$$



Untuk mengetahui nilai volume bahan (benda kerja) yang terbuang, maka terlebih dahulu diukur massa benda kerja yang hilang selama proses. Massa benda kerja yang hilang selama proses merupakan selisih antara massa benda kerja sebelum dan setelah proses EDM. Nilai volume didapatkan dari perbandingan selisih massa benda kerja sebelum dan sesudah proses EDM dengan massa jenis dari material benda kerja yang digunakan. Waktu pemesinan diperoleh langsung dari fitur *timer* pada mesin EDM. Waktu pemesinan ini merupakan selisih antara waktu akhir dengan waktu awal pemesinan yang didefinisikan sebagai *erosion time*.

## 2.6 Rasio Keausan Elektroda

Keausan elektroda dapat terjadi selama proses pemesinan EDM *sinking* ketika proses erosi berlangsung sebagai akibat terjadinya loncatan bunga api (*spark*). Keausan elektroda akan terjadi pada sebagian luasan penampang dari elektroda yang mengikis benda kerja (Khan dkk., 2009). Proses keausan elektroda ini meninggalkan bentuk kawah-kawah yang halus pada permukaan elektroda.

Rasio keausan elektroda (RKE) merupakan prosentase perbandingan antara volume elektroda yang terbuang dengan volume bahan (material) yang terbuang. RKE secara matematis dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$RKE (\%) = \frac{\text{Volume Elektroda yang Terbuang}}{\text{Volume Bahan yang Terbuang}} \times 100 \quad (2.6)$$

Untuk mengetahui nilai volume elektroda yang terbuang, maka terlebih dahulu diukur massa elektroda yang hilang selama proses. Massa elektroda yang hilang selama proses merupakan selisih antara massa elektroda sebelum dan setelah proses EDM. Nilai volume didapatkan dari perbandingan antara selisih massa elektroda sebelum dan sesudah proses EDM dengan massa jenis dari material elektroda yang digunakan. Waktu pemesinan diperoleh langsung dari fitur *timer* pada mesin EDM.



## 2.7 Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan suatu alat dalam metode statistik yang digunakan untuk meningkatkan atau memperbaiki kualitas. Desain eksperimen didefinisikan sebagai suatu rangkaian pengujian dengan cara mengubah-ubah *input* pada variabel proses dengan tujuan untuk mengetahui penyebab perubahan pada variabel respon, sehingga dapat ditentukan pengaturan variabel proses yang tepat untuk menghasilkan variabel respon yang optimal. Desain eksperimen memerlukan tahapan-tahapan penting agar mengarah dan mengena pada hasil yang diinginkan. Berikut adalah langkah-langkah melakukan desain eksperimen (Iriawan dan Astuti, 2006):

1. Mengenali permasalahan.

Tahapan ini diawali dengan melakukan identifikasi permasalahan hingga didapat suatu hipotesa yang dapat menjawab permasalahan tersebut.

2. Memilih variabel respon.

Variabel respon adalah variabel tidak bebas, yaitu variabel yang dipengaruhi oleh level variabel proses atau kombinasi level dari variabel proses.

3. Menentukan variabel proses dan level.

Tahapan ini memerlukan pengetahuan yang lebih mengenai permasalahan yang akan diteliti agar variabel proses dan level yang ditentukan tidak menyimpang jauh dari hasil yang diinginkan.

4. Memilih metode desain eksperimen.

Metode desain eksperimen harus disesuaikan dengan tujuan penelitian dan permasalahan yang ada. Ada beberapa metode desain eksperimen yang sering digunakan yaitu desain faktorial, metode Taguchi dan metode permukaan respon. Dalam penelitian ini akan digunakan metode Taguchi.

5. Melaksanakan Percobaan.

Selama percobaan dilaksanakan, proses harus diamati dengan cermat agar percobaan berjalan sesuai rencana.

6. Menganalisis Data.

Analisis data merupakan dasar dalam membuat suatu keputusan dan pernyataan yang tepat. Analisis data pada desain eksperimen dilakukan sesuai dengan metode yang digunakan.



## 7. Membuat Suatu Keputusan.

Setelah analisis data dilakukan, langkah terakhir adalah membuat suatu keputusan berdasarkan percobaan yang telah dilakukan.

### 2.8 Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1940. Metode ini digunakan untuk mengoptimalkan hasil eksperimen dan berprinsip pada perbaikan mutu dengan memperkecil efek variasi tanpa menghilangkan penyebab variasi tersebut (Dhavamani dan Alwarsamy, 2011). Metode Taguchi juga bertujuan untuk menekan biaya pemesinan dan *resources* seminimal mungkin. Soejanto (2009) menyatakan bahwa metode Taguchi menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor seperti material, perlengkapan manufaktur, operator, dan kondisi-kondisi lainnya. Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat kokoh (*robust*) terhadap faktor gangguan sehingga metode ini disebut juga sebagai perancangan kokoh atau *robust design*.

Keunggulan metode Taguchi dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya adalah (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena memungkinkan untuk melakukan penelitian yang melibatkan banyak variabel proses dan level dari variabel proses.
2. Menghasilkan proses dengan produk yang konsisten dan kokoh terhadap faktor gangguan.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian. Secara umum, desain eksperimen Taguchi dibagi menjadi dua tahap utama, yaitu:

#### 1. Tahap Perencanaan

Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari eksperimen-eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan



menghasilkan eksperimen yang memberikan informasi positif atau negatif. Informasi positif terjadi apabila hasil eksperimen memberikan indikasi tentang faktor dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk. Informasi negatif terjadi apabila hasil eksperimen gagal memberikan indikasi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi respon. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

a. Perumusan Masalah

Perumusan masalah harus secara spesifik dan jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam percobaan yang akan dilakukan.

b. Penentuan Tujuan Eksperimen

Tujuan eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan.

c. Penentuan Variabel Respon atau Variabel Tidak Bebas

Variabel respon memiliki nilai yang tergantung pada variabel-variabel lain yang disebut variabel tidak bebas.

d. Pengidentifikasian Variabel Proses

Variabel proses didefinisikan sebagai variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih variabel proses yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap variabel respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua variabel proses yang diprediksi mempengaruhi variabel respon harus diteliti. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan Variabel Proses dan Faktor Gangguan

Dalam rancangan eksperimen Taguchi, variabel proses dan faktor gangguan perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Variabel proses adalah variabel proses yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan faktor gangguan adalah variabel yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

f. Penentuan Jumlah dan Nilai Level Variabel Proses

Penentuan dan pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang akan diteliti maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan juga akan semakin besar.



g. Perhitungan Derajat Kebebasan

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

$$v_{mo} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.7)$$

Derajat kebebasan dari variabel proses dan level ( $v_{vpl}$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{vpl} = \text{jumlah level variabel proses} - 1 \quad (2.8)$$

h. Pemilihan Matriks Ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah variabel dan jumlah level variabel. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah variabel dengan jumlah eksperimen yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a (b^c) \quad (2.9)$$

Dengan:

L = Rancangan bujursangkar latin

a = Banyaknya eksperimen

b = Banyaknya level variabel

c = Banyaknya variabel

Matriks ortogonal  $L_{18} (2^1 \times 3^3)$  adalah salah satu matriks ortogonal standar dengan beberapa level gabungan. Matriks ortogonal  $L_{18} (2^1 \times 3^3)$  ditunjukkan pada Tabel 2.4. Kolom pertama terdiri dari dua level, dan keempat kolom yang lainnya terdiri dari tiga level (Soejanto, 2009).



**Tabel 2.4** Matriks Ortogonal Standar untuk  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$

No. Percobaan	Kolom Faktor			
	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

## 2. Tahap Pelaksanaan

Ada 2 hal yang harus dilakukan pada pelaksanaan eksperimen, yaitu:

### a. Replikasi

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

### b. Randomisasi

Pengaruh variabel-variabel proses lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan selalu ada dalam sebuah eksperimen. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan variabel-variabel proses tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Randomisasi bertujuan untuk menyebarkan pengaruh dari variabel-variabel proses yang tidak dapat



dikendalikan pada semua unit eksperimen serta memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan, sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama. Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

### 3. Tahap Analisis

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil eksperimen.

#### a. Analisis variansi (ANAVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik. Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi variabel proses. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua variabel proses atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan ( $db$ ), jumlah kuadrat (*sum of square*,  $SS$ ), kuadrat tengah (*mean of square*,  $MS$ ), dan  $F_{hitung}$  seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5** Tabel Analisis Variansi (ANAVA)

Sumber Variansi	$db(v)$	$SS$	$MS$	$F_{hitung}$
Faktor A	$v_A$	$SS_A$	$MS_A$	$F_A$
Faktor B	$v_B$	$SS_B$	$MS_B$	$F_B$
Error	$v_{error}$	$SS_{error}$	$MS_{error}$	
Total	$v_T$	$SS_T$		

Sumber: Blank, 1982



Dengan:

$$\begin{aligned} \nu_T &= \text{derajat bebas total} \\ &= N-1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \nu_A &= \text{derajat bebas faktor A} \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \nu_B &= \text{derajat bebas faktor B} \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \nu_{\text{error}} &= \text{derajat bebas } \textit{error} \\ &= \nu_T - \nu_A - \nu_B \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{jumlah keseluruhan} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{faktor koreksi} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{jumlah kuadrat total} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i^2 - CF \\ &= \sum_{i=1}^N \left( y_i - \frac{T}{N} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{jumlah kuadrat faktor A} \\ &= \left[ \sum_{i=1}^{k_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} SS_B &= \text{jumlah kuadrat faktor B} \\ &= \left[ \sum_{i=1}^{k_B} \left( \frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} SS_{\text{error}} &= \text{jumlah kuadrat } \textit{error} \\ &= SS_T - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} MS_A &= \text{kuadrat tengah faktor A} \\ &= SS_A / \nu_A \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} MS_B &= \text{kuadrat tengah faktor B} \\ &= SS_B / \nu_B \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} MS_{\text{error}} &= \text{kuadrat tengah } \textit{error} \\ &= SS_{\text{error}} / \nu_{\text{error}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$F_A = F_{\text{hitung}} \text{ faktor A}$$



$$= MS_A/MS_E \quad (2.23)$$

$F_B$  =  $F_{hitung}$  faktor B

$$= MS_B/MS_E \quad (2.24)$$

$k_A$  = jumlah level faktor A

$k_B$  = jumlah level faktor B

$N$  = jumlah total percobaan

$n_{Ai}$  = jumlah total pengamatan faktor A

$n_{Bj}$  = jumlah total pengamatan faktor B

#### b. Uji Distribusi F

Pengujian uji distribusi F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan (Soejanto, 2006). Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

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

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

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Selain itu, karena respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 2009):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.25)$$

maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau_i \neq 0$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0$$

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta tidak ada interaksi antara faktor A dengan faktor B, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya pengaruh faktor A



dan faktor B terhadap respon serta adanya interaksi antara faktor A dengan faktor B. Kegagalan menolak atau penolakan  $H_0$  berdasarkan pada nilai  $F_{hitung}$  yang dirumuskan:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.26)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.27)$$

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

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.28)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.29)$$

Bila menggunakan perangkat lunak statistik, kegagalan menolak  $H_0$  dilakukan jika  $P_{value}$  lebih besar daripada  $\alpha$  (taraf signifikansi). Kegagalan menolak  $H_0$  bisa juga dilakukan apabila nilai  $F_{hitung} > 2$  (Park, 1996).

c. Rasio S/N

Variabel respon yang dihasilkan dipengaruhi oleh kombinasi beberapa variabel proses, baik itu variabel proses yang terkontrol dan dapat diubah-ubah maupun variabel proses yang tidak terkontrol. Karakteristik dari masing-masing variabel respon yang dipilih tidak selalu sama. Rasio S/N digunakan untuk memilih nilai level variabel proses terbesar untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari setiap respon pada eksperimen. Penggunaan Rasio S/N dilakukan untuk meminimalkan karakteristik kualitas terhadap variabel proses yang tidak dapat dikendalikan. Perhitungan rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu (Park, 1996):

1. Semakin kecil semakin baik (*smaller is better*)

Rasio S/N untuk karakteristik ini dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.30)$$



2. Tertuju pada nilai tertentu (*nominal is best*)

Rasio S/N untuk karakteristik ini dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.31)$$

3. Semakin besar semakin baik (*larger is better*)

Rasio S/N untuk karakteristik ini dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.32)$$

## 2.9 Pengujian Asumsi Residual

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

1. Pengujian Independen

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

2. Pengujian Identik

Pengujian varian 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 disekitar garis nol) dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.



### 3. Pengujian Distribusi Normal

Normal *probability plot* pada perangkat komputasi statistik dapat digunakan untuk menyatakan residual suatu respon berdistribusi normal atau tidak. Kolmogorov-Smirnov *normality test* digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : residual berdistribusi normal.

$H_1$  : residual tidak berdistribusi normal.

$H_0$  gagal ditolak apabila  $P_{\text{value}} > \alpha$ .

#### 2.10 Metode Taguchi-Grey-Fuzzy

Optimasi dalam metode Taguchi hanya dapat dilakukan untuk satu respon saja. Untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi, *grey relational analysis* (GRA) dan logika *fuzzy*.

Metode GRA diawali dengan teori *grey system* yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan analisis hubungan antar respon dan variabel, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan (Lin dan Lin, 2005). GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey*. Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon.

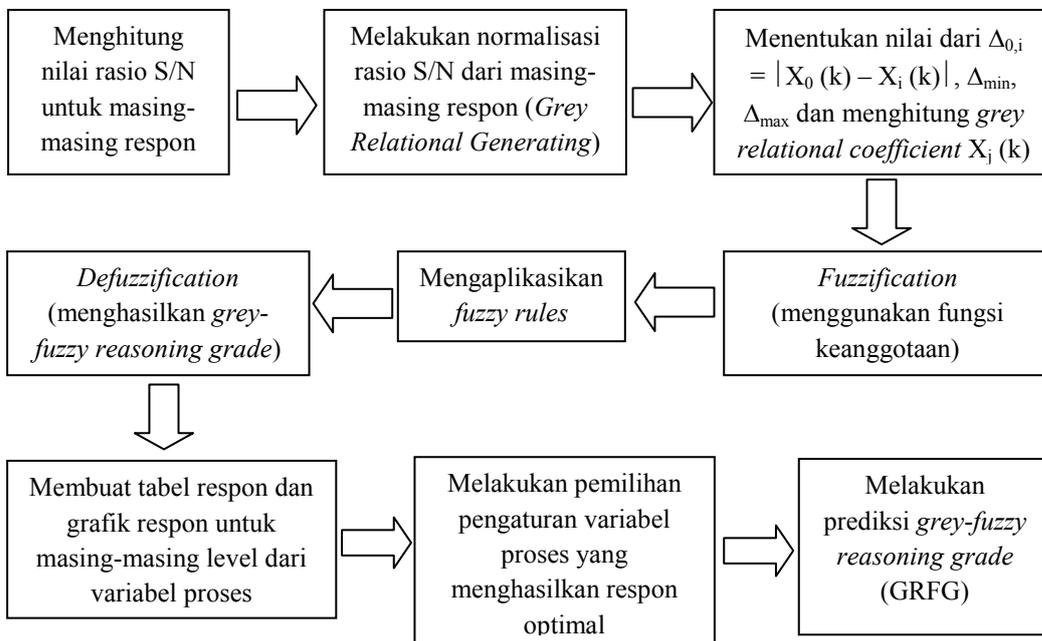
Logika *fuzzy* pertama kali diformulasikan oleh Dr. Zadeh pada tahun 1965. Metode ini diformulasikan dalam upaya mencari nilai tengah antara nol dan satu. Dr. Zadeh melakukan modifikasi pada teori himpunan, dimana setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang selalu bernilai kontinyu antara nol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

Logika *fuzzy* mempunyai kemampuan untuk memproses variabel respon yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara pasti, misalnya tinggi, lambat, dan bising. Ketidakjelasan dalam menggambarkan suatu variabel respon dapat secara alami dimodelkan dengan menggunakan logika *fuzzy* (Dhavamani dan Alwarsamy, 2011). Dalam logika *fuzzy*, variabel respon yang



bersifat kabur direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai *crisp* (tegas) dan derajat keanggotaan (*membership function*).

Langkah-langkah optimasi dengan metode Taguchi-grey-fuzzy dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Langkah-langkah optimasi Taguchi-grey-fuzzy

Rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menghitung rasio S/N untuk masing-masing variabel respon.

Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik dari setiap variabel respon sesuai dengan persamaan 2.30 hingga persamaan 2.32.

2. Melakukan normalisasi data untuk masing-masing variabel respon.

Tabel 2.6 menunjukkan penempatan nilai variabel respon untuk proses normalisasi.

**Tabel 2.6** 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 n	$X_n(1)$	$X_n(2)$	...	$X_n(k)$

Sumber: Lin dan Lin, 2002



Cara yang digunakan untuk melakukan normalisasi tergantung pada karakteristik respon yang meliputi: semakin besar semakin baik (*larger is better*), semakin kecil semakin baik (*smaller is better*) dan tertuju pada nilai tertentu (*nominal is best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” adalah (Lin dan Lin, 2002):

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.33)$$

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

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.34)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “tertuju pada nilai tertentu” adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.35)$$

Dengan:

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

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

$X_{ob}(k)$  = nilai target dari  $X_i(k)$

Pada penelitian ini, normalisasi dilakukan pada rasio S/N dengan karakteristik kualitas semakin besar semakin baik.

### 3. Menentukan *Deviation Sequence* $\Delta_{0,i}(k)$

*Deviation sequence*  $\Delta_{0,i}(k)$  adalah selisih absolut dari nilai terbesar hasil normalisasi, yaitu selisih antara 1 dengan data yang telah dinormalisasi. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Lin dkk., 2002):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \quad (2.36)$$



#### 4. Menentukan *Grey Relational Coefficient* $\xi_i(k)$

*Grey relational coefficient* (GRC) menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. GRC akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah (Lin dkk., 2002):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \Delta_{max}} \quad (2.37)$$

Dengan:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$= \textit{distinguish coefficient}$$

Pada umumnya nilai *distinguish coefficient* diatur berdasarkan kebutuhan dan besarnya antara 0 dan 1. Nilai *distinguish coefficient* yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 (Tosun, 2006). Nilai GRC yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut.

#### 5. Tahap *Fuzzification*

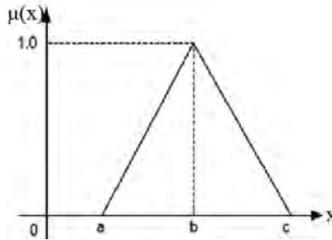
*Fuzzification* merupakan proses pengubahan nilai awal, yaitu GRC menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang digunakan untuk menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya, atau sering juga disebut dengan derajat keanggotaan. Interval nilai keanggotaan yang digunakan adalah antara 0 sampai 1. Pendekatan fungsi digunakan sebagai salah satu cara untuk mendapatkan nilai keanggotaan. Ada dua fungsi keanggotaan yang umum digunakan dalam penelitian, yaitu fungsi keanggotaan kurva segitiga dan kurva trapesium (Kusumadewi dan Purnomo, 2010).

Fungsi keanggotaan kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis linear, yaitu fungsi linier naik dan fungsi linier turun. Fungsi keanggotaan kurva segitiga dapat dituliskan sebagai berikut:



$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases} \quad (2.38)$$

Fungsi keanggotaan kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut ini.

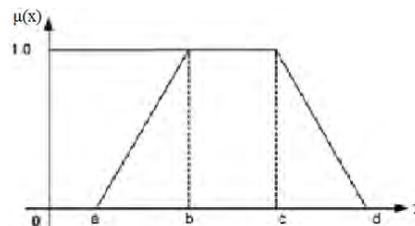


**Gambar 2.6** Fungsi keanggotaan kurva segitiga

Fungsi keanggotaan kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan sama, yaitu bernilai satu. Fungsi keanggotaan kurva trapesium adalah sebagai berikut (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{c-d}; & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.39)$$

Bentuk fungsi keanggotaan kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Fungsi keanggotaan kurva trapesium



## 6. Fuzzy Rules

*Fuzzy rules* didefinisikan sebagai aturan tentang hubungan antara *output* dan nilai-nilai tertentu pada masing-masing variabel *input*. Selain itu, *fuzzy rules* juga merupakan alat penarik kesimpulan yang nantinya akan menghasilkan nilai *fuzzy* berdasarkan logika *fuzzy*. Biasanya *fuzzy rules* dibuat berdasarkan pengelompokkan dengan bentuk batasan aturan *if-then* (jika-maka), dan contohnya adalah sebagai berikut:

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

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

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

Derajat keragaman dari keanggotaan dari himpunan *fuzzy* akan dihitung berdasarkan nilai dari  $x_1$ ,  $x_2$ , hingga  $x_k$ , dan  $y$ , sedangkan  $A$ ,  $B$  hingga  $Y$  adalah himpunan *fuzzy* yang ditetapkan berdasarkan fungsi keanggotaan. Sebuah *output fuzzy* multi respon dihasilkan dengan menggunakan operasi *max-min inference* dan *fuzzy rules*. Apabila  $x_1$ ,  $x_2$ , hingga  $x_3$  adalah *grey relational coefficient* maka fungsi keanggotaan dari  $y$  yang merupakan *output* multi respon dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu Z_0(y) = ((\mu A_1(x_1) \wedge \mu B_1(x_2) \wedge \mu C_1(x_3) \wedge \mu Z_1(x_3)) \vee \dots \vee ((\mu A_k(x_1) \wedge \mu B_k(x_2) \wedge \mu C_k(x_3) \wedge \mu Z_k(x_3))) \quad (2.40)$$

dimana secara berturut-turut  $\wedge$  dan  $\vee$  adalah operasi minimum dan maksimum.

## 7. Defuzzification

*Defuzzification* merupakan pengubahan nilai *fuzzy* menjadi *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG) atau *multi-response performance index* (MRPI) dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Metode yang paling sering digunakan pada proses *defuzzification* adalah metode *centroid*. Pada metode ini, *defuzzification* yang dilakukan dengan cara



mengambil titik pusat ( $z^*$ ) daerah *fuzzy*. Penentuan titik pusat dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$z^* = \frac{\int_Z^n z \mu(z) dz}{\int_Z^n \mu(z) dz} \quad (2.41)$$

Perumusan yang lain adalah sebagai berikut (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.42)$$

Dengan:

$z_j$  = nilai domain ke- $j$

$z^*$  = nilai GFRG

$\mu(z_j)$  = derajat keanggotaan

#### 8. Menentukan Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimal

Makin besar nilai GFRG, maka semakin optimal juga respon dari kombinasi variabel proses tersebut. Penentuan kombinasi variabel proses terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GFRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7** Respon *Grey Fuzzy Reasoning Grade*

	Level 1	Level 2	Level j
<b>Variabel proses 1</b>	$Y_{11}$	-	$Y_{1j}$
<b>Variabel proses 2</b>	$Y_{21}$	-	$Y_{2j}$
-			
<b>Variabel proses i</b>	$Y_{i1}$	-	$Y_{ij}$
<b>Max-Min</b>	$Q_1$		$Q_j$

Sumber: Lin dan Lin, 2002

$Y_{ij}$  adalah rata-rata nilai GFRG yang dikelompokkan berdasarkan variabel proses ke- $i$  dan level ke- $j$ .

Grafik respon dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level variabel proses yang menghasilkan respon yang optimal.



## 9. Memprediksi Nilai GFRG Hasil Optimasi

Nilai prediksi GFRG berdasarkan kombinasi level variabel proses untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini (Lin dan Lin, 2002):

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (2.43)$$

Dengan:

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

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

$q$  = jumlah variabel proses yang mempengaruhi respon secara signifikan

### 2.11 Interpretasi Hasil Eksperimen

Interpretasi yang dilakukan pada hasil eksperimen dengan menggunakan desain eksperimen Taguchi adalah sebagai berikut:

#### 1. Persen Kontribusi

Persen kontribusi digunakan untuk mengindikasikan kekuatan relatif sebuah variabel proses dan/atau interaksi untuk mengurangi variasi yang terjadi. Perhitungan persen kontribusi pada dasarnya adalah fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing variabel proses yang signifikan.

Komponen-komponen yang dihitung dalam persen kontribusi adalah variabel proses dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka berarti tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka ada faktor yang berpengaruh terabaikan, sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu variabel proses dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Ross, 2008):

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \% \quad (2.44)$$

Dengan:

$$SS'_A = SS_A - \nu_A \cdot MS_E \quad (2.45)$$

$SS_A$  = jumlah kuadrat dari variabel proses yang dihitung persen kontribusinya

$SS_T$  = jumlah kuadrat total



$\nu_A$  = derajat kebebasan dari variabel proses yang dihitung persen kontribusinya  
 $MS_E$  = rata-rata kuadrat dari faktor *error*

## 2. Interval keyakinan

Untuk kondisi optimum, interval keyakinan dihitung menggunakan rumus (Ross, 2008):

$$CI_{pop} = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;\nu_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.46)$$

$$\hat{\mu} - CI_{pop} \leq \mu \leq \hat{\mu} + CI_{pop} \quad (2.47)$$

Dengan:

$\hat{\mu}$  = dugaan rata-rata GFRG pada kondisi optimal

$n_{eff}$  = banyaknya pengamatan efektif

$$= \frac{\text{Jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata}} \quad (2.48)$$

### 2.12 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi merupakan langkah terakhir yang harus dilakukan pada penelitian tentang optimasi proses. Eksperimen ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level faktor-faktor hasil optimasi. Jumlah replikasi untuk eksperimen konfirmasi harus lebih besar daripada jumlah replikasi eksperimen pada proses optimasi. Tujuan eksperimen konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisa, serta untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil respon secara aktual (Ross, 2008).

Eksperimen dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

- Melakukan pengujian berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- Membandingkan rata-rata hasil eksperimen konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.

Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil apabila:

- Rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.



- b. Rata-rata respon hasil eksperimen konfirmasi berada didalam interval keyakinan  $(1-\alpha)$  100% dari rata-rata respon hasil prediksi. Interval keyakinan eksperimen konfirmasi dapat dihitung dengan rumus (Ross, 2008):

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha,1,\theta_E)} MS_E \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.49)$$

$$\hat{\mu} - CI_{CE} \leq \mu \leq \hat{\mu} + CI_{CE} \quad (2.50)$$

Dengan:

$r$  = jumlah sampel dalam eksperimen konfirmasi

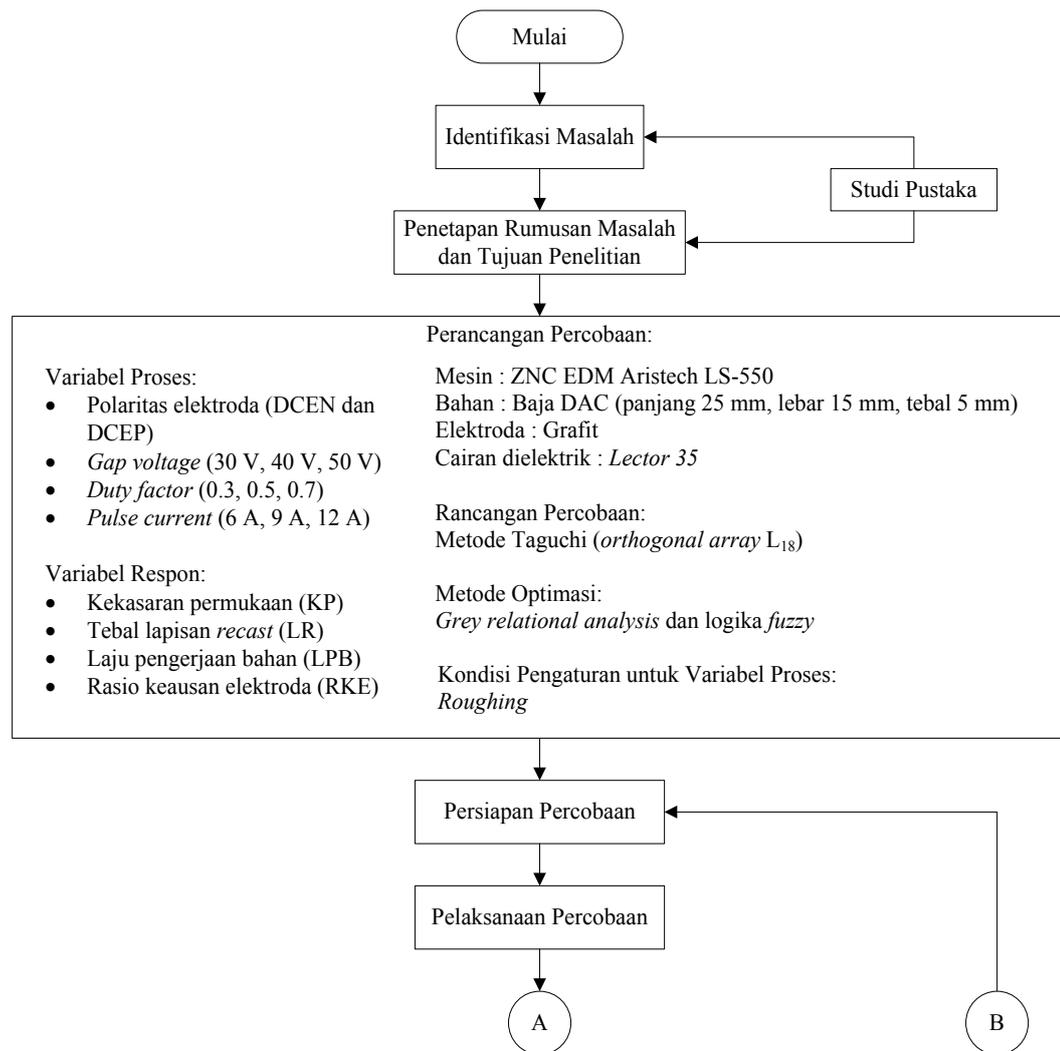
$\hat{\mu}$  = dugaan rata-rata GFRG pada kondisi optimal



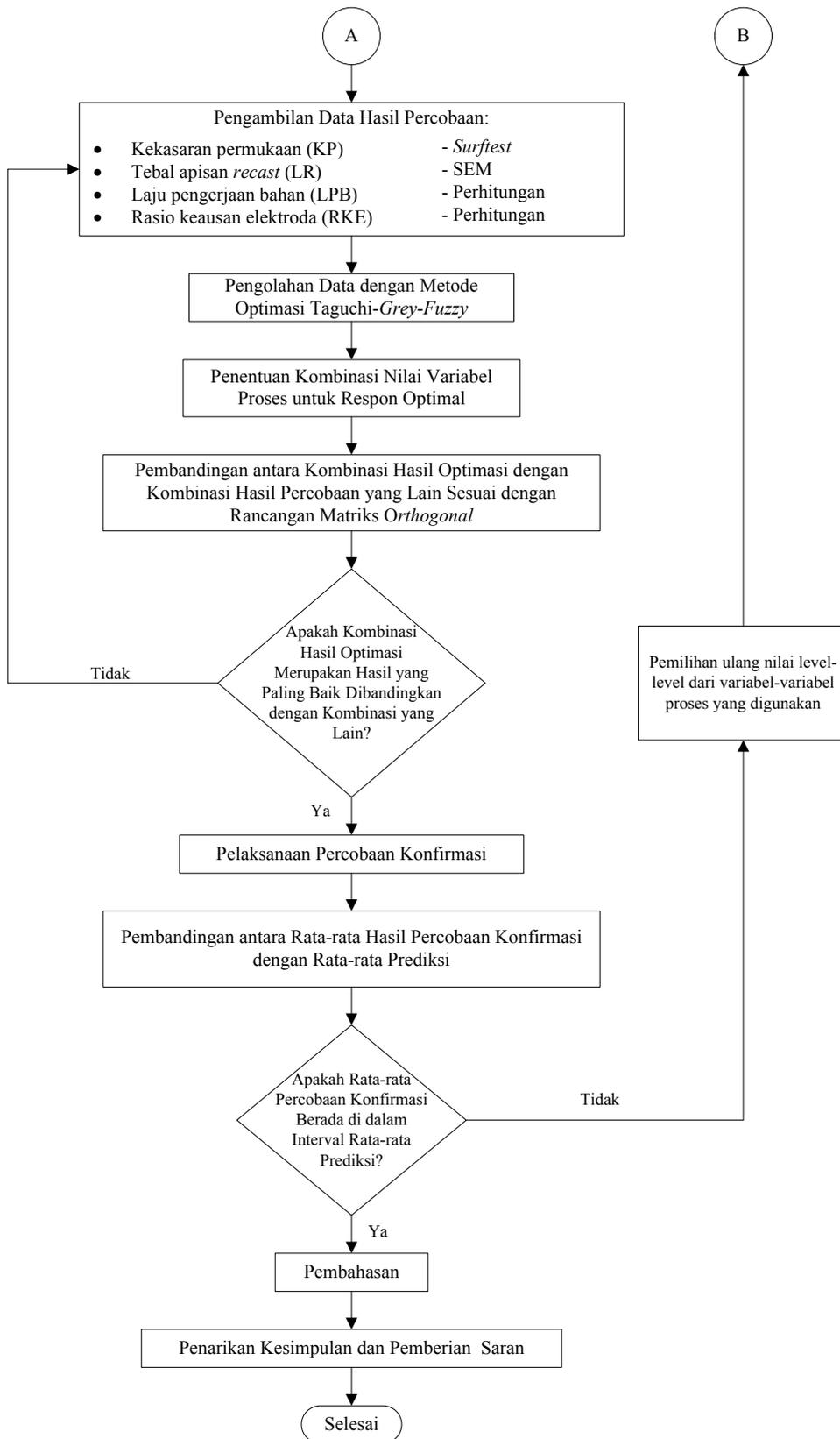
## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ditetapkan dengan tujuan agar penelitian yang dilakukan dapat terarah dan mengena pada tujuan penelitian. Gambar 3.1 berikut ini menunjukkan diagram alir dari penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian



**Gambar 3.1** Skema diagram alir penelitian (lanjutan)



### 3.2 Variabel Penelitian

Untuk mendapatkan data eksperimen pada proses EDM, variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

#### 1. Variabel Proses

Variabel proses adalah variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan. Ada empat variabel proses yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

##### a. Polaritas elektroda

Pada penelitian ini ditetapkan menggunakan polaritas elektroda negatif (DCEN) dan polaritas elektroda positif (DCEP) untuk menentukan variabel proses yang optimal.

##### b. *Gap voltage*

Pada penelitian ini pengaturan *gap voltage* dilakukan pada nilai 30 V, 40 V, dan 50 V sesuai dengan pengaturan yang mampu disediakan oleh mesin EDM *sinking* Aristech LS-550.

##### c. *Duty factor*

*Duty factor* adalah perbandingan antara *on time* dengan total waktu tiap siklus. Tiap siklus terdiri dari sekali *on time* dan sekali *off time*.

$$Duty Factor = \frac{on\ time}{on\ time + off\ time} \quad (3.1)$$

Besarnya *duty factor* pada mesin ini ditetapkan pada nilai 0,3, 0,5 dan 0,7.

##### d. *Pulse Current*

Arus listrik yang dihasilkan oleh mesin EDM *sinking* ini adalah antara 0 A sampai 75 A. Penelitian ini menggunakan jenis pengerjaan medium dengan nilai *pulse current* 6 A, 9 A dan 12 A.

#### 2. Variabel Konstan

Variabel konstan merupakan variabel proses yang tidak diteliti. Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian. Pada penelitian ini variabel yang dijaga tetap konstan adalah jenis cairan dielektrik.



### 3. Variabel Respon

Variabel respon merupakan variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan dan nilainya dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan, serta hasilnya diketahui setelah melaksanakan percobaan. Variabel respon yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ )
- b. Tebal lapisan *recast* ( $\mu\text{m}$ )
- c. Laju pengerjaan bahan ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )
- d. Rasio keausan elektroda (%)

#### 3.3 Karakteristik Variabel Respon Optimal

Masing-masing variabel respon dari eksperimen yang terdiri dari kekasaran permukaan, lapisan *recast* dan laju pengerjaan bahan bertujuan untuk mencapai karakteristik variabel respon yang optimal. Karakteristik variabel respon yang diharapkan untuk kekasaran permukaan adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*), yang berarti bahwa nilai kekasaran permukaan yang minimum adalah yang paling diinginkan. Karakteristik variabel respon untuk lapisan *recast* adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*), yang berarti bahwa semakin tipis lapisan *recast* yang terbentuk adalah yang paling diinginkan. Karakteristik variabel respon yang diharapkan untuk laju pengerjaan bahan adalah semakin besar semakin baik (*larger is better*). Karakteristik variabel respon yang diharapkan untuk rasio keausan elektroda adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*).

#### 3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

Material dan peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

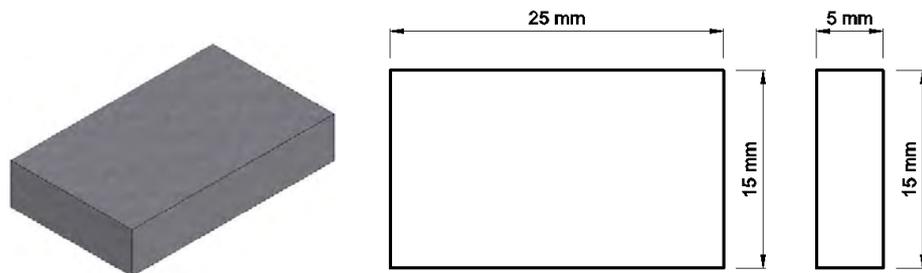
##### 3.4.1 Bahan Penelitian

###### 1. Benda Kerja

Material yang digunakan untuk benda kerja adalah baja DAC yang telah dikeraskan dengan dimensi panjang 25 mm, lebar 15 mm, tebal 5 mm dan



nilai kekerasan antara 48-50 HRC. Material ini biasanya digunakan untuk pembuatan *punch*, *dies*, *shearing blade*, *cold forging tool*, dan proses lainnya yang membutuhkan sifat tahan aus yang tinggi. Pemilihan baja DAC sebagai benda kerja didasarkan pada kemultifungsian dari material ini. Bentuk dan dimensi dari benda kerja yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.2.



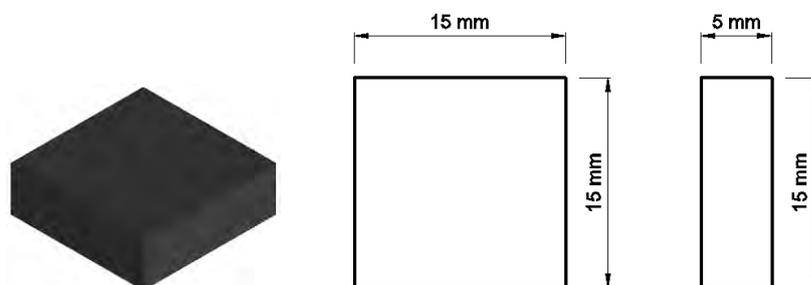
**Gambar 3.2** Bentuk dan dimensi benda kerja

## 2. Elektroda

Elektroda yang digunakan untuk mengerjakan material tersebut adalah grafit berbentuk pelat dengan dimensi panjang 15 mm, lebar 15 mm dan tebal 5 mm. Dasar pemilihan elektroda dalam percobaan ini adalah:

- Mampu menghasilkan laju pengerjaan material yang tinggi.
- Rasio keausan elektroda yang rendah.
- Dapat digunakan untuk mengerjakan semua jenis logam.

Gambar 3.3 menunjukkan bentuk dan dimensi dari elektroda yang akan digunakan.



**Gambar 3.3** Bentuk dan dimensi elektroda

### 3.4.2 Peralatan Eksperimen

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Mesin EDM *sinking*



Mesin EDM *sinking* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- a. Merk : ZNC EDM Aristech
- b. Model : LS-550
- c. Arah pergerakan : Z – 400 mm
- d. Fluida dielektrik : Lector-35
- e. Arus maksimum : 75 A
- f. Daya Maksimum : 6 KVA

Gambar 3.4 menunjukkan mesin EDM *sinking* yang akan digunakan dalam penelitian.



**Gambar 3.4** Mesin EDM *sinking*

## 2. Peralatan ukur

Beberapa peralatan ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

### a. Neraca Digital

Neraca digital digunakan untuk menimbang massa benda kerja, baik sebelum maupun sesudah proses EDM *sinking*. Neraca yang digunakan pada penelitian ini adalah neraca digital *pocket scale* dengan kapasitas maksimum 200 gr dan kecermatan 0,01 gr. Model neraca digital yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Neraca digital

b. *Surface Roughness Tester*

Pengukuran angka kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *Surftest* 301 seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.6. Alat ini memiliki kecermatan sebesar  $0,01 \mu\text{m}$ .



**Gambar 3.6** Mitutoyo *surftest* 301

c. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Pengamatan lapisan *recast* pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat SEM INSPECT S50 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Alat ini digunakan untuk mengamati partikel dengan perbesaran sampai 150.000 kali dengan resolusi kedalaman 3-100 nanometer.



**Gambar 3.7** *Scanning electron microscope (SEM) INSPECT S50*



### 3.5 Rancangan Percobaan

#### 3.5.1 Pengaturan Variabel Proses pada Mesin EDM *Sinking*

Langkah awal yang dilakukan sebelum memilih level adalah menentukan jenis proses EDM *sinking* yang digunakan dalam penelitian. Ada dua kategori pemesinan yang biasanya dijalankan pada proses EDM, yaitu *finishing* dan *roughing*. Kategori pemesinan yang dipilih adalah *roughing*, maka penentuan jumlah level dan pengaturan parameter disesuaikan dengan kategori yang telah ditentukan.

#### 3.5.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Derajat kebebasan pada matriks ortogonal harus bernilai sama atau lebih besar dari pada total derajat kebebasan variabel proses dan level yang telah ditetapkan. Berdasarkan banyaknya variabel bebas dan jumlah level, maka perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan matriks ortogonal yang digunakan. Derajat kebebasan variabel proses dan level disajikan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Total Derajat Kebebasan Variabel Proses dan Level

No	Variabel Proses	Kode	Jumlah Level (k)	$v_n = (k-1)$
1	Polaritas	A	2	1
2	<i>Gap voltage</i>	B	3	2
3	<i>Duty factor</i>	C	3	2
4	<i>Pulse current</i>	D	3	2
<b>Total derajat kebebasan</b>				<b>7</b>

Sumber : Hasil perhitungan perangkat komputasi statistik

Tabel 3.1 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan variabel proses dan level yang digunakan adalah 7, sehingga matriks ortogonal yang memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan adalah  $L_{18}$ . Rancangan percobaan matriks ortogonal  $L_{18}$  memiliki 4 kolom dan 18 baris. Rancangan ini dapat digunakan untuk empat buah variabel bebas dimana satu kolom untuk dua level dan satu kolom lagi untuk tiga level. Rancangan percobaan untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.



Tabel 3.2 Rancangan Eksperimen berdasarkan Matriks Ortogonal  $L_{18}$

Pengaturan Variabel Proses Kombinasi	Variabel Proses			
	Polaritas	Gap voltage (Volt)	Duty factor	Pulse current (A)
1	negatif	30	0,3	6
2	negatif	30	0,5	9
3	negatif	30	0,7	12
4	negatif	40	0,3	6
5	negatif	40	0,5	9
6	negatif	40	0,7	12
7	negatif	50	0,3	9
8	negatif	50	0,5	12
9	negatif	50	0,7	6
10	positif	30	0,3	12
11	positif	30	0,5	6
12	positif	30	0,7	9
13	positif	40	0,3	9
14	positif	40	0,5	12
15	positif	40	0,7	6
16	positif	50	0,3	12
17	positif	50	0,5	6
18	positif	50	0,7	9

Sumber : Hasil perhitungan perangkat komputasi statistik

Eksperimen dilakukan secara acak dengan kombinasi variabel proses mengacu pada rancangan percobaan yang sesuai dengan matriks ortogonal pada Tabel 3.2. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan fasilitas randomisasi bilangan melalui bantuan perangkat lunak komputasi statistik. Pada masing-masing kombinasi variabel proses dilakukan replikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan



berlangsung. Tabel 3.3 berikut ini menunjukkan rancangan eksperimen untuk replikasi pertama dengan urutan percobaan yang sudah diacak.

**Tabel 3.3** Rancangan Eksperimen berdasarkan Matriks Ortogonal L<sub>18</sub> Replikasi pertama

Run Order	Pengaturan Variabel Proses Kombinasi	Variabel Proses			
		Polaritas	Gap voltage (Volt)	Duty factor	Pulse current (A)
1	5	negatif	40	0,5	9
2	3	negatif	30	0,7	12
3	13	positif	40	0,3	9
4	18	positif	50	0,7	9
5	2	negatif	30	0,5	9
6	4	negatif	40	0,3	6
7	11	positif	30	0,5	6
8	12	positif	30	0,7	9
9	8	negatif	50	0,5	12
10	16	positif	50	0,3	12
11	15	positif	40	0,7	6
12	17	positif	50	0,5	6
13	9	negatif	50	0,7	6
14	14	positif	40	0,5	12
15	6	negatif	40	0,7	12
16	10	positif	30	0,3	12
17	7	negatif	50	0,3	9
18	1	negatif	30	0,3	6

Sumber : Hasil perhitungan perangkat komputasi statistik

Rancangan eksperimen untuk replikasi kedua ditunjukkan pada Tabel 3.4 dengan urutan percobaan yang sudah diacak.



**Tabel 3.4** Rancangan Eksperimen berdasarkan Matriks Ortogonal  $L_{18}$  Replikasi kedua

Run Order	Pengaturan Variabel Proses Kombinasi	Variabel Proses			
		Polaritas	Gap voltage (Volt)	Duty factor	Pulse current (A)
1	17	positif	50	0,5	6
2	8	negatif	50	0,5	12
3	11	positif	30	0,5	6
4	6	negatif	40	0,7	12
5	15	positif	40	0,7	6
6	1	negatif	30	0,3	6
7	4	negatif	40	0,3	6
8	5	negatif	40	0,5	9
9	9	negatif	50	0,7	6
10	2	negatif	30	0,5	9
11	16	positif	50	0,3	12
12	12	positif	30	0,7	9
13	7	negatif	50	0,3	9
14	18	positif	50	0,7	9
15	3	negatif	30	0,7	12
16	14	positif	40	0,5	12
17	10	positif	30	0,3	12
18	13	positif	40	0,3	9

Sumber : Hasil perhitungan perangkat komputasi statistik

### 3.6 Prosedur Pelaksanaan Percobaan

Langkah-langkah pelaksanaan percobaan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda kerja dan elektroda.

Persiapan benda kerja dan elektroda dilakukan untuk memastikan tidak ada cat, kotoran dan minyak lainnya yang melekat pada benda kerja dan elektroda.



---

Untuk mempermudah penentuan titik referensi antara benda kerja dan elektroda maka dilakukan perataan pada permukaan benda kerja dan elektroda dengan menggunakan mesin gerinda. Selanjutnya dilakukan penimbangan massa awal dari benda kerja dan elektroda.

2. Memasang benda kerja.

Benda kerja dan meja mesin dibersihkan dari minyak dan selanjutnya benda kerja disusun pada meja mesin EDM *sinking*. Oleh karena dimensi benda kerja yang kecil, maka ragum diperlukan untuk mencekam dan memastikan bahwa posisi benda kerja tidak berubah pada saat proses pemesinan berlangsung

3. Pemasangan elektroda pada *holder* mesin EDM *sinking*.

Untuk memastikan bahwa posisi elektroda tidak miring, maka digunakan *dial* indikator.

4. Penentuan titik referensi.

Elektroda digerakkan ke bawah hingga permukaan benda kerja dan elektroda bersentuhan. Saat keduanya bersentuhan, alarm pada mesin akan berbunyi, kemudian sumbu Z diatur pada titik nol. Setelah itu mesin diprogram untuk meraut sedalam 1 mm. Selanjutnya nilai variabel-variabel proses dapat dimasukkan pada mesin.

5. Mengangkat posisi elektroda.

Elektroda dinaikkan kurang lebih 0,1 mm ke arah sumbu z negatif untuk mengatur posisi *nozzle*. Selanjutnya pintu bak penampung ditutup.

6. Mengaktifkan mesin.

Sebelum proses perautan dimulai, terlebih dahulu pompa diaktifkan untuk mengalirkan cairan dielektrik sampai bak penampung terisi hingga seluruh bagian elektroda dan benda kerja tertutup oleh cairan dielektrik. Selanjutnya proses perautan benda kerja dapat dilakukan.

7. Mencatat waktu perautan.

Pencatatan waktu perautan dimulai sejak terjadinya *spark* yang pertama hingga mesin berhenti. Beberapa mesin EDM telah dilengkapi dengan fitur *machining time* atau *erosion time* sehingga mempermudah operator atau peneliti untuk melakukan pencatatan waktu. Mesin akan berhenti secara otomatis jika elektroda sudah bergerak ke arah sumbu z positif sedalam 1 mm.



8. Mematikan mesin.

Sebelum pengukuran dilakukan terhadap variabel respon, terlebih dahulu tuas kran ditarik untuk mengeluarkan cairan dielektrik dari bak penampung sampai habis. Selanjutnya penutup bak penampung dan pemegang elektroda dibuka, sehingga benda kerja dan elektroda dapat dilepaskan dari ragum dan pemegang elektroda.

9. Pengukuran variabel respon.

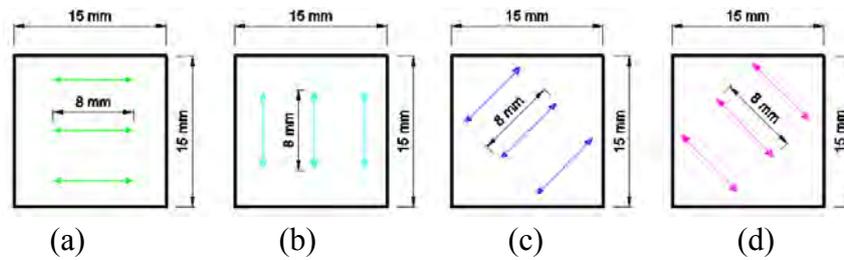
Elektroda dan benda kerja dikeringkan dan selanjutnya dilakukan penimbangan massa benda kerja dan elektroda. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan *surf test* dan lapisan *recast* diketahui dengan menggunakan SEM.

### 3.7 Pengukuran dan Pengambilan Data

#### 3.7.1 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran permukaan benda kerja dengan menggunakan *surface roughness tester* yang dinyatakan dalam  $\mu\text{m}$ . Langkah-langkah pengukuran kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

- a. Benda kerja hasil proses EDM *sinking* diletakkan pada meja rata, kemudian ujung sensor dari *surface roughness tester* disentuhkan pada permukaan benda kerja hasil proses EDM *sinking*.
- b. *Surface roughness tester* diaktifkan untuk melakukan proses pengukuran kekasaran permukaan sepanjang 0,8 mm.
- c. Nilai kekasaran permukaan dapat dilihat pada layar *display surface roughness tester*.
- d. Spesimen uji dibebaskan dari ujung sensor *surface roughness tester* dan digeser sejauh 5 mm untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan pada titik yang lainnya. Pengukuran dilakukan pada arah horizontal, vertikal dan diagonal pada satu permukaan benda kerja yang sama. Perlakuan ini diulang tiga kali sehingga akan didapatkan tiga nilai kekasaran permukaan pada setiap arah pengukuran. Skema pengukuran kekasaran permukaan yang dilakukan ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



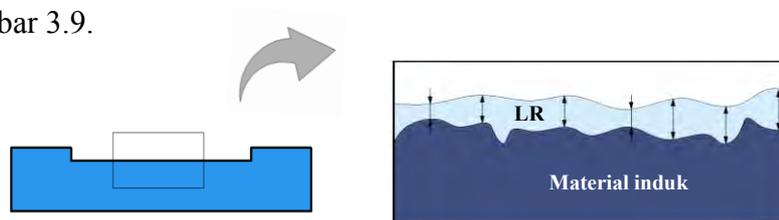
**Gambar 3.8** Skema pengukuran kekasaran permukaan

(a) arah horizontal; (b) arah vertikal; (c) arah diagonal 45°; (d) arah diagonal -45°

Setelah didapatkan data dari keempat pengukuran kekasaran tersebut, kemudian dilakukan pengolahan data dengan melakukan uji hipotesis apakah dengan keempat cara tersebut terdapat perbedaan rata-rata kekasaran permukaan. Jika terdapat perbedaan, maka akan dipilih nilai kekasaran yang paling tinggi untuk selanjutnya dilakukan optimasi.

### 3.7.2 Pengambilan Data Tebal Lapisan *Recast*

Sebelum tebal lapisan *recast* diukur, benda kerja diamati terlebih dahulu dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Setelah lapisan tersebut terlihat pada monitor, kemudian gambar tersebut diambil sebanyak dua kali pada masing-masing spesimen dan disimpan. Pengukuran tebal lapisan *recast* dilakukan pada setiap foto dengan menggunakan perangkat lunak AutoCAD dengan cara menarik garis ukur antara kedua tepi lapisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.



**Gambar 3.9** Skema pengukuran tebal lapisan *recast*

### 3.7.3 Pengambilan Data Laju Pengerjaan Bahan

Pengambilan data laju pengerjaan bahan mengikuti prosedur yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.5.

### 3.7.4 Pengambilan Data Rasio Keausan Elektroda

Pengambilan data rasio keausan elektroda mengikuti prosedur yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.6.



---

## BAB 4

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Percobaan

Percobaan dilakukan dengan mengkombinasikan variabel-variabel proses yang terdapat pada mesin EDM *sinking* yang diduga memiliki pengaruh terhadap respon LPB, RKE, LR dan KP. Variabel-variabel proses yang dikombinasikan adalah polaritas elektroda, *gap voltage*, *duty factor* dan *pulse current*. Data hasil percobaan diperoleh berdasarkan rancangan percobaan Taguchi matriks ortogonal  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^3$ ) dengan replikasi sebanyak dua kali. Proses pemesinan dilakukan secara acak sesuai dengan kombinasi variabel-variabel yang telah dibuat. Pengambilan data dilakukan dengan urutan langkah sebagai berikut:

a. Penimbangan massa awal benda kerja dan elektroda

Proses penimbangan setiap benda kerja dan elektroda dilakukan sebelum proses pemesinan EDM *sinking*. Penimbangan awal dilakukan sebanyak tiga kali dan data yang dihasilkan selanjutnya dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat pada lampiran 1 dan lampiran 2.

b. Waktu pemesinan

Pengambilan data waktu proses pemesinan EDM *sinking* dilakukan melalui pengamatan mulai dari semburan arus listrik awal hingga selesai proses. Lamanya waktu proses pengerjaan dibaca pada fitur *erosion time* pada layar monitor mesin EDM *sinking*. Data tersebut dapat dilihat pada lampiran 3.

c. Penimbangan massa akhir benda kerja dan elektroda

Penimbangan massa akhir benda kerja dan elektroda dilakukan setelah proses pemesinan EDM *sinking*. Tujuan penimbangan ini adalah untuk mengetahui massa setelah proses pemesinan EDM *sinking*. Penimbangan akhir dilakukan sebanyak tiga kali dan data yang dihasilkan selanjutnya dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat pada lampiran 5 dan lampiran 6.

d. Perhitungan LPB

LPB merupakan sejumlah material benda kerja yang terbuang selama proses pemesinan dibagi dengan lamanya waktu proses pemesinan EDM *sinking*



untuk mencapai kedalaman tertentu. Contoh perhitungan LPB adalah sebagai berikut:

- Perhitungan massa benda kerja yang terbuang

Massa benda kerja yang terbuang merupakan selisih dari massa benda kerja sebelum dan setelah proses pemesinan. Contoh perhitungan dari massa benda kerja yang terbuang adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta m_{bk} &= m_{bk1} - m_{bk2} \\ &= 12,54 - 11,03 \\ &= 1,51 \text{ gr}\end{aligned}$$

Dengan:

$m_{bk1}$  = massa benda kerja sebelum proses pemesinan (gram)

$m_{bk2}$  = massa benda kerja setelah proses pemesinan (gram)

$\Delta m_{bk}$  = selisih massa benda kerja sebelum dan setelah proses pemesinan (gram)

- Perhitungan volume benda kerja yang terbuang

Volume benda kerja yang terbuang merupakan selisih dari massa benda kerja terbuang dibagi dengan massa jenis benda kerja. Berikut ini adalah contoh perhitungan dari volume benda kerja yang terbuang.

$$\begin{aligned}V_{bk} &= \frac{\Delta m_{bk}}{\rho_{bk}} \\ &= \frac{1,51}{0,00759} \\ &= 198,926 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

Dengan

$V_{bk}$  = volume benda kerja yang terbuang ( $\text{mm}^3$ )

$\rho_{bk}$  = massa jenis benda kerja ( $0,00759 \text{ gr/mm}^3$ )

- LPB

LPB merupakan volume benda kerja yang terbuang dibagi dengan lamanya proses pemesinan. Contoh perhitungan LPB untuk kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{LPB} &= \frac{V_{bk}}{t} \\ &= \frac{198,926}{11,42}\end{aligned}$$



$$= 17,42 \text{ mm}^3/\text{menit}$$

Dengan:

t = waktu pemesinan (menit)

Dengan demikian LPB untuk percobaan kombinasi pertama adalah sebesar 17,42 mm<sup>3</sup>/menit. Perhitungan LPB selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 6.

e. Perhitungan RKE

RKE merupakan volume material elektroda yang terbang selama proses pemesinan dibagi dengan volume material benda kerja yang terbang selama proses pemesinan EDM *sinking*. Contoh perhitungan RKE adalah sebagai berikut:

- Perhitungan massa elektroda yang terbang

Massa elektroda yang terbang merupakan selisih dari massa elektroda sebelum dan setelah proses pemesinan. Contoh perhitungan dari massa elektroda yang terbang adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta m_{el} &= m_{el1} - m_{el2} \\ &= 57,85 - 57,84 \\ &= 0,01 \text{ gr}\end{aligned}$$

Dengan:

$m_{el1}$  = massa elektroda sebelum proses pemesinan (gram)

$m_{el2}$  = massa elektroda setelah proses pemesinan (gram)

$\Delta m_{el}$  = selisih massa elektroda sebelum dan setelah proses pemesinan (gram)

- Perhitungan volume elektroda yang terbang

Volume elektroda yang terbang merupakan selisih dari massa elektroda terbang dibagi dengan massa jenis elektroda. Berikut ini adalah contoh perhitungan dari volume elektroda yang terbang.

$$\begin{aligned}V_{el} &= \frac{\Delta m_{el}}{\rho_{el}} \\ &= \frac{0,01}{0,00176} \\ &= 5,654 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

Dengan



$V_{el}$  = volume elektroda yang terbangun ( $\text{mm}^3$ )

$\rho_{el}$  = massa jenis elektroda ( $0,00176 \text{ gr/mm}^3$ )

- RKE

RKE merupakan volume elektroda yang terbangun dibagi dengan volume benda kerja yang terbangun. Contoh perhitungan RKE untuk kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{RKE} &= \frac{V_{bk}}{V_{el}} \times 100\% \\ &= \frac{198,926}{5,654} \times 100\% \\ &= 2,84\% \end{aligned}$$

Dengan demikian RKE untuk percobaan kombinasi pertama adalah sebesar 2,84%. Perhitungan RKE selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 7.

f. Pengukuran KP

Pengukuran kekasaran permukaan benda kerja dilakukan menggunakan Mitutoyo *Surftest* 301. Pengukuran setiap spesimen dilakukan pada empat arah, yaitu horizontal, vertikal,  $45^\circ$  dan  $-45^\circ$ . Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap arah. Data yang dihasilkan selanjutnya dirata-ratakan, kemudian dilakukan uji hipotesis apakah terdapat perbedaan rata-rata kekasaran permukaan pada keempat cara pengambilan data tersebut. Data tersebut dapat dilihat pada lampiran 8.

g. Pengukuran LR

Tebal lapisan *recast* (LR) diukur berdasarkan hasil foto SEM dengan bantuan perangkat lunak Auto CAD. Pengukuran tebal lapisan *recast* diambil sebanyak sepuluh kali pada setiap foto dan data yang dihasilkan selanjutnya dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat pada lampiran 9.

Pengolahan data disesuaikan dengan langkah-langkah optimasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Data keseluruhan hasil percobaan ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut ini.



Tabel 4.1 Data Hasil Percobaan

Komb.	LPB (mm <sup>3</sup> /min)		RKE (%)		KP (μm)		LR (μm)	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
1	17.42	18.32	2.84	2.60	9.00	8.56	58.45	58.46
2	21.11	22.26	2.68	2.57	10.10	10.34	58.21	58.90
3	41.45	42.91	2.67	2.65	12.12	12.36	75.53	75.95
4	20.28	20.37	2.84	2.85	9.57	9.12	50.89	50.73
5	31.83	33.18	2.68	2.52	10.82	10.64	54.27	54.87
6	44.09	44.56	2.62	2.60	12.25	12.33	73.18	73.07
7	19.23	19.05	2.68	2.55	9.44	9.52	39.82	39.81
8	33.96	33.70	2.47	2.48	11.04	11.25	47.99	47.90
9	28.65	28.88	2.63	2.55	8.90	9.14	56.17	56.37
10	22.53	22.40	2.45	2.47	8.62	8.85	59.44	58.97
11	29.02	29.15	2.54	2.50	6.50	6.71	59.63	59.94
12	36.42	36.92	2.47	2.52	8.20	7.95	74.39	74.91
13	26.00	25.74	2.57	2.54	7.08	7.25	57.10	57.98
14	36.80	37.11	2.39	2.42	8.66	8.53	60.40	60.47
15	37.04	37.10	2.62	2.67	8.67	9.12	74.83	74.43
16	26.80	25.87	2.40	2.36	8.08	8.26	50.08	50.16
17	30.33	29.60	2.42	2.40	6.13	6.32	44.88	44.84
18	35.54	35.22	2.42	2.38	7.87	8.09	60.01	60.14

Sumber: Hasil pengukuran

#### 4.2 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 respon. Respon LPB memiliki karakteristik semakin besar semakin baik, nilai rasio S/N dihitung menggunakan persamaan 2.32. Rasio S/N RKE, KP dan LR dihitung dengan menggunakan persamaan 2.30 karena memiliki karakteristik kualitas respon semakin kecil semakin baik.



Contoh perhitungan rasio S/N dari LPB dengan karakteristik kualitas respon semakin besar semakin baik pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

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

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{17,42^2} + \frac{1}{18,32^2} \right) \right]$$

$$S/N = -10 \log 0,003137$$

$$S/N = 25,03480$$

Sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan, nilai rasio S/N yang diperoleh untuk masing-masing respon yang diamati pada masing-masing kombinasi seting variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rasio S/N dari Respon

Komb.	Variabel Proses				LPB	RKE	KP	LR
	Polaritas elektroda	Gap voltage	Duty factor	Pulse Current				
1	-	30	0,3	6	25.035	-8.706	-18.871	-35.337
2	-	30	0,5	9	26.715	-8.389	-20.191	-35.352
3	-	30	0,7	12	32.498	-8.491	-21.756	-37.587
4	-	40	0,3	6	26.160	-9.093	-19.413	-34.119
5	-	40	0,5	9	30.233	-8.316	-20.610	-34.740
6	-	40	0,7	12	32.932	-8.328	-21.791	-37.281
7	-	50	0,3	9	25.638	-8.352	-19.535	-32.000
8	-	50	0,5	12	30.586	-7.868	-20.939	-33.614
9	-	50	0,7	6	29.177	-8.280	-19.105	-35.006
10	+	30	0,3	12	27.030	-7.818	-18.828	-35.447
11	+	30	0,5	6	29.272	-8.028	-16.399	-35.532
12	+	30	0,7	9	31.285	-7.945	-18.146	-37.461
13	+	40	0,3	9	28.255	-8.148	-17.103	-35.200



Tabel 4.2 Rasio S/N dari Respon

Komb.	Variabel Proses				LPB	RKE	KP	LR
	Polaritas elektroda	Gap voltage	Duty factor	Pulse Current				
14	+	40	0,5	12	31.354	-7.631	-18.685	-35.625
15	+	40	0,7	6	31.380	-8.437	-18.987	-37.458
16	+	50	0,3	12	28.407	-7.525	-18.247	-34.000
17	+	50	0,5	6	29.531	-7.637	-15.881	-33.037
18	+	50	0,7	9	30.975	-7.622	-18.043	-35.574
Maks					32.932	-7.525	-15.881	-32.000
Min					25.035	-9.093	-21.791	-37.587

Sumber: Hasil perhitungan

### 4.3 Normalisasi Rasio S/N

Proses normalisasi rasio S/N adalah proses untuk mengubah nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Proses normalisasi juga dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respon. Karakteristik kualitas dari rasio S/N adalah semakin besar semakin baik. Karakteristik kualitas ini berlaku untuk semua rasio S/N dari masing-masing respon. Contoh perhitungan normalisasi nilai rasio S/N LPB untuk seting faktor kombinasi pertama dengan menggunakan persamaan 2.33 adalah sebagai berikut:

1. Penentuan nilai maksimum dan minimum dari rasio S/N

Nilai maksimum rasio S/N laju pengerjaan bahan = 32,932

Nilai minimum rasio S/N laju pengerjaan bahan = 25,035

2. Perhitungan normalisasi rasio S/N

$$X_i^* = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, 18, \quad k = 1, 2, 3.$$

$$X_1^*(1) = \frac{25,035 - 25,035}{32,932 - 25,035}$$

$$X_1^*(1) = 0,00$$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N masing-masing respon untuk setiap kombinasi faktor dapat dilihat pada Tabel 4.3.



Tabel 4.3 Data Normalisasi Rasio S/N

Komb.	Rasio S/N				$X_i^*$			
	LPB	RKE	KP	LR	LPB	RKE	KP	LR
1	25.035	-8.706	-18.871	-35.337	0.000	0.247	0.494	0.403
2	26.715	-8.389	-20.191	-35.352	0.213	0.449	0.271	0.400
3	32.498	-8.491	-21.756	-37.587	0.945	0.384	0.006	0.000
4	26.160	-9.093	-19.413	-34.119	0.142	0.000	0.402	0.621
5	30.233	-8.316	-20.610	-34.740	0.658	0.496	0.200	0.510
6	32.932	-8.328	-21.791	-37.281	1.000	0.488	0.000	0.055
7	25.638	-8.352	-19.535	-32.000	0.076	0.472	0.382	1.000
8	30.586	-7.868	-20.939	-33.614	0.703	0.781	0.144	0.711
9	29.177	-8.280	-19.105	-35.006	0.524	0.518	0.455	0.462
10	27.030	-7.818	-18.828	-35.447	0.253	0.813	0.501	0.383
11	29.272	-8.028	-16.399	-35.532	0.537	0.679	0.912	0.368
12	31.285	-7.945	-18.146	-37.461	0.791	0.732	0.617	0.023
13	28.255	-8.148	-17.103	-35.200	0.408	0.603	0.793	0.427
14	31.354	-7.631	-18.685	-35.625	0.800	0.932	0.526	0.351
15	31.380	-8.437	-18.987	-37.458	0.803	0.418	0.474	0.023
16	28.407	-7.525	-18.247	-34.000	0.427	1.000	0.600	0.642
17	29.531	-7.637	-15.881	-33.037	0.569	0.929	1.000	0.814
18	30.975	-7.622	-18.043	-35.574	0.752	0.938	0.634	0.360

Sumber: Hasil perhitungan

#### 4.4 Grey Relational Coefficient (GRC)

Nilai GRC pada masing-masing respon dihitung menggunakan persamaan 2.37. Sebelum menghitung nilai GRC harus dihitung terlebih dahulu nilai *deviation sequence* pada masing-masing respon. Perhitungan nilai dilakukan menggunakan persamaan 2.36.

Contoh perhitungan nilai respon LPB pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{1} \right) \left| \frac{1}{1} - \left( \frac{1}{1} \right) \right| \\ & \left( \frac{1}{1} \right) \left| - \right| \\ & \left( \frac{1}{1} \right) 1,00 \end{aligned}$$



Nilai GRC dihitung berdasarkan nilai pada masing-masing responnya. Contoh perhitungan nilai GRC respon LPB pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & ( ) \text{ —————} \\ & ( ) \text{ —————} \\ & ( ) \end{aligned}$$

Hasil perhitungan nilai  $\Delta_{0,i}(k)$  masing-masing respon untuk setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.4, dan nilai GRC ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.4 *Deviation sequence*

Komb.	LPB	RKE	KP	LR
1	1.000	0.753	0.506	0.597
2	0.787	0.551	0.729	0.600
3	0.055	0.616	0.994	1.000
4	0.858	1.000	0.598	0.379
5	0.342	0.504	0.800	0.490
6	0.000	0.512	1.000	0.945
7	0.924	0.528	0.618	0.000
8	0.297	0.219	0.856	0.289
9	0.476	0.482	0.545	0.538
10	0.747	0.187	0.499	0.617
11	0.463	0.321	0.088	0.632
12	0.209	0.268	0.383	0.977
13	0.592	0.397	0.207	0.573
14	0.200	0.068	0.474	0.649
15	0.197	0.582	0.526	0.977
16	0.573	0.000	0.400	0.358
17	0.431	0.071	0.000	0.186
18	0.248	0.062	0.366	0.640
Maks	1	1	1	1
Min	0	0	0	0

Sumber: Hasil perhitungan



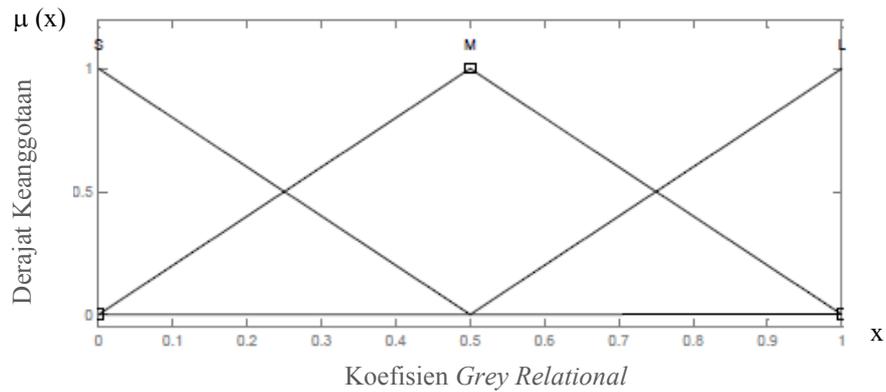
Tabel 4.5 *Grey relational coefficient*

Komb.	LPB	RKE	KP	LR
1	0.333	0.399	0.497	0.456
2	0.388	0.476	0.407	0.455
3	0.901	0.448	0.335	0.333
4	0.368	0.333	0.456	0.569
5	0.594	0.498	0.385	0.505
6	1.000	0.494	0.333	0.346
7	0.351	0.487	0.447	1.000
8	0.627	0.696	0.369	0.634
9	0.513	0.509	0.478	0.482
10	0.401	0.728	0.501	0.448
11	0.519	0.609	0.851	0.442
12	0.706	0.651	0.566	0.338
13	0.458	0.557	0.708	0.466
14	0.714	0.880	0.513	0.435
15	0.718	0.462	0.488	0.339
16	0.466	1.000	0.555	0.583
17	0.537	0.875	1.000	0.729
18	0.669	0.890	0.578	0.439

Sumber: Hasil perhitungan

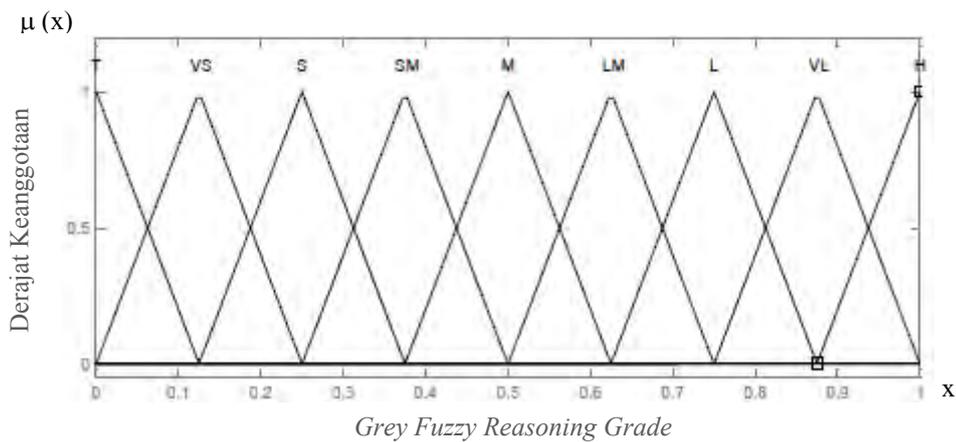
#### 4.5 *Fuzzification*

*Fuzzification* merupakan proses perubahan *input* GRC dari variabel respon menjadi bilangan fuzzy dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Variabel-variabel *input* pada penelitian ini adalah nilai GRC dari masing-masing respon LPB, RKE, KP dan LR. Fungsi keanggotaan yang digunakan pada variabel *input* adalah bentuk segitiga (*triangle*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Secara *uniform* fungsi keanggotaan didefinisikan menjadi 3 *fuzzy subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M) dan *large* (L).



Gambar 4.1 Fungsi keanggotaan untuk LPB, RKE, KP dan LR

Variabel *output* dari dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG). Fungsi keanggotaan yang digunakan pada variabel *output* sama dengan fungsi keanggotaan pada variabel *input* yaitu fungsi keanggotaan bentuk segitiga (*triangle*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada variabel *output* fungsi keanggotaan GFRG dikelompokkan ke dalam sembilan kelas *fuzzy subsets* yaitu *tiny* (T), *very small* (VS), *small* (S), *smaller middle* (SM), *middle* (M), *larger middle* (LM), *larger* (L), *very large* (VL) dan *huge* (H).



Gambar 4.2 Fungsi keanggotaan *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG)

#### 4.6 Fuzzy Rules

Pada penelitian ini, pembuatan *fuzzy rules* yang berupa aturan *if-then* (jika-maka) dilakukan dengan menggunakan variabel *input* yang berupa nilai GRC dari masing-masing respon dan GFRG sebagai variabel *output*. Aturan dasar *fuzzy*



terdiri dari sekelompok aturan kontrol untuk mengungkapkan hubungan antara GRC sebagai variabel *input* dan GFRG sebagai variabel *output*. Pada penelitian ini terdapat empat variabel *input* yaitu GRC dari respon LPB, RKE, KP dan LR dengan masing-masing memiliki tiga *fuzzy subsets*. *Fuzzy rules* yang dibutuhkan untuk mengkombinasikan seluruh variabel *input* adalah sebanyak delapan puluh satu *fuzzy rules*. Tabel 4.6 menunjukkan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4.6 *Fuzzy Rules*

Rules No.	Variabel Input GRC				Variabel Output GFRG
	LPB	RKE	KP	LR	
1	S	S	S	S	T
2	S	M	S	S	VS
3	S	L	S	S	SM
4	S	S	S	M	T
5	S	M	S	M	S
6	S	L	S	M	SM
7	S	S	S	L	VS
8	S	M	S	L	SM
9	S	L	S	L	LM
10	M	S	S	S	VS
11	M	M	S	S	S
12	M	L	S	S	M
13	M	S	S	M	VS
14	M	M	S	M	SM
15	M	L	S	M	LM
16	M	S	S	L	S
17	M	M	S	L	M
18	M	L	S	L	L
19	L	S	S	S	VS
20	L	M	S	S	SM
21	L	L	S	S	LM
22	L	S	S	M	S
23	L	M	S	M	M
24	L	L	S	M	L
25	L	S	S	L	SM
26	L	M	S	L	LM
27	L	L	S	L	VL
28	S	S	M	S	T
29	S	M	M	S	S



Tabel 4.6 *Fuzzy Rules* (lanjutan)

Rules No.	Variabel Input GRC				Variabel Output GFRG
	LPB	RKE	KP	LR	
30	S	L	M	S	M
31	S	S	M	M	VS
32	S	M	M	M	SM
33	S	L	M	M	LM
34	S	S	M	L	S
35	S	M	M	L	M
36	S	L	M	L	L
37	M	S	M	S	VS
38	M	M	M	S	SM
39	M	L	M	S	LM
40	M	S	M	M	S
41	M	M	M	M	M
42	M	L	M	M	L
43	M	S	M	L	SM
44	M	M	M	L	LM
45	M	L	M	L	VL
46	L	S	M	S	S
47	L	M	M	S	M
48	L	L	M	S	L
49	L	S	M	M	SM
50	L	M	M	M	LM
51	L	L	M	M	VL
52	L	S	M	L	M
53	L	M	M	L	L
54	L	L	M	L	H
55	S	S	L	S	VS
56	S	M	L	S	SM
57	S	L	L	S	LM
58	S	S	L	M	S
59	S	M	L	M	M
60	S	L	L	M	L
61	S	S	L	L	SM
62	S	M	L	L	LM
63	S	L	L	L	VL
64	M	S	L	S	S
65	M	M	L	S	M
66	M	L	L	S	L
67	M	S	L	M	SM
68	M	M	L	M	LM
69	M	L	L	M	VL
70	M	S	L	L	M



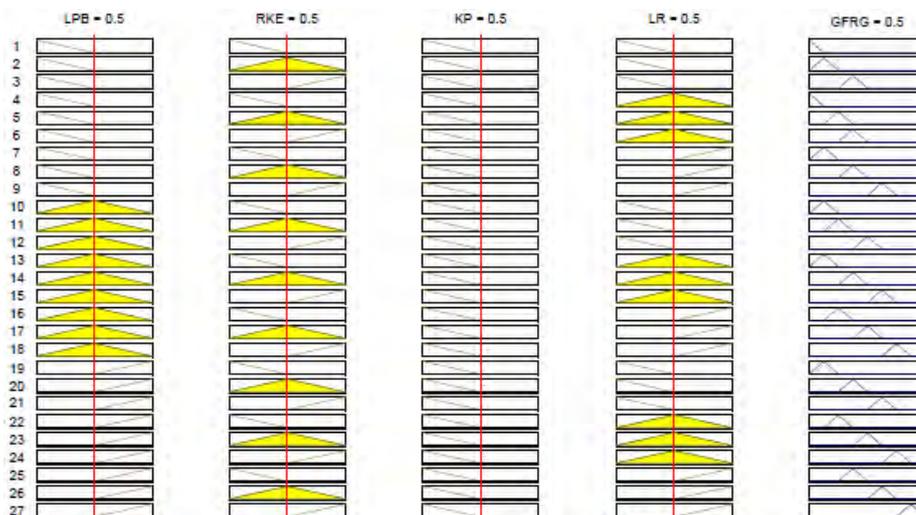
Tabel 4.6 *Fuzzy Rules* (lanjutan)

Rules No.	Variabel Input GRC				Variabel Output GFRG
	LPB	RKE	KP	LR	
71	M	M	L	L	L
72	M	L	L	L	H
73	L	S	L	S	SM
74	L	M	L	S	LM
75	L	L	L	S	VL
76	L	S	L	M	M
77	L	M	L	M	L
78	L	L	L	M	H
79	L	S	L	L	LM
80	L	M	L	L	VL
81	L	L	L	L	H

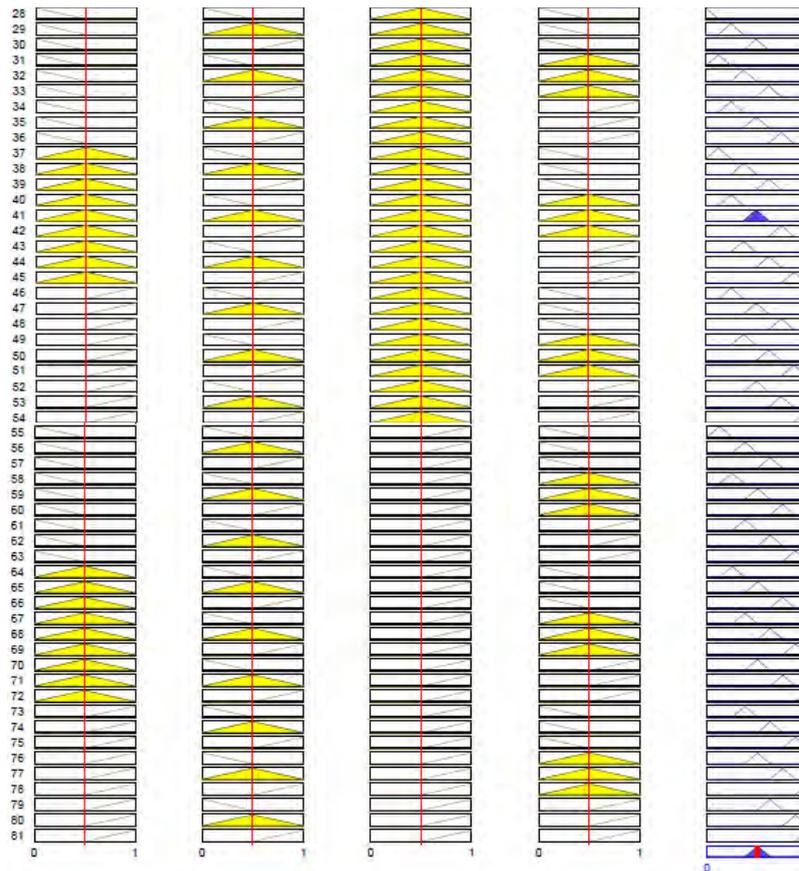
Sumber: Perangkat komputasi numerik

#### 4.7 Penegasan (*defuzzification*)

*Defuzzification* merupakan proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). GRC digunakan sebagai *input* dari proses *defuzzification*, yaitu suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi *fuzzy rules*. *Output* yang dihasilkan adalah GFRG yang berupa suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Proses *defuzzification* dilakukan dengan menggunakan metode *centroid* (titik tengah). Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses penegasan ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses *defuzzification*



Gambar 4.3 Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses *defuzzification* (lanjutan)

Hasil proses *defuzzification* yang berupa nilai GFRG untuk setiap kombinasi faktor ditunjukkan pada Tabel 4.7. GFRG akan digunakan sebagai variabel respon yang mewakili variabel respon LPB, RKE, KP dan LR secara serentak.

Tabel 4.7 *Grey Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)*

No.	GFRG	No.	GFRG
1	0.3742	10	0.5624
2	0.4066	11	0.6354
3	0.4664	12	0.6076
4	0.3763	13	0.5705
5	0.4949	14	0.6969
6	0.5234	15	0.4764
7	0.5453	16	0.7662
8	0.6203	17	0.8018
9	0.4987	18	0.6970

Sumber: Hasil perhitungan



#### 4.8 Hasil Optimasi

Desain eksperimen Taguchi yang berupa matriks ortogonal memungkinkan adanya pemisahan pengaruh setiap variabel pada level yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4.8 Rata-rata Nilai GFRG pada Masing-masing Level

Variabel Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
Polaritas elektroda	0.4785	0.6460	-	0.1676
<i>Gap voltage</i>	0.5088	0.5231	0.6549	0.1461
<i>Duty factor</i>	0.5325	0.6093	0.5449	0.0768
<i>Pulse current</i>	0.5271	0.5537	0.6059	0.0788
Rata – rata total	0.5622			

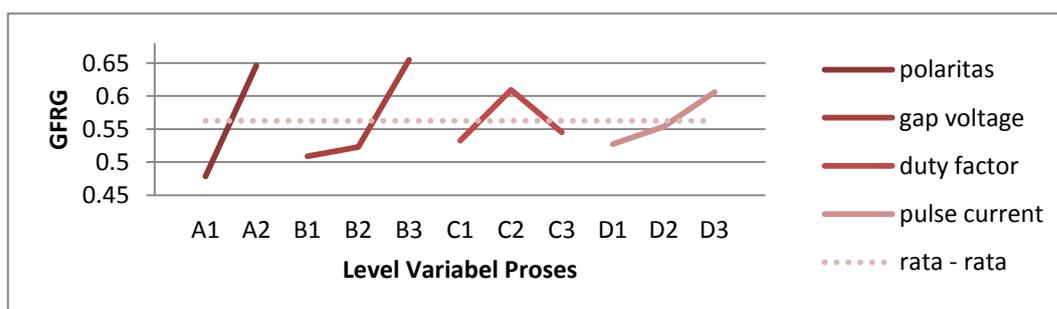
Sumber: Hasil perhitungan

Contoh perhitungan nilai rata-rata dari GFRG untuk variabel proses *gap voltage* pada level 1 adalah sebagai berikut:

$$\bar{\eta}_V = \frac{3742}{\dots}$$

$$\bar{\eta}_V =$$

Plot untuk nilai rata-rata dari GFRG pada masing-masing level dari variabel proses polaritas, *gap voltage*, *duty factor* dan *pulse current* ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Plot nilai GFRG pada masing-masing level variabel proses



Berdasarkan nilai rata-rata dari GFRG dan plot nilai tersebut pada masing-masing level variabel proses, dapat ditentukan nilai level untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon yang optimum. Kombinasi variabel proses tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimum

Variabel proses	Level	Nilai
Polaritas elektroda	2	positif
<i>Gap voltage</i>	3	50 V
<i>Duty factor</i>	2	0,5
<i>Pulse current</i>	3	12 A

Sumber: Hasil perhitungan

#### 4.9 Analisa Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel-variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan dan besarnya kontribusi terhadap respon yang diteliti. Pada penelitian ini ANOVA dilakukan terhadap data GFRG yang mewakili semua respon secara serentak.

Contoh perhitungan ANOVA GFRG dilakukan berdasarkan rumus pada Tabel 2.5 adalah sebagai berikut:

$$\sum -$$

$$SS_T = (0,3742-0,5622)^2 + (0,4066-0,5622)^2 + (0,4664-0,5622)^2 + (0,3763-0,5622)^2 + (0,4949-0,5622)^2 + (0,5234-0,5622)^2 + (0,5453-0,5622)^2 + (0,6203-0,5622)^2 + (0,4987-0,5622)^2 + (0,5624-0,5622)^2 + (0,6354-0,5622)^2 + (0,6076-0,5622)^2 + (0,5705-0,5622)^2 + (0,6969-0,5622)^2 + (0,4764-0,5622)^2 + (0,7662-0,5622)^2 + (0,8018-0,5622)^2 + (0,6970-0,5622)^2$$

$$SS_T = 0,2672$$

Contoh perhitungan untuk jumlah kuadrat total variabel respon polaritas elektroda dilakukan berdasarkan rumus pada Tabel 2.5 adalah sebagai berikut:



$$\sum -$$

$$SS_{\text{polaritas}} = 9 \times [(0,4785-0,5622)^2 + (0,6460-0,5622)^2]$$

$$SS_{\text{polaritas}} = 0,12635$$

$$MS_{\text{polaritas}} = \frac{0,12635}{1} = 0,12635$$

$$MS_{\text{polaritas}} = 0,12635$$

$$MS_{\text{polaritas}} = 0,12635$$

Hasil perhitungan ANAVA untuk GFRG secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 ANAVA dan Kontribusi GFRG

Source	DF	SS	MS	F	P-value	Persen kontribusi
Polaritas elektroda	1	0.12635	0.126354	54.25	0.000	46.41 %
Gap voltage	2	0.07786	0.038930	16.71	0.001	27.39 %
Duty factor	2	0.02041	0.010205	4.38	0.043	5.90 %
Pulse current	2	0.01929	0.009646	4.14	0.049	5.48 %
Residual Error	10	0.02329	0.002329			14.82 %
Total	17	0.26721				100 %

Sumber: Hasil perhitungan

Nilai  $F_{\text{hitung}}$  yang lebih besar dari  $F_{\text{tabel}}$  menunjukkan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diteliti. Hipotesis nol ( $H_0$ ) dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) yang digunakan pada uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

1. Variabel proses polaritas elektroda

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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



Kesimpulan:  $F_{hitung} = 54,25 > F_{(0.05;1;10)} = 4,96$  maka  $H_0$  ditolak, artinya rata-rata variabel proses polaritas elektroda pada level satu tidak sama dengan rata-rata variabel proses polaritas elektroda pada level dua. Dengan kata lain variabel proses polaritas elektroda memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon GFRG.

2. Variabel proses *gap voltage*

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

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \text{ ( paling sedikit ada satu } \mu \text{ yang tidak sama)}$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 16.71 > F_{(0.05;2;10)} = 4.10$  maka  $H_0$  ditolak, artinya paling sedikit ada satu rata-rata level variabel proses *gap voltage* yang tidak sama. Dengan kata lain variabel proses *gap voltage* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon GFRG.

3. Variabel proses *duty factor*

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

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \text{ ( paling sedikit ada satu } \mu \text{ yang tidak sama)}$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 4,38 < F_{(0.05;2;10)} = 4,10$  maka  $H_0$  ditolak, artinya paling sedikit ada satu rata-rata level variabel proses *duty factor* yang tidak sama. Dengan kata lain variabel proses *duty factor* memiliki pengaruh yang yang signifikan terhadap respon GFRG.

4. Variabel proses *pulse current*

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

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \text{ ( paling sedikit ada satu } \mu \text{ yang tidak sama)}$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 4,14 < F_{(0.05;2;10)} = 4.10$  maka  $H_0$  ditolak, artinya paling sedikit ada satu rata-rata level variabel proses *pulse current* yang tidak sama. Dengan kata lain variabel proses *pulse current* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon GFRG.

Berdasarkan uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F, menunjukkan bahwa keempat variabel proses memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRFG. Kondisi  $H_0$  untuk masing-masing variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.11.



Tabel 4.11 Kondisi Hipotesis Nol Multi Respon

Sumber variasi	Kondisi $H_0$
Polaritas elektroda	ditolak
<i>Gap voltage</i>	ditolak
<i>Duty factor</i>	ditolak
<i>Pulse current</i>	ditolak

Persen kontribusi menunjukkan porsi dari masing-masing variabel proses terhadap total variasi yang diamati. Jika besar persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besar persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka mengindikasikan ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan.

Persen kontribusi yang ditunjukkan pada Tabel 4.10 dihitung dari hasil analisis variansi dengan menggunakan persamaan 2.44 dan 2.45. Contoh perhitungan persen kontribusi untuk variabel proses polaritas elektroda adalah sebagai berikut:

$$SS'_{\text{polaritas}} = SS_{\text{polaritas}} - \nu_{\text{polaritas}} \cdot MSE$$

$$SS'_{\text{polaritas}} = 0,12635 - 1 \times 0,002329$$

$$SS'_{\text{polaritas}} = 0,124024$$

sehingga

$$\frac{\quad}{\quad} \\ \frac{\quad}{6721}$$

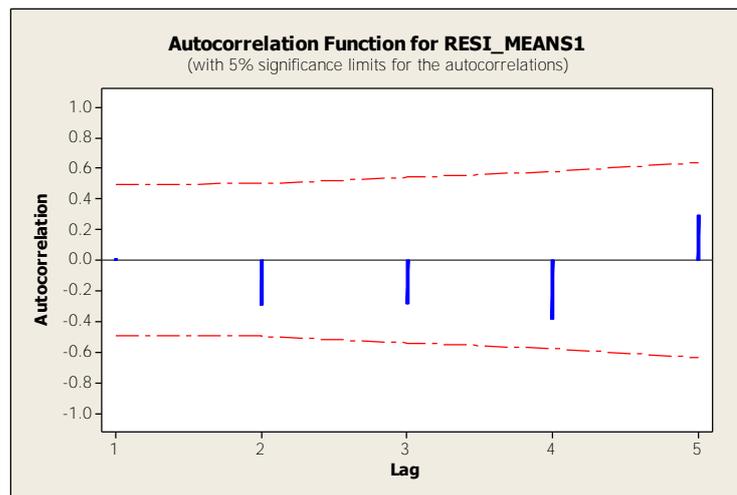
#### 4.10 Pengujian Asumsi Residual

Analisis varian mensyaratkan bahwa residual harus memenuhi asumsi identik, independen dan berdistribusi normal dengan *mean* bernilai nol dan nilai variansi tertentu. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:



#### 4.10.1 Uji Independen

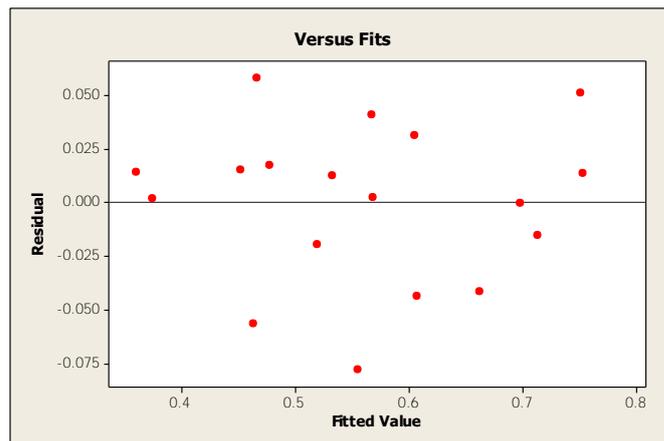
Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.5 Plot ACF

#### 4.10.2 Uji Identik

Asumsi identik terpenuhi apabila variasi residual tidak membentuk pola tertentu. Pendeteksian residual pada penelitian ini dilakukan secara visual, yaitu dengan plot antara residual dan *fitted value* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari plot dapat diketahui bahwa data tersebar secara acak dan tidak membentuk tren atau pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual bersifat identik terpenuhi.



Gambar 4.6 Plot residual *versus fitted values*

### 4.10.3 Uji Kenormalan

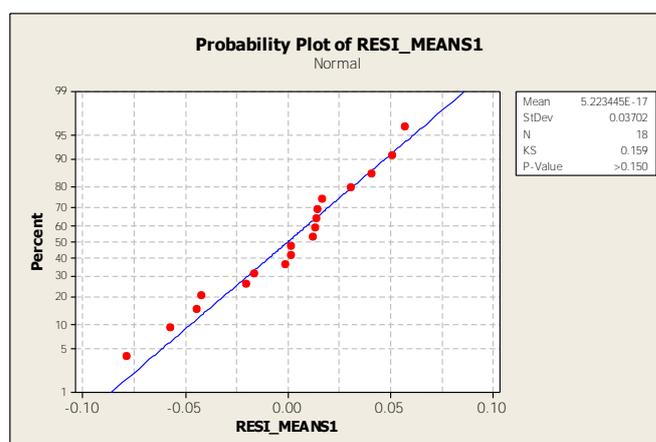
Uji kenormalan (uji  $\sigma^2$ ) dilakukan melalui uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : Residual berdistribusi normal

$H_1$  : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika  $p\text{-value} < \alpha$

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh  $p\text{-value} > 0,15$  yang lebih besar dari  $\alpha$ , memiliki *mean* mendekati nol sebesar  $5,2234 \text{ E-}17$ , dan variasi residual sebesar  $(0,159)^2 = 0,025281$ . Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.



Gambar 4.7 Plot uji distribusi normal



#### 4.11 Prediksi Respon Optimal

Prediksi dari nilai GFRG optimum dapat dihitung berdasarkan kombinasi nilai rata-rata GFRG pada masing-masing level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8. Kombinasi dari variabel proses yang berpengaruh secara signifikan dan menghasilkan nilai GFRG yang optimum adalah sebagai berikut:

1. Variabel proses polaritas elektroda pada level 2
2. Variabel proses *gap voltage* pada level 3
3. Variabel proses *duty factor* pada level 2
4. Variabel proses *pulse current* pada level 3

Nilai prediksi GFRG dihitung dengan menggunakan persamaan 2.43 sebagai berikut:

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})$$

$$\hat{y} = (\bar{y}_1 - \bar{y}) + (\bar{y}_2 - \bar{y}) + (\bar{y}_3 - \bar{y})$$

$$\hat{y} = \dots$$

Dari perhitungan diperoleh nilai rata-rata GFRG prediksi untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimum adalah 0,8294.

Penentuan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi dihitung berdasarkan persamaan 2.46. Untuk menentukan jumlah pengamatan efektif dihitung menggunakan persamaan 2.48 sebagai berikut:

$$n_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{eff} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{eff} = 4,5$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi hasil optimasi adalah sebagai berikut:



$$\sqrt{\frac{\alpha}{e}}$$

$$\sqrt{\quad}$$

$$\sqrt{\quad}$$

$$\pm$$

Sehingga interval keyakinan nilai rata-rata GFRG prediksi yang menghasilkan respon optimum dengan tingkat keyakinan 95% adalah  $0,8294 \pm 0,0507$  ( $0,7788 \leq \hat{\quad} \leq \quad$ ).

#### 4.12 Percobaan Konfirmasi

Untuk memvalidasi hasil percobaan yang telah dilakukan maka perlu dilakukan percobaan konfirmasi. Hal ini dilakukan dengan cara membandingkan GFRG hasil percobaan konfirmasi dengan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi. Percobaan konfirmasi dilakukan dengan pengaturan menggunakan kombinasi optimum hasil optimasi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.9. Percobaan konfirmasi dilakukan replikasi sebanyak tiga kali. Hasil dari percobaan konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Respon Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum

Percobaan	LPB (mm <sup>3</sup> /min)	RKE (%)	KP (μm)	LR (μm)
1	29.26	1.71	6.28	47.93
2	29.63	1.70	6.30	44.29
3	29.14	1.71	6.32	49.28
Rata-rata	29.34	1.71	6.30	47.16

Sumber: Hasil pengukuran



Langkah berikutnya yaitu perhitungan rasio S/N terhadap nilai-nilai respon yang diperoleh dari percobaan konfirmasi. Hasil perhitungan rasio S/N pada masing-masing respon percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Rasio S/N Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum

	Rasio S/N			
	LPB	RKE	KP	LR
Kombinasi optimum	29.349	-4.643	-15.990	-33.436

Sumber: Hasil perhitungan

Setelah menghitung rasio S/N kemudian dilakukan perhitungan *deviation sequence* dan GRC. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan GFRG. Hasil perhitungan GFRG percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 GFRG Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum

	GRC				GFRG
	LPB	RKE	KP	LR	
Kombinasi optimum	0.5243	1.0000	0.9646	0.6605	0.8696

Sumber: Hasil perhitungan

Interval keyakinan rata-rata GFRG percobaan konfirmasi dihitung dengan menggunakan persamaan 2.50. Perhitungan interval keyakinan GFRG adalah sebagai berikut:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4.5$$

$$CI_{\text{CE}} = \sqrt{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E \left[ \frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{r} \right]}$$

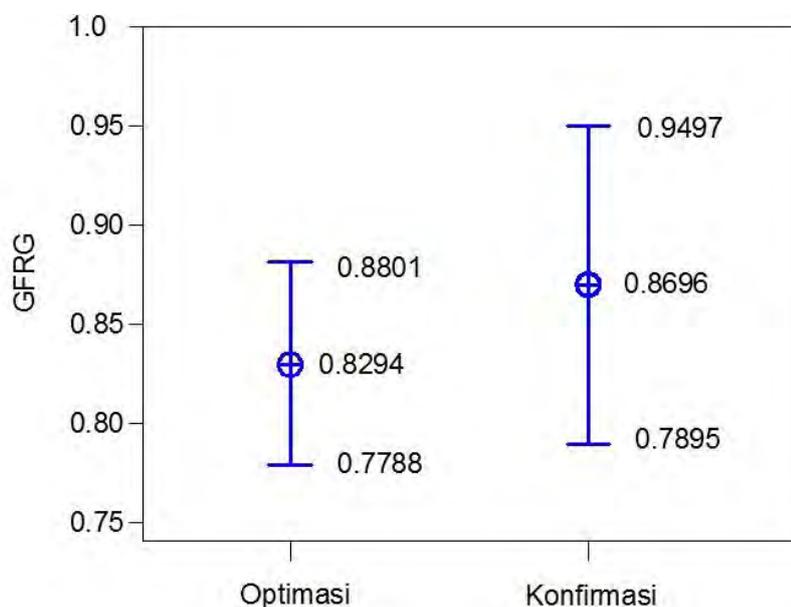


$$CI_{CE} = \sqrt{(\quad) \quad \left[ \begin{array}{c} - \\ - \end{array} \right]}$$

$$CI_{CE} = \sqrt{x \quad x \left[ \begin{array}{c} - \\ - \end{array} \right]}$$

$$CI_{CE} = 0,0801$$

Dengan demikian interval keyakinan nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi dengan tingkat keyakinan 95% adalah  $0,8696 \pm 0,0801$  ( $0,7895 \leq \hat{\quad} \leq ,9497$ ). Plot interval keyakinan 95% rata-rata GFRG optimasi dan percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perbandingan interval keyakinan antara GFRG hasil optimasi dan hasil konfirmasi

Percobaan konfirmasi dilakukan untuk memverifikasi bahwa nilai rata-rata yang ditaksir untuk variabel proses dan level yang menghasilkan respon optimum adalah valid. Prediksi nilai rata-rata kondisi optimum didasarkan pada hasil nilai rata-rata yang diperoleh dari percobaan. Validasi ditetapkan apabila nilai rata-rata dari hasil percobaan konfirmasi berada didalam interval rata-rata prediksi pada kondisi optimum. Gambar 4.8 menunjukkan bahwa nilai rata-rata GFRG



percobaan konfirmasi (0,8696) berada di dalam interval rata-rata prediksi ( $0,7788 \leq \hat{\mu} \leq 0,8801$ ). Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi variabel proses pada kondisi optimum yang telah didapat adalah valid.

#### 4.13 Perbandingan antara Hasil Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum

Kombinasi awal merupakan pengaturan kombinasi variabel proses yang biasa digunakan dalam proses pemotongan EDM *sinking*. Pada penelitian ini kombinasi awal diatur pada level tengah yaitu pada level dua untuk variabel proses yang memiliki tiga level. Untuk variabel proses yang memiliki dua level kombinasi awal diatur pada level satu. Tujuan dari percobaan dengan menggunakan kombinasi awal ini adalah untuk mengetahui peningkatan karakteristik kinerja dari masing-masing respon baik secara individu maupun secara serentak. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon sebelum dilakukan optimasi (kombinasi awal) dengan respon setelah dilakukan optimasi (kombinasi optimum). Pengaturan kombinasi variabel proses yang digunakan sebagai kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Pengaturan Level pada Kombinasi Awal

Variabel proses	Kombinasi awal	
	Level	Nilai
Polaritas elektroda	1	negatif
<i>Gap voltage</i>	2	40 V
<i>Duty factor</i>	2	0,5
<i>Pulse Current</i>	2	9 A

Percobaan dengan menggunakan kombinasi awal dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali, data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 11. Data hasil percobaan pada respon pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.16.



Tabel 4.16 Hasil Respon Percobaan pada Kombinasi Awal

Percobaan	LPB (mm <sup>3</sup> /min)	RKE (%)	KP (μm)	LR (μm)
1	31.30	2.40	10.68	54.96
2	33.29	2.40	10.81	53.77
3	30.67	2.39	10.82	54.78
Rata-rata	31.76	2.39	10.77	54.50

Sumber: Hasil percobaan

Langkah berikutnya yaitu perhitungan rasio S/N terhadap nilai-nilai respon yang diperoleh. Hasil perhitungan rasio S/N pada masing-masing respon percobaan pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Rasio S/N pada Kombinasi Awal

	Rasio S/N			
	LPB	RKE	KP	LR
Kombinasi awal	30.021	-7.586	-20.644	-34.729

Sumber: Hasil perhitungan

Setelah menghitung rasio S/N pada masing-masing respon kemudian dilakukan normalisasi terhadap rasio S/N untuk mendapatkan nilai GRC. Langkah terakhir yaitu menentukan nilai GFRG untuk dibandingkan dengan nilai GFRG pada kondisi optimum.

Tabel 4.18 menunjukkan nilai GFRG pada percobaan konfirmasi kondisi optimum yaitu sebesar 0,8696 dan nilai GFRG pada percobaan dengan menggunakan kombinasi awal yaitu sebesar 0,6768. Berdasarkan nilai GFRG yang diperoleh menunjukkan bahwa setelah dilakukan optimasi nilai GFRG mengalami peningkatan sebesar 28,49% dibandingkan dengan nilai GFRG sebelum dilakukan optimasi.



Tabel 4.18 Perbandingan GFRG Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum

	GRC				GFRG
	LPB	RKE	KP	LR	
Kombinasi awal	0.5756	0.9280	0.3829	0.5059	0.6768
Kombinasi optimum	0.5243	1.0000	0.9646	0.6605	0.8696
Peningkatan					28,49%

Sumber: Hasil perhitungan

Karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari respon RKE, KP dan LR telah terpenuhi. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai dari masing-masing respon secara individu setelah dilakukan optimasi. Besarnya penurunan nilai dari masing-masing respon RKE, KP dan LR berturut-turut adalah sebesar 51,05%, 41,50% dan 13,47%. Karakteristik kualitas semakin besar semakin baik dari respon LPB secara individu hal ini belum terpenuhi, karena terjadi penurunan nilai sebesar 7,62%. Perbandingan nilai masing-masing respon secara individu sebelum dan setelah dilakukan optimasi ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Perbandingan Respon Individu pada Kondisi Awal dengan Kondisi Optimum

Variabel respon	Kombinasi awal	Kombinasi optimum	Keterangan	
LPB	31,76	29,34	7,62 %	Turun
RKE	2,39	1,17	51,05 %	Turun
KP	10,77	6,30	41,50 %	Turun
LR	54,50	47,16	13,47 %	Turun

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk menguji bahwa nilai respon pada kombinasi awal dengan nilai respon pada kondisi optimum adalah berbeda, maka perlu dilakukan validasi secara statistik. Adapun uji statistik yang digunakan adalah sebagai berikut:



a. Uji kenormalan

$H_0$  : Data berdistribusi normal

$H_1$  : Data tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil  $\alpha$

Hasil uji kenormalan data pada masing-masing respon untuk kombinasi awal ditunjukkan pada Tabel 4.20 dan lampiran 13. Hasil uji kenormalan data pada masing-masing respon untuk kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.21 dan lampiran 13.

Tabel 4.20 Hasil Uji Kenormalan Data pada Kombinasi Awal

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
LPB	> 0,150	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal
RKE	0,079	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal
KP	0,089	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal
LR	> 0,150	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.21 Hasil Uji Kenormalan Data pada Kombinasi Optimum

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
LPB	> 0,150	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal
RKE	> 0,150	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal
KP	> 0,150	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal
LR	> 0,150	$H_0$ gagal ditolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.20 dan Tabel 4.21 menunjukkan bahwa *P-value* untuk masing-masing respon pada kombinasi awal maupun pada kombinasi optimum adalah lebih besar  $\alpha = 0,05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum adalah berdistribusi normal.

b. Uji kesamaan variansi

$H_0$  :  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$



$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil  $\alpha = 0,05$ .

Hasil uji kesamaan variansi antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.22 dan lampiran 13.

Tabel 4.22 Hasil Uji Kesamaan Variansi

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
LPB	0,066	$H_0$ gagal ditolak	Variansi sama
RKE	0,495	$H_0$ gagal ditolak	Variansi sama
KP	0,105	$H_0$ gagal ditolak	Variansi sama
LR	0,116	$H_0$ gagal ditolak	Variansi sama

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.22 menunjukkan bahwa *P-value* pada masing-masing respon lebih kecil  $\alpha = 0,05$ . Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data dari kedua sumber, yaitu kombinasi awal dan kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c. Uji kesamaan rata-rata

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil  $\alpha$

Hasil uji kesamaan rata-rata antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.23 dan lampiran 13.

Tabel 4.23 Hasil Uji Kesamaan Rata-rata

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
LPB	0,040	$H_0$ ditolak	Rata-rata tidak sama
RKE	0,000	$H_0$ ditolak	Rata-rata tidak sama
KP	0.000	$H_0$ ditolak	Rata-rata tidak sama
LR	0.009	$H_0$ ditolak	Rata-rata tidak sama



Berdasarkan hasil pengujian kesamaan rata-rata yang ditunjukkan pada Tabel 4.23, *p-value* untuk masing-masing respon  $h u g \alpha$  05. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara statistik dengan tingkat keyakinan 95%, nilai rata-rata dari masing-masing respon pada kondisi awal dengan nilai rata-rata dari masing-masing respon pada kondisi optimum adalah berbeda.

#### **4.14 Pembahasan**

##### **4.14.1 Pengaruh Variabel yang Signifikan Terhadap Respon Individu**

Pengaruh dari variabel-variabel proses yang meliputi polaritas elektroda, *gap voltage*, *duty factor* dan *pulse current* terhadap respon individu LPB, RKE, KP dan LR dapat diketahui berdasarkan data yang diperoleh dari hasil percobaan. Pembahasan mengenai pengaruh variabel-variabel proses terhadap respon secara individu adalah sebagai berikut:

##### **a. Variabel proses polaritas elektroda**

Polaritas menyatakan sifat dari sebuah objek yang mempunyai dua arah kerja atau kutub pada proses pemesinan EDM *sinking*. Sifat polaritas elektroda negatif (DCEN) akan menghasilkan busur listrik yang bergerak dari elektroda ke benda kerja. Frekuensi percikan bunga api listrik yang terjadi tinggi, sehingga akan mengakibatkan energi panas yang diterima benda kerja lebih banyak dan pengikisan benda kerja menjadi lebih cepat. Pengikisan yang cepat akan mengakibatkan material yang mencair dan membeku ulang semakin banyak, sehingga lapisan *recast* yang terbentuk tebal. Frekuensi percikan bunga api yang tinggi pada benda kerja, mengakibatkan material terkikis semakin banyak dan mengakibatkan tingginya laju pengerjaan bahan. Polaritas positif (DCEP) mengakibatkan material yang mencair dan membeku kembali semakin sedikit. Selama proses pemesinan EDM *sinking* berlangsung, elektroda grafit juga terkikis. Semakin banyak material yang terkikis, elektroda yang terkikis juga semakin banyak, namun volume elektroda yang terkikis lebih sedikit jika dibandingkan dengan volume benda kerja yang terkikis. Hal tersebut akan mempengaruhi besar kecilnya rasio keausan elektroda.



#### **b. Variabel proses *gap voltage***

Pada proses pemesinan EDM, variabel *gap voltage* digunakan untuk mengatur jarak antara elektroda dan benda kerja. Nilai *gap voltage* yang tinggi akan diikuti dengan melebarnya jarak antara elektroda dan benda kerja. Hal ini mengakibatkan percikan bunga api lebih stabil, karena adanya sirkulasi cairan dielektrik yang baik. Sirkulasi yang baik pada cairan dielektrik dapat mengakibatkan kemampuan membilas material yang tererosi semakin baik pula, sehingga nilai kekasaran permukaan yang didapatkan rendah dan mempengaruhi topografi permukaan benda kerja, serta lapisan *recast* yang terbentuk memiliki kecenderungan tipis. Percikan bunga api yang stabil menyebabkan elektroda yang terkikis semakin sedikit, sehingga rasio keausan elektroda semakin rendah. *Gap voltage* yang tinggi selama proses pemesinan akan menyebabkan material yang tererosi semakin banyak dan akan meningkatkan laju pengerjaan bahan.

#### **c. Variabel proses *duty factor***

*Duty factor* adalah perbandingan antara *on-time* dengan waktu tiap siklusnya. Pada penelitian ini, *duty factor* yang tinggi memiliki *off time* yang rendah. Pada proses pemesinan EDM tidak selalu terjadi penumbukan percikan bunga api terhadap benda kerja. Ketika memasuki fase *on time* terjadi penumbukan bunga api pada benda kerja, sedangkan pada fase *off time* tidak terjadi penumbukan percikan bunga api. Nilai *off time* yang tinggi juga menyebabkan *cycle time* yang semakin besar, sehingga mengakibatkan waktu pemesinan yang lama dan akan menurunkan laju pengerjaan bahan. Pada penelitian ini *duty factor* dihitung dengan nilai *on time* yang konstan. Nilai *on time* yang konstan akan menyebabkan energi yang dihasilkan sama sehingga tidak mempengaruhi kekasaran permukaan dan rasio keausan elektroda. Namun, semakin tinggi nilai *off time* akan dapat menurunkan ketebalan lapisan *recast*, ini disebabkan karena tersedia cukup waktu bagi cairan dielektrik untuk membersihkan sisa-sisa material yang meleleh dan membeku kembali.



#### d. Variabel proses *pulse current*

*Pulse current* adalah besarnya arus yang digunakan pada proses EDM *sinking*. Kenaikan *pulse current* akan meningkatkan besarnya arus listrik pada elektroda, sehingga loncatan bunga api yang terjadi akan semakin besar pula. Semakin besar nilai *pulse current* tentu akan membuat waktu pengerjaan menjadi semakin singkat dan dapat meningkatkan laju pengerjaan bahan. Namun, rasio keausan elektroda, nilai kekasaran permukaan dan tebal *lapisan recast* juga akan meningkat.

#### 4.14.2 Pengaruh Variabel yang Signifikan Terhadap Multi Respon

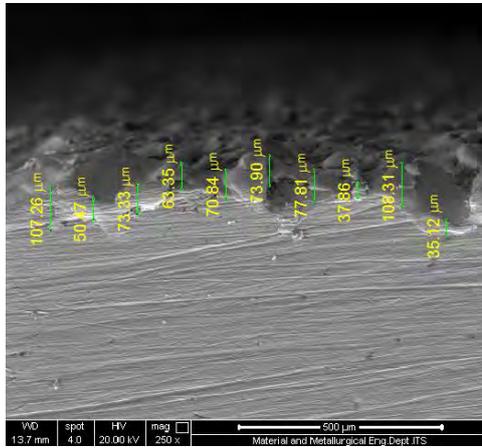
Analisis variansi pengaruh variabel proses polaritas elektroda, *gap voltage*, *duty factor* dan *pulse current* terhadap multirespon (GFRG) ditunjukkan pada Tabel 4.10. Hasil analisis menunjukkan bahwa variabel proses polaritas benda kerja memiliki pengaruh yang paling besar terhadap nilai GFRG. Variabel proses polaritas elektroda memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 46,41%. Selanjutnya, variabel proses *gap voltage* memberikan kontribusi sebesar 27,39%, variabel proses *duty factor* memberikan kontribusi sebesar 5,90% dan variabel proses *pulse current* memberikan kontribusi sebesar 5,48%.

Tabel 4.10 juga menunjukkan bahwa *error* memberikan kontribusi yang relatif cukup besar, yaitu 14,82%. Hal ini berarti bahwa masih ada variabel-variabel lain yang memiliki pengaruh terhadap respon yang diamati. Penentuan nilai level variabel yang kurang tepat juga bisa mengakibatkan variabel-variabel yang seharusnya signifikan dan memiliki kontribusi yang cukup besar menjadi tidak signifikan atau memiliki kontribusi yang relatif kecil. Kontribusi *error* yang relatif cukup besar juga dapat disebabkan oleh penentuan level yang kurang tepat. GFRG sebagai variabel baru yang mewakili keseluruhan respon secara serentak mengalami peningkatan yaitu sebesar 28,49% seperti ditunjukkan pada Tabel 4.18.

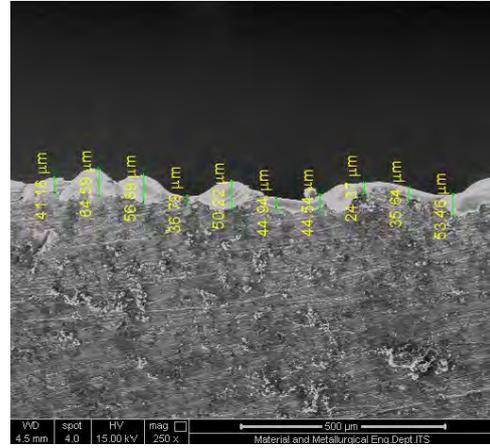
Tebal lapisan *recast* yang dihasilkan oleh variasi kombinasi variabel proses dapat diukur berdasarkan foto SEM yang diperoleh. Foto SEM pada Gambar 4.9(a) menunjukkan tebal lapisan *recast* yang dihasilkan dengan



menggunakan kombinasi awal ( $A_1B_2C_2D_2$ ), dan tebal lapisan *recast* pada kombinasi optimum ( $A_2B_3C_2D_3$ ) ditunjukkan pada Gambar 4.9(b).



(a) LR kondisi awal ( $A_1B_2C_2D_2$ )



(b) LR kondisi optimum ( $A_2B_3C_2D_3$ )

Gambar 4.9 SEM lapisan *recast* (LR)

Energi pemotongan yang besar akan menyebabkan panas akan terkonduksi semakin dalam. Material benda kerja yang meleleh akan semakin banyak dan akan membeku kembali menjadi lapisan *recast* yang lebih tebal. Pada kombinasi optimum nilai variabel proses polaritas benda kerja adalah negatif. Energi yang dihasilkan untuk mengikis benda kerja akan semakin kecil, sehingga tebal lapisan *recast* yang dihasilkan juga semakin kecil. Nilai rata-rata tebal lapisan *recast* yang terjadi pada kondisi awal adalah sebesar 54,50  $\mu\text{m}$  dan rata-rata tebal lapisan *recast* pada kondisi optimum adalah sebesar 47,16  $\mu\text{m}$ .



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



---

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan, proses optimasi, percobaan konfirmasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon pada Proses *Electrical Discharge Machining* (EDM) *Sinking* Material Baja Perkakas DAC dengan Menggunakan Metode *Taguchi-Grey-Fuzzy*,” ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontribusi variabel-variabel proses dalam mengurangi variansi total dari respon laju pengerjaan bahan, rasio keausan elektroda, kekasaran permukaan dan tebal lapisan recast secara serentak adalah sebagai berikut:
  - Polaritas elektroda sebesar 46,41%
  - *Gap voltage* sebesar 27,39%
  - *Duty factor* sebesar 5,90%
  - *Pulse current* sebesar 5,48%
2. Pengaturan kombinasi variabel-variabel proses yang secara signifikan dapat memaksimalkan laju pengerjaan bahan, meminimumkan rasio keausan elektroda, kekasaran permukaan dan tebal lapisan recast secara serentak adalah sebagai berikut:
  - Polaritas elektroda positif
  - *Gap voltage* diatur pada 50 V
  - *Duty factor* diatur pada 0,5
  - *Pulse current* diatur pada 12 A

#### 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini metode optimasi multi respon yang digunakan adalah *grey relational analysis* dan *fuzzy logic*. Sebagai perbandingan, pada penelitian



selanjutnya studi mengenai optimasi multi respon dapat dilakukan dengan menggunakan metode-metode optimasi yang lain.

2. Karena kontribusi *error* pada penelitian ini masih tergolong besar, maka pada penelitian selanjutnya perlu memperhitungkan faktor-faktor *noise* untuk mengurangi besarnya *error* seperti temperatur cairan dielektrik dan geram yang tercampur dengan cairan dielektrik.
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mencoba menggunakan level variabel proses yang berbeda untuk membandingkan besarnya kontribusi variabel proses dalam mengurangi variansi total respon yang diteliti.

LAMPIRAN 1

**DATA MASSA AWAL BENDA KERJA**

Tabel L1.1 Massa awal benda kerja

<b>Komb.</b>	<b>Replikasi 1</b>			<b>Mean (gram)</b>	<b>Replikasi 2</b>			<b>Mean (gram)</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
1	12.54	12.54	12.54	12.54	12.50	12.51	12.50	12.50
2	13.56	13.55	13.56	13.56	12.51	12.51	12.50	12.51
3	13.59	13.59	13.58	13.59	12.64	12.63	12.63	12.64
4	13.46	13.45	13.45	13.45	12.39	12.38	12.39	12.39
5	13.65	13.65	13.65	13.65	11.85	11.85	11.84	11.85
6	14.17	14.16	14.17	14.17	11.23	11.23	11.24	11.23
7	12.50	12.49	12.49	12.49	12.52	12.51	12.52	12.52
8	13.98	13.98	13.98	13.98	12.25	12.25	12.26	12.25
9	12.59	12.58	12.59	12.59	12.71	12.70	12.71	12.71
10	13.64	13.64	13.63	13.64	11.98	11.98	11.99	11.98
11	13.37	13.37	13.38	13.37	11.69	11.68	11.69	11.69
12	12.98	12.97	12.98	12.98	11.96	11.96	11.97	11.96
13	12.33	12.33	12.32	12.33	13.46	13.47	13.46	13.46
14	13.56	13.56	13.55	13.56	12.46	12.45	12.45	12.46
15	12.93	12.92	12.93	12.93	12.19	12.18	12.19	12.19
16	13.77	13.78	13.77	13.77	11.47	11.47	11.46	11.47
17	13.43	13.43	13.43	13.43	12.10	12.11	12.10	12.10
18	12.73	12.72	12.73	12.73	11.70	11.70	11.69	11.70

Sumber: Hasil pengukuran

## LAMPIRAN 2

### DATA MASSA AWAL ELEKTRODA

Tabel L2.1 Massa awal elektroda

<b>Komb.</b>	<b>Replikasi 1</b>			<b>Mean (gram)</b>	<b>Replikasi 2</b>			<b>Mean (gram)</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
1	57.85	57.85	57.84	57.85	49.22	49.23	49.23	49.23
2	44.95	44.96	44.95	44.95	49.60	49.61	49.60	49.60
3	47.31	47.30	47.30	47.30	48.98	48.98	48.99	48.98
4	44.43	44.44	44.43	44.43	58.39	58.39	58.40	58.39
5	47.33	47.33	47.32	47.33	42.66	42.65	42.66	42.66
6	43.90	43.91	43.91	43.91	44.47	44.48	44.48	44.48
7	48.87	48.87	48.87	48.87	50.37	50.37	50.37	50.37
8	43.96	43.96	43.97	43.96	42.64	42.65	42.65	42.65
9	44.07	44.06	44.07	44.07	49.70	49.71	49.70	49.70
10	43.80	43.81	43.81	43.81	58.66	58.66	58.67	58.66
11	44.10	44.10	44.11	44.10	48.89	48.88	48.89	48.89
12	44.09	44.09	44.08	44.09	47.48	47.47	47.48	47.48
13	48.92	48.91	48.92	48.92	47.25	47.24	47.24	47.24
14	43.93	43.92	43.93	43.93	48.94	48.95	48.94	48.94
15	44.20	44.19	44.19	44.19	44.43	44.43	44.44	44.43
16	44.23	44.24	44.23	44.23	49.09	49.09	49.09	49.09
17	44.12	44.12	44.13	44.12	44.50	44.51	44.51	44.51
18	44.97	44.98	44.97	44.97	49.02	49.03	49.02	49.02

Sumber: Hasil pengukuran

LAMPIRAN 3

**DATA WAKTU PROSES PEMOTONGAN**

Tabel L3.1 Waktu proses pemotongan

Replikasi 1		Replikasi 2	
Kombinasi	Waktu (menit)	Kombinasi	Waktu (menit)
1	11.42	1	11.87
2	9.98	2	9.88
3	5.12	3	6.45
4	9.82	4	11.70
5	6.62	5	6.75
6	4.90	6	4.88
7	10.97	7	11.62
8	6.75	8	6.77
9	7.50	9	7.67
10	10.23	10	10.23
11	7.67	11	7.77
12	6.28	12	6.07
13	8.45	13	8.65
14	6.42	14	6.28
15	5.83	15	6.28
16	8.80	16	9.27
17	7.68	17	7.97
18	6.57	18	6.73

Sumber: Hasil pengukuran

## LAMPIRAN 4

### **DATA MASSA AKHIR BENDA KERJA**

Tabel L4.1 Massa akhir benda kerja

<b>Komb.</b>	<b>Replikasi 1</b>			<b>Mean (gram)</b>	<b>Replikasi 2</b>			<b>Mean (gram)</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
1	11.03	11.02	11.03	11.03	10.86	10.85	10.85	10.85
2	11.97	11.96	11.96	11.96	10.84	10.84	10.84	10.84
3	11.98	11.98	11.98	11.98	10.54	10.53	10.53	10.53
4	11.94	11.94	11.95	11.94	10.57	10.58	10.58	10.58
5	12.05	12.06	12.05	12.05	10.15	10.15	10.15	10.15
6	12.54	12.53	12.53	12.53	9.59	9.58	9.58	9.58
7	10.88	10.89	10.89	10.89	10.84	10.83	10.84	10.84
8	12.24	12.24	12.25	12.24	10.52	10.51	10.52	10.52
9	10.96	10.96	10.96	10.96	11.03	11.03	11.02	11.03
10	11.89	11.90	11.89	11.89	10.24	10.24	10.25	10.24
11	11.68	11.68	11.69	11.68	9.97	9.98	9.97	9.97
12	11.24	11.24	11.24	11.24	10.25	10.26	10.26	10.26
13	10.65	10.66	10.66	10.66	11.76	11.77	11.77	11.77
14	11.77	11.78	11.77	11.77	10.68	10.68	10.68	10.68
15	11.29	11.28	11.29	11.29	10.42	10.41	10.42	10.42
16	11.99	11.98	11.98	11.98	9.65	9.64	9.65	9.65
17	11.67	11.66	11.65	11.66	10.31	10.31	10.30	10.31
18	10.96	10.96	10.96	10.96	9.90	9.91	9.90	9.90

Sumber: Hasil pengukuran

LAMPIRAN 5

**DATA MASSA AKHIR ELEKTRODA**

Tabel L5.1 Massa akhir elektroda

<b>Komb.</b>	<b>Replikasi 1</b>			<i>Mean</i> <b>(gram)</b>	<b>Replikasi 2</b>			<i>Mean</i> <b>(gram)</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
1	57.84	57.83	57.84	57.84	49.22	49.22	49.22	49.22
2	44.93	44.94	44.94	44.94	49.59	49.58	49.59	49.59
3	47.29	47.28	47.29	47.29	48.96	48.96	48.97	48.97
4	44.42	44.42	44.43	44.42	58.39	58.38	58.38	58.38
5	47.33	47.32	47.32	47.32	42.65	42.64	42.65	42.65
6	43.90	43.90	43.91	43.90	44.47	44.47	44.48	44.47
7	48.86	48.87	48.86	48.86	50.36	50.37	50.36	50.36
8	43.95	43.95	43.94	43.95	42.64	42.64	42.65	42.64
9	44.05	44.06	44.06	44.06	49.69	49.68	49.69	49.69
10	43.81	43.80	43.80	43.80	58.65	58.65	58.65	58.65
11	44.09	44.09	44.08	44.09	48.89	48.88	48.87	48.88
12	44.08	44.09	44.08	44.08	47.47	47.47	47.48	47.47
13	48.90	48.91	48.91	48.91	47.23	47.22	47.23	47.23
14	43.93	43.92	43.92	43.92	48.92	48.93	48.93	48.93
15	44.18	44.19	44.18	44.18	44.42	44.42	44.42	44.42
16	44.23	44.22	44.22	44.22	49.08	49.08	49.09	49.08
17	44.11	44.12	44.11	44.11	44.51	44.50	44.50	44.50
18	44.96	44.96	44.96	44.96	49.01	49.00	49.01	49.01

Sumber: Hasil pengukuran

## LAMPIRAN 6

### **DATA LAJU Pengerjaan BAHAN (LPB)**

Tabel L6.1 Laju pengerjaan bahan replikasi 1

Komb.	Waktu menit (a)	Massa BK (gram)		Massa jenis BK gr/mm <sup>3</sup> (d)	Volume mm <sup>3</sup> (b-c)/(d) = (e)	LPB mm <sup>3</sup> /min (e)/(a)
		Sebelum (b)	Setelah (c)			
1	11.42	12.54	11.03	0.008	198.926	17.42
2	9.98	13.56	11.96	0.008	210.783	21.11
3	5.12	13.59	11.98	0.008	212.100	41.45
4	9.82	13.45	11.94	0.008	198.926	20.28
5	6.62	13.65	12.05	0.008	210.783	31.83
6	4.90	14.17	12.53	0.008	216.052	44.09
7	10.97	12.49	10.89	0.008	210.783	19.23
8	6.75	13.98	12.24	0.008	229.226	33.96
9	7.50	12.59	10.96	0.008	214.735	28.65
10	10.23	13.64	11.89	0.008	230.544	22.53
11	7.67	13.37	11.68	0.008	222.639	29.02
12	6.28	12.98	11.24	0.008	229.226	36.42
13	8.45	12.33	10.66	0.008	220.004	26.00
14	6.42	13.56	11.77	0.008	236.472	36.80
15	5.83	12.93	11.29	0.008	216.052	37.04
16	8.80	13.77	11.98	0.008	235.813	26.80
17	7.68	13.43	11.66	0.008	233.178	30.33
18	6.57	12.73	10.96	0.008	233.574	35.54

Tabel L6.2 Laju pengerjaan bahan replikasi 2

Komb.	Waktu menit (a)	Massa BK (gram)		Massa jenis BK gr/mm <sup>3</sup> (d)	Volume mm <sup>3</sup> (b-c)/(d) = (e)	LPB mm <sup>3</sup> /min (e)/(a)
		Sebelum (b)	Setelah (c)			
1	11.87	12.50	10.85	0.008	217.370	18.32
2	9.88	12.51	10.84	0.008	220.004	22.26
3	6.45	12.63	10.53	0.008	277.179	42.91
4	11.70	12.39	10.58	0.008	238.448	20.37
5	6.75	11.85	10.15	0.008	223.957	33.18
6	4.88	11.23	9.58	0.008	217.370	44.56
7	11.62	12.52	10.84	0.008	221.322	19.05
8	6.77	12.25	10.52	0.008	227.909	33.70
9	7.67	12.71	11.03	0.008	221.322	28.88
10	10.23	11.98	10.24	0.008	229.226	22.40
11	7.77	11.69	9.97	0.008	226.591	29.15
12	6.07	11.96	10.26	0.008	223.957	36.92
13	8.65	13.46	11.77	0.008	222.639	25.74
14	6.28	12.45	10.68	0.008	233.178	37.11
15	6.28	12.19	10.42	0.008	233.178	37.10
16	9.27	11.47	9.65	0.008	239.765	25.87
17	7.97	12.10	10.31	0.008	235.813	29.60
18	6.73	11.70	9.90	0.008	237.131	35.22

LAMPIRAN 7

**DATA RASIO KEAUSAN ELEKTRODA (RKE)**

Tabel L7.1 Rasio keausan elektroda replikasi 1

Komb.	Massa elektroda (gram)		Massa jenis elektroda gr/mm <sup>3</sup> (c)	Volume elektroda mm <sup>3</sup> (a-b)/(c) = (d)	Volume BK mm <sup>3</sup> (e)	RKE (%) (d)/(e) * 100
	Sebelum (a)	Setelah (b)				
1	57.85	57.84	0.002	5.654	198.926	2.84
2	44.95	44.94	0.002	5.654	210.783	2.68
3	47.3	47.29	0.002	5.654	212.100	2.67
4	44.43	44.42	0.002	5.654	198.926	2.84
5	47.33	47.32	0.002	5.654	210.783	2.68
6	43.91	43.9	0.002	5.654	216.052	2.62
7	48.87	48.86	0.002	5.654	210.783	2.68
8	43.96	43.95	0.002	5.654	229.226	2.47
9	44.07	44.06	0.002	5.654	214.735	2.63
10	43.81	43.8	0.002	5.654	230.544	2.45
11	44.1	44.09	0.002	5.654	222.639	2.54
12	44.09	44.08	0.002	5.654	229.226	2.47
13	48.92	48.91	0.002	5.654	220.004	2.57
14	43.93	43.92	0.002	5.654	236.472	2.39
15	44.19	44.18	0.002	5.654	216.052	2.62
16	44.23	44.22	0.002	5.654	235.813	2.40
17	44.12	44.11	0.002	5.654	233.178	2.42
18	44.97	44.96	0.002	5.654	233.574	2.42

Tabel L7.2 Rasio keausan elektroda replikasi 2

Komb.	Massa elektroda (gram)		Massa jenis elektroda gr/mm <sup>3</sup> (c)	Volume elektroda mm <sup>3</sup> (a-b)/(c) = (d)	Volume BK mm <sup>3</sup> (e)	RKE (%) (d)/(e) * 100
	Sebelum	Setelah				
	(a)	(b)				
1	49.23	49.22	0.002	5.654	217.370	2.60
2	49.6	49.59	0.002	5.654	220.004	2.57
3	48.98	48.97	0.002	5.654	277.179	2.65
4	58.39	58.38	0.002	5.654	238.448	2.85
5	42.66	42.65	0.002	5.654	223.957	2.52
6	44.48	44.47	0.002	5.654	217.370	2.60
7	50.37	50.36	0.002	5.654	221.322	2.55
8	42.65	42.64	0.002	5.654	227.909	2.48
9	49.7	49.69	0.002	5.654	221.322	2.55
10	58.66	58.65	0.002	5.654	229.226	2.47
11	48.89	48.88	0.002	5.654	226.591	2.50
12	47.48	47.47	0.002	5.654	223.957	2.52
13	47.24	47.23	0.002	5.654	222.639	2.54
14	48.94	48.93	0.002	5.654	233.178	2.42
15	44.43	44.42	0.002	5.654	233.178	2.67
16	49.09	49.08	0.002	5.654	239.765	2.36
17	44.51	44.5	0.002	5.654	235.813	2.40
18	49.02	49.01	0.002	5.654	237.131	2.38

**DATA KEKASARAN PERMUKAAN (KP)**

**Tabel L8.1 Kekasaran permukaan replikasi 1**

Komb.	Kekasaran permukaan																		Mean (µm)			
	Horizontal						Vertikal						45°							-45°		
	1	2	3	Mean (µm)	1	2	3	Mean (µm)	1	2	3	Mean (µm)	1	2	3	Mean (µm)	1	2		3		
1	8.32	7.67	8.45	8.15	8.9	8.32	8.97	8.73	8.94	8.42	9.65	9.00	8.32	8.67	8.68	8.56	9.00					
2	9.35	10.12	9.86	9.78	10.47	9.67	10.15	10.10	10.08	9.78	9.56	9.81	9.45	9.65	10.06	9.72	10.10					
3	11.08	9.77	12.03	10.96	10.4	11.1	14.39	11.96	12.38	12.02	11.97	12.12	12.61	9.51	10.57	10.90	12.12					
4	7.92	7.89	7.95	7.92	8.21	8.99	9.03	8.74	8.96	8.48	9.04	8.83	9.86	9.55	9.31	9.57	9.57					
5	9.69	8.46	10.2	9.45	9.64	9.3	10.27	9.74	11.17	10.6	10.69	10.82	7.33	9.85	10.58	9.25	10.82					
6	10.36	9.46	10.21	10.01	10.12	9.63	10.23	9.99	12.51	10.9	13.34	12.25	9.33	8.35	9.58	9.09	12.25					
7	9.05	9.34	9.19	9.19	9.22	9.04	10.05	9.44	8.68	9.05	9.24	8.99	8.91	9.09	8.83	8.94	9.44					
8	10.4	10.46	10.84	10.57	11.07	11.04	11.01	11.04	10.35	10.95	10.15	10.48	10.33	10.55	10.54	10.47	11.04					
9	9.16	9.05	8.15	8.79	8.46	8.35	8.15	8.32	9.16	9.55	8.00	8.90	9.1	9.25	8.15	8.83	8.90					
10	8.29	8.38	9.08	8.58	8.19	8.08	8.08	8.12	8.9	9.08	7.88	8.62	8.39	8.32	9.08	8.60	8.62					
11	6.18	6.34	5.9	6.14	6.02	6.56	5.92	6.17	7.02	6.56	5.92	6.50	6.82	6.56	5.92	6.43	6.50					
12	7.45	8.09	7.69	7.74	8.57	8.19	7.85	8.20	6.98	8.19	6.44	7.20	8.08	8.19	7.44	7.90	8.20					
13	6.89	6.64	7.01	6.85	7.09	7.07	7.02	7.06	7.19	7.37	6.67	7.08	7.09	6.37	6.66	6.71	7.08					
14	8.82	8.28	8.63	8.58	8.37	8.18	8.43	8.33	9.86	8.68	7.43	8.66	8.22	8.54	8.21	8.32	8.66					
15	8.32	8.84	8.86	8.67	7.98	7.64	8.26	7.96	7.82	7.74	7.46	7.67	8.5	8.34	8.29	8.38	8.67					
16	7.43	8.19	7.58	7.73	7.18	8.04	6.86	7.36	9.15	7.03	8.07	8.08	7.84	7.64	7.39	7.62	8.08					
17	5.64	6.04	6.18	5.95	5.19	5.94	5.98	5.70	6.09	6.42	5.88	6.13	6.14	6.04	6.08	6.09	6.13					
18	7.96	7.64	8.01	7.87	7.02	7.56	7.92	7.50	7.17	6.51	6.93	6.87	7.19	7.37	7.65	7.40	7.87					

Table 8.2 Kekasaran permukaan replikasi 2

Komb.	Kekasaran permukaan																		Max ( $\mu\text{m}$ )	
	Horizontal						Vertikal						45°							Mean ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	Mean ( $\mu\text{m}$ )	1	2	3	1	2	3	Mean ( $\mu\text{m}$ )	1	2	3	Mean ( $\mu\text{m}$ )	1	2	3		
1	8.04	8.4	8.54	8.33	9.23	8.34	8.12	8.56	8.15	8.13	8.47	8.25	8.08	8.19	8.44	8.24	8.56			
2	10.11	10.58	10.32	10.34	9.7	9.18	9.43	9.44	9.64	9.3	10.27	9.74	9.89	9.83	9.82	9.85	10.34			
3	11.07	11.04	11.01	11.04	11.57	11.84	11.31	11.57	10.45	10.51	10.11	10.36	12.37	12.58	12.13	12.36	12.36			
4	7.56	8.33	8.12	8.00	8.28	8.53	9.12	8.64	9.08	9.21	9.08	9.12	8.19	8.20	8.25	8.21	9.12			
5	10.26	9.01	10.34	9.87	10.85	10.42	10.64	10.64	10.45	9.48	10.25	10.06	10.35	10.95	10.15	10.48	10.64			
6	11.61	10.51	10.57	10.90	11.35	11.52	11.82	11.56	12.37	12.82	11.8	12.33	11.07	11.04	11.01	11.04	12.33			
7	8.69	9.23	8.35	8.76	9.37	9.68	9.51	9.52	8.46	8.35	8.15	8.32	9.5	8.34	9.29	9.04	9.52			
8	11.26	11.13	11.35	11.25	10.84	10.04	10.05	10.31	10.36	9.46	10.21	10.01	11.08	10.78	10.56	10.81	11.25			
9	9.33	8.35	9.58	9.09	8.29	8.38	9.08	8.58	9.38	8.57	9.46	9.14	8.5	8.34	8.29	8.38	9.14			
10	8.17	8.38	9.08	8.54	8.71	8.98	8.85	8.85	7.98	8.19	7.44	7.87	8.9	8.32	8.97	8.73	8.85			
11	6.02	6.56	5.92	6.17	7.02	6.56	5.92	6.50	6.03	7.09	7.01	6.71	5.64	6.04	6.18	5.95	6.71			
12	7.02	7.56	7.92	7.50	6.89	6.64	7.01	6.85	8.33	7.64	7.88	7.95	7.45	8.09	7.69	7.74	7.95			
13	7.09	6.37	6.66	6.71	7.17	6.51	6.93	6.87	7.08	7.41	7.26	7.25	7.09	7.07	7.02	7.06	7.25			
14	8.9	8.08	7.88	8.29	8.32	8.67	8.38	8.46	8.09	8.38	9.13	8.53	8.19	8.08	8.08	8.12	8.53			
15	9.1	9.25	8.15	8.83	8.9	9.08	7.88	8.62	9.43	8.58	9.35	9.12	8.45	9.04	9.19	8.89	9.12			
16	7.33	7.85	8.58	7.92	7.19	7.37	6.67	7.08	8.46	8.45	7.87	8.26	7.43	8.19	7.58	7.73	8.26			
17	6.22	6.56	5.92	6.23	6.74	6.14	6.01	6.30	5.49	6.37	7.09	6.32	6.02	6.56	5.92	6.17	6.32			
18	7.71	8.09	8.13	7.98	7.39	7.32	7.08	7.26	8.09	7.22	8.97	8.09	7.45	8.09	7.69	7.74	8.09			

## Uji kesamaan rata-rata kekasaran permukaan replikasi 1

### 1. Percobaan 1

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

#### One-way ANOVA: perc 1 versus Arah pengukuran

Source	DF	SS	MS	F	P
Arah pengukuran	3	1.160	0.387	2.13	0.174
Error	8	1.450	0.181		
Total	11	2.610			

S = 0.4258    R-Sq = 44.44%    R-Sq(adj) = 23.60%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of Arah pengukuran

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

### 2. Percobaan 2

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

#### One-way ANOVA: perc 2 versus Arah pengukuran

Source	DF	SS	MS	F	P
Arah pengukuran	3	0.255	0.085	0.71	0.574
Error	8	0.961	0.120		
Total	11	1.216			

S = 0.3466    R-Sq = 20.97%    R-Sq(adj) = 0.00%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of Arah pengukuran

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

### 3. Percobaan 3

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

#### One-way ANOVA: perc 3 versus Arah pengukuran

Source	DF	SS	MS	F	P
Arah pengukuran	3	3.77	1.26	0.60	0.632
Error	8	16.72	2.09		
Total	11	20.49			

S = 1.446    R-Sq = 18.42%    R-Sq(adj) = 0.00%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of Arah pengukuran

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

### 4. Percobaan 4

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

#### One-way ANOVA: perc 4 versus Arah pengukuran

Source	DF	SS	MS	F	P
Arah pengukuran	3	4.1151	1.3717	14.35	0.001
Error	8	0.7648	0.0956		
Total	11	4.8799			

S = 0.3092 R-Sq = 84.33% R-Sq(adj) = 78.45%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of Arah pengukuran

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka tolak  $H_0$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang berbeda. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan berbeda, maka diambil rata-rata nilai kekasaran permukaan yang paling besar untuk kemudian dilakukan optimasi.

## 5. Percobaan 5

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

### One-way ANOVA: perc 5 versus Arah pengukuran

Source	DF	SS	MS	F	P
Arah pengukuran	3	4.39	1.46	1.45	0.299
Error	8	8.09	1.01		
Total	11	12.48			

S = 1.005 R-Sq = 35.21% R-Sq(adj) = 10.91%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of Arah pengukuran

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

Pengujian ini dilakukan untuk semua data kekasaran permukaan pada replikasi 1 maupun replikasi 2.

## DATA TEBAL LAPISAN RECAST (LR)

Tabel L9.1 Tebal lapisan recast replikasi 1

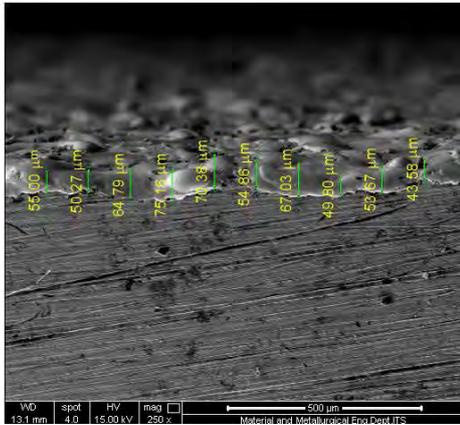
Komb.	Tebal lapisan recast ( $\mu\text{m}$ )										Mean ( $\mu\text{m}$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	55.00	50.27	64.79	75.16	70.38	54.86	67.03	49.80	53.67	43.58	58.45
2	39.57	59.15	42.72	53.94	77.43	35.23	61.77	89.61	81.78	40.89	58.21
3	72.13	58.32	47.57	87.48	79.80	61.39	46.04	88.22	139.00	75.37	75.53
4	57.57	58.34	56.52	51.55	61.93	52.99	56.74	21.33	39.88	52.04	50.89
5	107.26	50.47	73.33	63.35	123.03	36.17	77.81	37.86	108.31	35.12	71.27
6	130.16	107.71	65.10	55.99	103.96	51.09	63.48	59.89	37.30	57.08	73.18
7	29.06	40.37	48.44	40.84	47.61	34.18	24.49	48.12	43.71	41.37	39.82
8	46.85	41.64	49.81	48.61	56.61	45.81	44.18	49.89	50.60	45.87	47.99
9	32.74	62.10	74.06	66.68	66.98	68.08	41.10	56.71	22.05	71.23	56.17
10	34.32	74.80	76.68	76.59	57.16	56.63	59.87	55.13	49.78	53.47	59.44
11	45.64	74.36	71.90	71.83	41.69	69.41	60.93	50.03	58.77	51.75	59.63
12	76.27	71.58	70.56	72.58	95.43	81.33	76.12	63.10	68.92	68.05	74.39
13	53.61	69.39	34.49	41.15	60.30	67.74	44.11	63.97	78.30	57.92	57.10
14	83.71	71.19	48.66	80.20	23.43	69.80	77.06	35.72	49.12	65.06	60.40
15	67.98	76.59	81.58	84.46	99.49	75.87	64.40	55.10	71.42	71.42	74.83
16	50.45	41.17	61.43	52.28	33.33	66.01	74.80	42.27	34.33	44.69	50.08
17	39.73	39.77	43.42	50.93	54.67	39.81	41.75	48.74	48.74	41.20	44.88
18	57.21	63.98	58.81	46.91	48.54	63.20	52.11	65.00	85.95	58.43	60.01

Tabell 9.2 Tebal lapisan recast replikasi 2

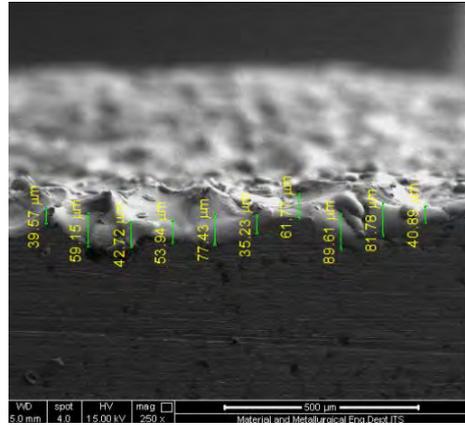
Komb.	Tebal lapisan recast (µm)										Mean (µm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	55.27	33.37	53.67	49.51	67.03	54.86	70.38	64.79	85.46	50.27	58.46
2	53.89	81.78	89.61	61.77	38.78	67.43	53.94	42.72	59.15	39.90	58.90
3	75.37	143.20	88.22	46.04	61.39	79.80	87.48	47.57	58.32	72.13	75.95
4	77.00	31.99	36.13	50.20	47.39	34.38	64.43	63.42	57.66	44.68	50.73
5	66.66	33.33	51.10	51.10	59.59	55.90	30.00	61.65	63.00	76.36	54.87
6	85.10	88.02	64.41	63.04	64.41	57.21	77.61	58.58	101.05	71.24	73.07
7	58.48	35.80	39.38	34.61	57.29	33.42	25.37	29.52	36.90	47.30	39.81
8	35.37	50.60	39.89	54.18	45.81	46.61	68.61	49.81	41.24	46.85	47.90
9	56.02	44.02	59.44	51.17	52.91	51.82	55.05	43.35	69.71	80.24	56.37
10	71.45	66.10	57.64	63.53	68.84	50.15	56.85	55.34	40.49	59.28	58.97
11	48.09	82.36	80.73	63.52	66.55	41.13	46.69	51.65	54.44	64.21	59.94
12	83.44	65.68	87.40	65.51	62.29	60.88	87.23	88.18	84.48	64.00	74.91
13	57.92	78.30	63.97	44.11	67.74	61.15	49.15	34.49	69.39	53.61	57.98
14	77.50	45.15	47.94	49.81	54.22	63.78	70.98	69.37	59.61	66.33	60.47
15	76.26	68.75	84.91	64.06	65.53	78.47	83.72	70.49	63.26	88.83	74.43
16	40.93	54.02	52.27	58.38	50.59	51.87	47.10	55.82	40.99	49.65	50.16
17	44.87	40.09	42.01	40.98	52.18	44.68	41.55	42.50	49.21	50.36	44.84
18	58.43	85.95	55.00	62.11	53.20	58.54	56.91	68.81	53.98	48.50	60.14

LAMPIRAN 10A

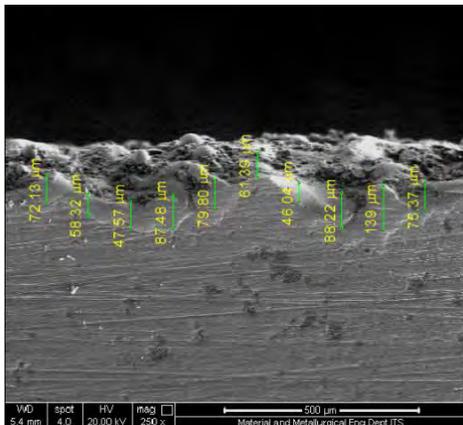
**FOTO SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM) PADA LAPISAN RECAST (LR) - REPLIKASI 1**



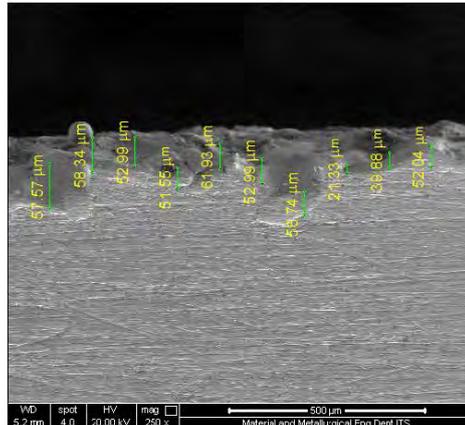
Gambar L10A.1 LR kombinasi 1



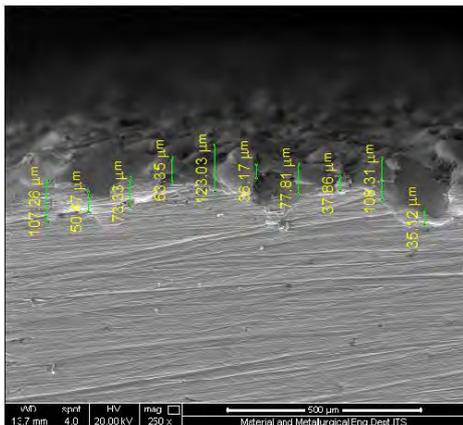
Gambar L10A.2 LR kombinasi 2



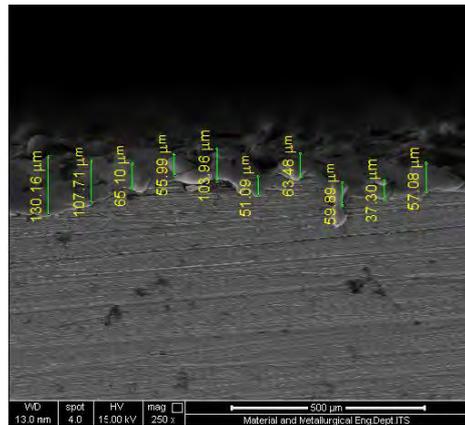
Gambar L10A.3 LR kombinasi 3



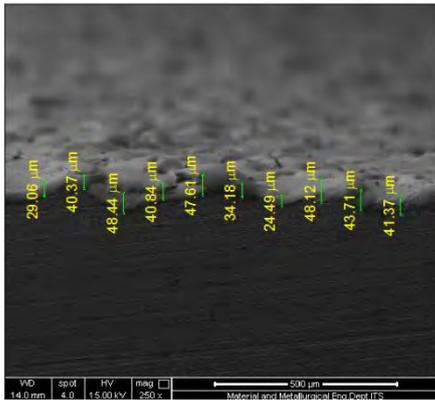
Gambar L10A.4 LR kombinasi 4



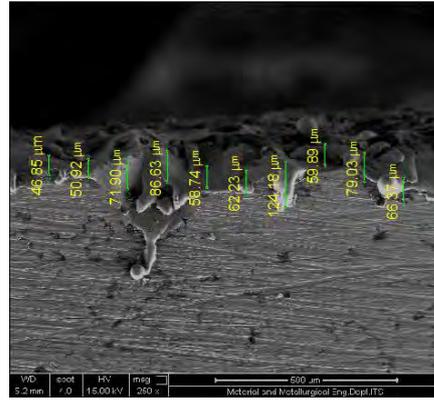
Gambar L10A.5 LR kombinasi 5



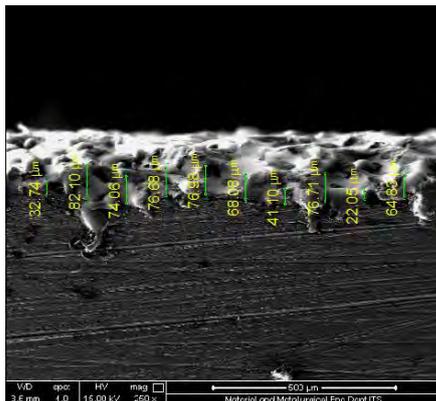
Gambar L10A.6 LR kombinasi 6



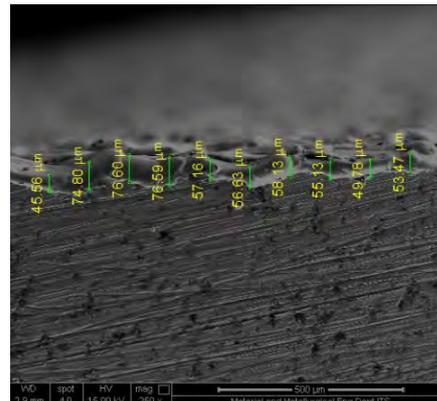
Gambar L10A.7 LR kombinasi 7



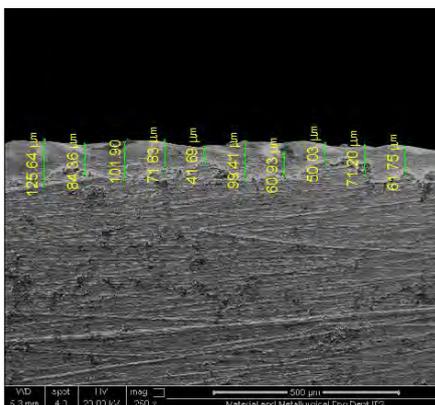
Gambar L10A.8 LR kombinasi 8



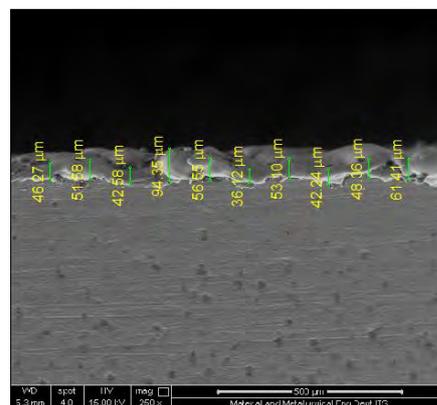
Gambar L10A.9 LR kombinasi 9



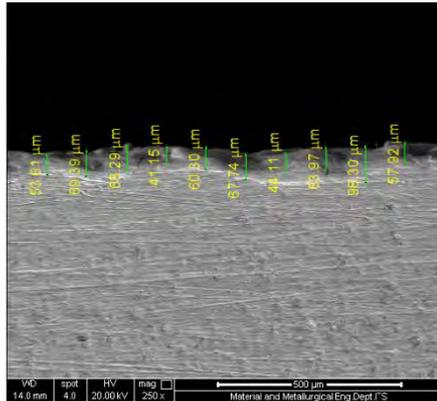
Gambar L10A.10 LR kombinasi 10



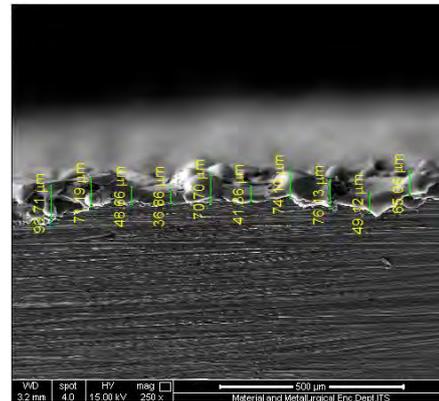
Gambar L10A.11 LR kombinasi 11



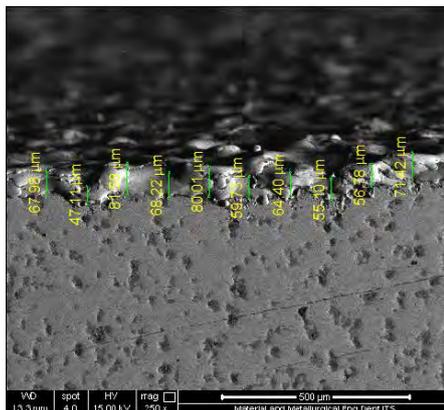
Gambar L10A.12 LR kombinasi 12



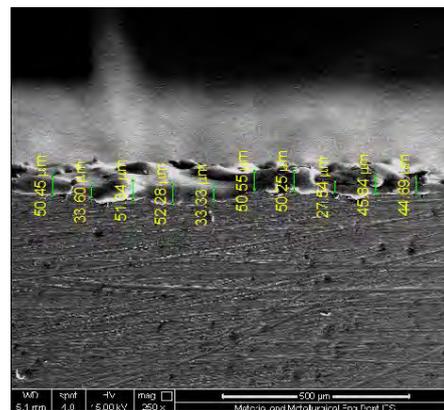
Gambar L10A.13 LR kombinasi 13



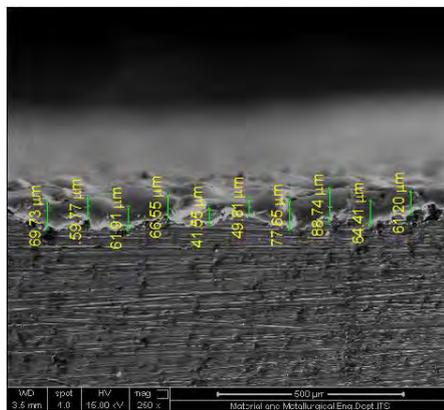
Gambar L10A.14 LR kombinasi 14



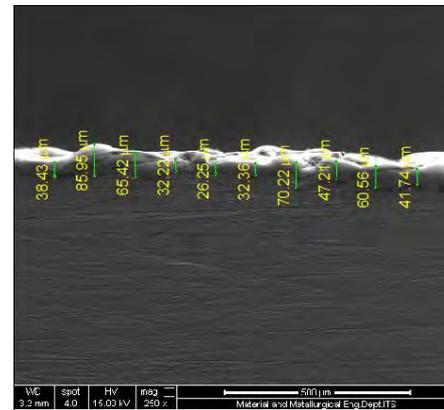
Gambar L10A.15 LR kombinasi 15



Gambar L10A.16 LR kombinasi 16



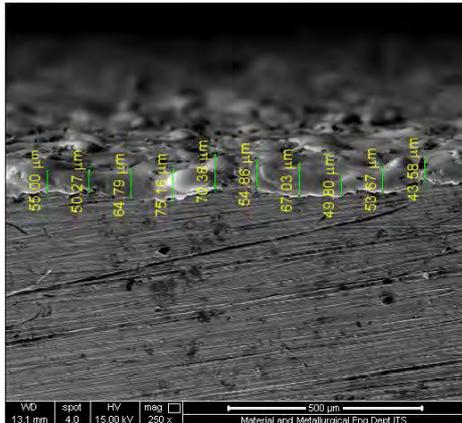
Gambar L10A.17 LR kombinasi 17



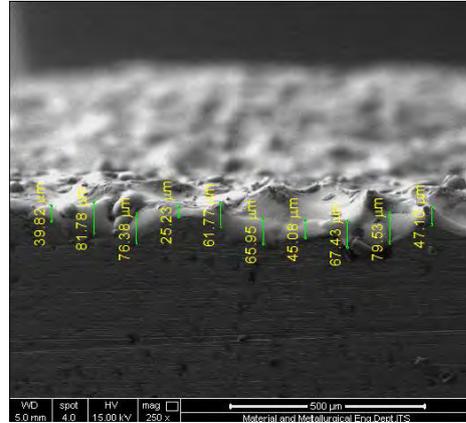
Gambar L10A.18 LR kombinasi 18

LAMPIRAN 10B

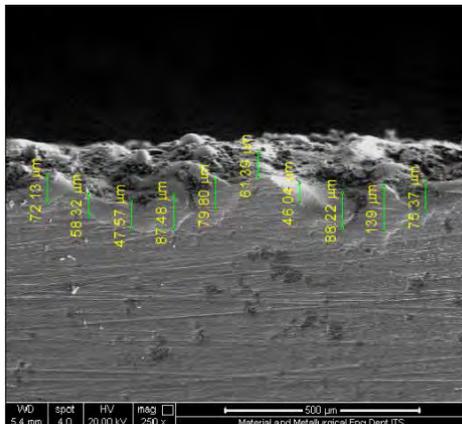
**FOTO SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM) PADA LAPISAN  
RECAST (LR) - REPLIKASI 2**



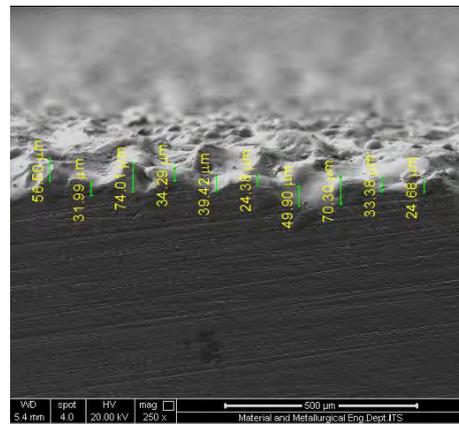
Gambar L10B.1 LR kombinasi 1



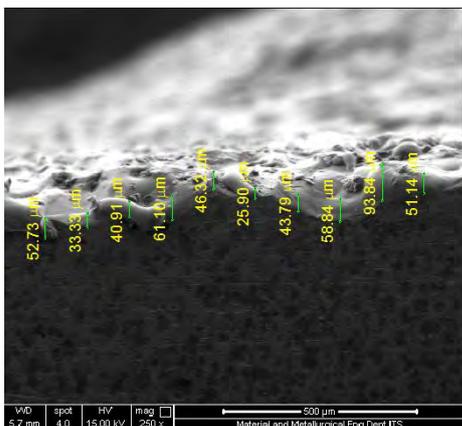
Gambar L10B.2 LR kombinasi 2



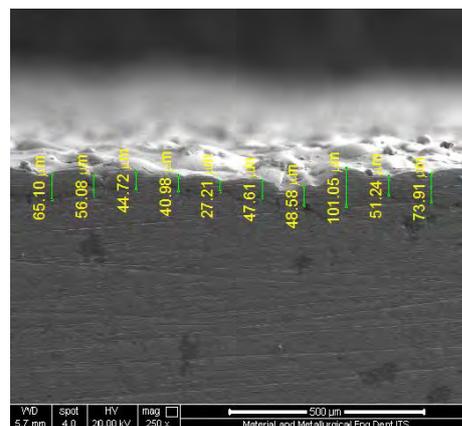
Gambar L10B.3 LR kombinasi 3



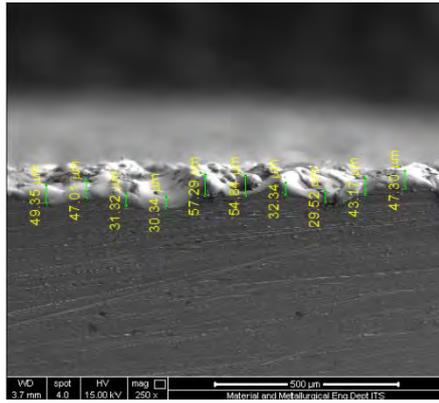
Gambar L10B.4 LR kombinasi 4



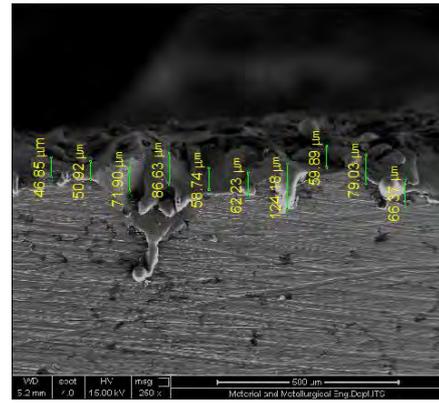
Gambar L10B.5 LR kombinasi 5



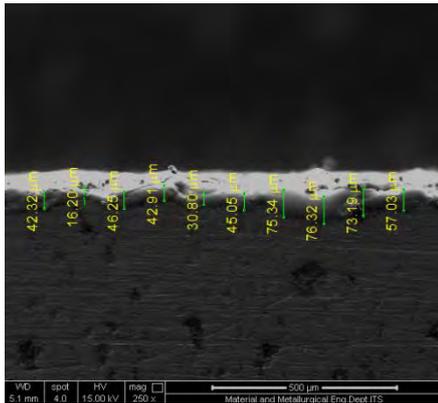
Gambar L10B.6 LR kombinasi 6



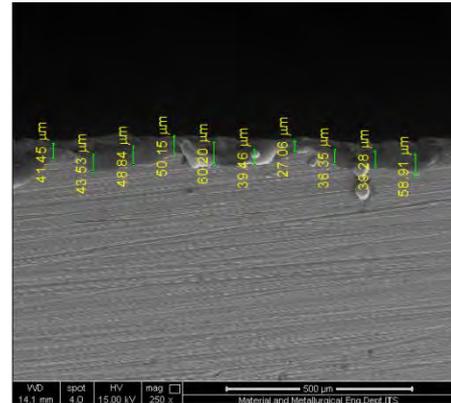
Gambar L10B.7 LR kombinasi 7



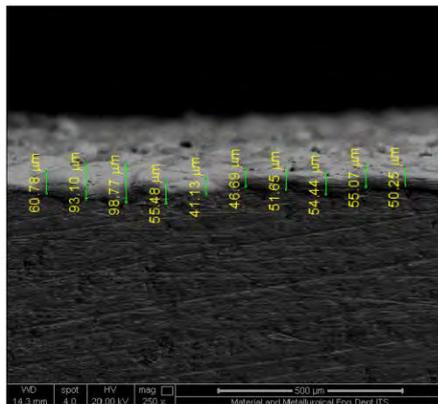
Gambar L10B.8 LR kombinasi 8



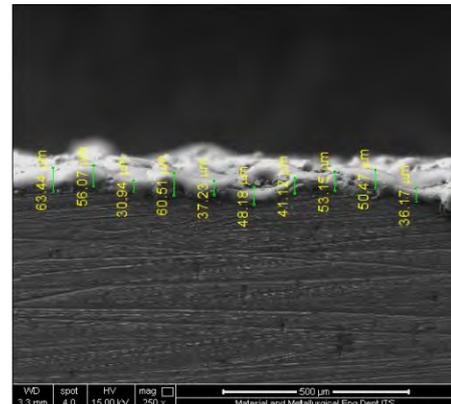
Gambar L10B.9 LR kombinasi 9



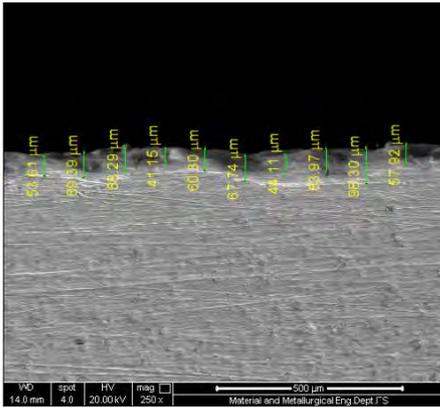
Gambar L10B.10 LR kombinasi 10



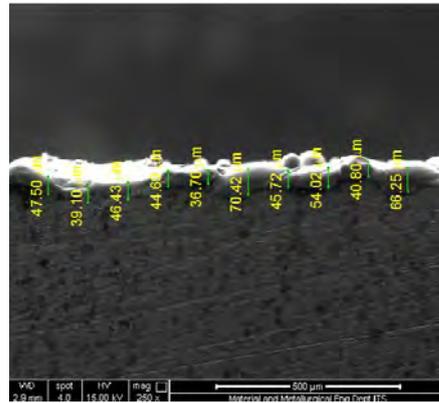
Gambar L10B.11 LR kombinasi 11



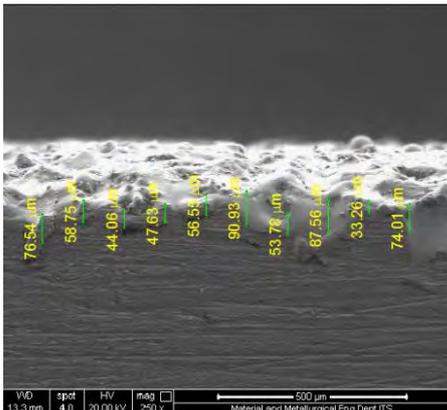
Gambar L10B.12 LR kombinasi 12



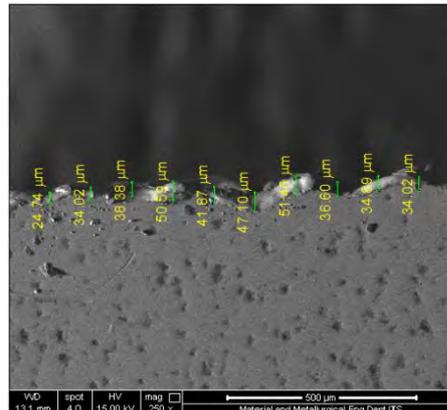
Gambar L10B.13 LR kombinasi 13



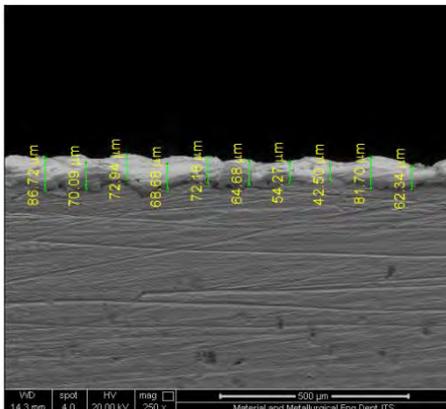
Gambar L10B.14 LR kombinasi 14



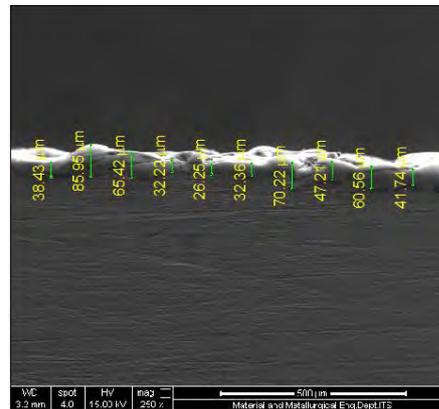
Gambar L10B.15 LR kombinasi 15



Gambar L10B.16 LR kombinasi 16



Gambar L10B.17 LR kombinasi 17



Gambar L10B.18 LR kombinasi 18

LAMPIRAN 11

DATA PERCOBAAN AWAL DAN PERCOBAAN KONFIRMASI

Tabel L11.1 Laju Pengerjaan Bahan pada Kombinasi Awal (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>)

Trial	Waktu (min)	Massa Benda Kerja (gram)						Massa Jenis BK (gr/mm <sup>3</sup> )	Volume Vg Terbuang (mm <sup>3</sup> )	LPB (mm <sup>3</sup> /min)	
		Sebelum Proses			Setelah Proses						
		1	2	3	1	2	3				rata-rata (c)
1	7.53	13.65	13.65	13.64	13.65	11.85	11.86	11.86	0.008	235.813	31.30
2	7.08	13.57	13.56	13.56	13.56	11.77	11.78	11.77	0.008	235.813	33.29
3	7.72	13.32	13.31	13.32	13.32	11.52	11.52	11.52	0.008	236.691	30.67

Tabel L11.2 Laju Pengerjaan Bahan pada Kombinasi Optimum (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>)

Trial	Waktu (min)	Massa BK (gram)						Massa Jenis BK (gr/mm <sup>3</sup> )	Volume Vg Terbuang (mm <sup>3</sup> )	LPB (mm <sup>3</sup> /min)	
		Sebelum Proses			Setelah Proses						
		1	2	3	1	2	3				rata-rata (c)
1	7.53	13.30	13.29	13.28	13.29	11.62	11.62	11.61	0.008	220.444	29.26
2	7.50	13.57	13.56	13.56	13.56	11.88	11.87	11.88	0.008	222.200	29.63
3	7.55	13.02	13.01	13.02	13.02	11.35	11.34	11.35	0.008	220.004	29.14

Tabel L11.3 Rasio Keausan Elektroda (RKE) pada Kombinasi Awal (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>)

Trial	Massa grafit (gram)						Massa jenis grafit (gr/mm <sup>3</sup> )	Volume grafit yg terbuang (mm <sup>3</sup> )	Volume BK yg terbuang (mm <sup>3</sup> )	RKE (%)
	Sebelum Proses			Setelah Proses						
	1	2	3	1	2	3				
1	49.56	49.56	49.56	49.55	49.55	49.55	49.550	5.654	235.813	2.40
2	49.53	49.53	49.53	49.52	49.52	49.52	49.520	5.654	235.813	2.40
3	49.52	49.51	49.52	49.51	49.51	49.50	49.507	5.654	236.691	2.39

Tabel L11.4 Rasio Keausan Elektroda (RKE) pada Kombinasi Optimum (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>)

Trial	Massa grafit (gram)						Massa jenis grafit (gr/mm <sup>3</sup> )	Volume grafit yg terbuang (mm <sup>3</sup> )	Volume BK yg terbuang (mm <sup>3</sup> )	RKE (%)
	Sebelum Proses			Setelah Proses						
	1	2	3	1	2	3				
1	49.57	49.56	49.56	49.55	49.56	49.56	49.557	3.770	220.444	1.71
2	49.54	49.53	49.53	49.53	49.53	49.52	49.527	3.770	222.200	1.70
3	49.53	49.52	49.53	49.52	49.52	49.52	49.520	3.770	220.004	1.71

Tabel L11.5 Kekasaran Permukaan pada Kombinasi Awal (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>)

Trial	Arah Pengukuran Kekasaran Permukaan												Max (µm)				
	Horizontal			Vertikal			45°			-45°							
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		mean (µm)			
1	10.43	10.22	10.73	10.46	10.45	10.89	10.31	10.55	10.60	10.75	10.69	10.68	10.48	10.55	10.46	10.50	10.68
2	11.26	10.32	10.22	10.60	10.80	10.77	10.64	10.74	10.71	11.18	10.39	10.76	11.07	10.60	10.77	10.81	10.81
3	10.57	10.62	10.56	10.58	10.48	10.97	10.37	10.61	10.59	10.85	11.01	10.82	10.51	10.42	11.07	10.67	10.82

Tabel L11.6 Kekasaran Permukaan pada Kombinasi Optimum (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>)

Trial	Arah Pengukuran Kekasaran Permukaan												Max (µm)				
	Horizontal			Vertikal			45°			-45°							
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		mean (µm)			
1	6.23	6.22	6.13	6.19	6.25	6.29	6.31	6.28	6.13	6.20	6.19	6.17	6.28	6.15	6.16	6.20	6.28
2	6.26	6.33	6.32	6.30	6.12	6.17	6.16	6.15	6.21	6.18	6.19	6.19	6.07	6.20	6.17	6.15	6.30
3	6.17	6.12	6.16	6.15	6.28	6.37	6.31	6.32	6.19	6.25	6.01	6.15	6.21	6.32	6.07	6.20	6.32

- **Uji Kesamaan rata-rata Kekasaran Permukaan pada Kombinasi Optimum (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>)**

a. *Trial 1*

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

**One-way ANOVA: trial 1 versus arah ukur**

Source	DF	SS	MS	F	P
arah ukur	3	0.02150	0.00717	2.70	0.117
Error	8	0.02127	0.00266		
Total	11	0.04277			

S = 0.05156    R-Sq = 50.27%    R-Sq(adj) = 31.63%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of arah ukur

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal, 45° atau -45° memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

b. *Trial 2*

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

**One-way ANOVA: trial 2 versus arah ukur**

Source	DF	SS	MS	F	P
arah ukur	3	0.01700	0.00567	3.09	0.090
Error	8	0.01467	0.00183		
Total	11	0.03167			

S = 0.04282    R-Sq = 53.68%    R-Sq(adj) = 36.32%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of arah ukur

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

c. *Trial 3*

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

**One-way ANOVA: trial 3 versus arah ukur**

Source	DF	SS	MS	F	P
arah ukur	3	0.00457	0.00152	0.86	0.501
Error	8	0.01420	0.00177		
Total	11	0.01877			

S = 0.04213    R-Sq = 24.33%    R-Sq(adj) = 0.00%

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals  
All Pairwise Comparisons among Levels of arah ukur

Individual confidence level = 98.74%

Nilai *P-value* lebih dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran arah horizontal, vertikal,  $45^\circ$  atau  $-45^\circ$  memiliki rata-rata nilai kekasaran permukaan yang sama. Karena nilai rata-rata kekasaran permukaan adalah sama, maka dapat diambil salah satu nilai dari keempat arah pengukuran untuk kemudian dilakukan optimasi.

Pengujian ini dilakukan untuk semua data kekasaran permukaan pada kombinasi awal maupun kombinasi optimum.

Tabel L11.7 Tebal Lapisan Recast pada Kombinasi Awal (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>)

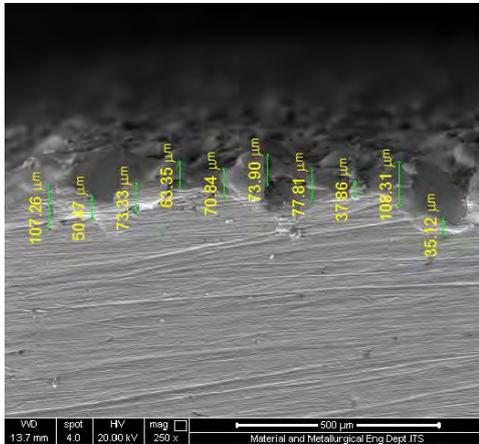
Trial	Tebal lapisan recast										Mean µm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	56.66	43.33	51.10	61.10	59.99	55.90	48.35	57.95	58.86	56.36	54.96
2	57.26	50.47	53.33	53.35	58.03	46.17	57.81	47.86	68.31	45.12	53.77
3	57.32	58.71	49.93	54.62	51.97	55.57	53.33	63.53	54.24	48.58	54.78

Tabel L11.8 Tebal Lapisan Recast pada Kombinasi Optimum (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>)

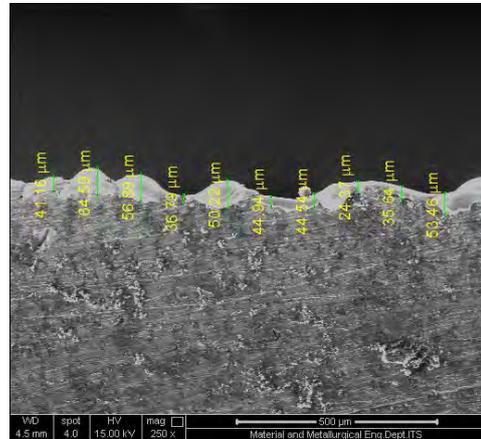
Trial	Tebal lapisan recast										Mean (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	64.59	56.89	41.16	44.94	36.79	50.22	50.81	35.64	44.54	53.69	47.93
2	46.95	43.52	44.66	51.70	47.31	24.10	43.65	49.46	46.39	45.12	44.29
3	47.32	48.71	49.93	44.62	46.97	55.57	43.33	53.53	54.24	48.58	49.28

LAMPIRAN 12

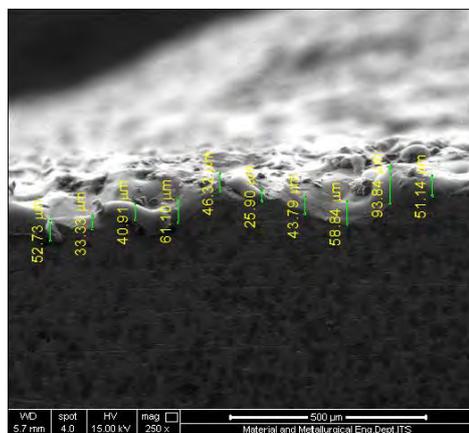
FOTO SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)



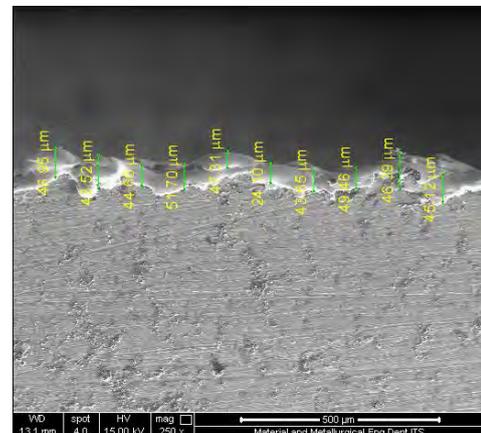
Gambar L12.1 LR kombinasi awal 1



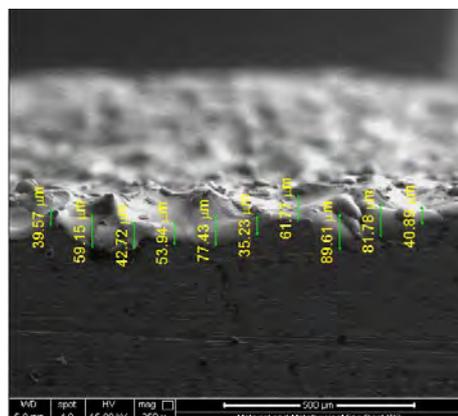
Gambar L12.2 LR kombinasi optimum 1



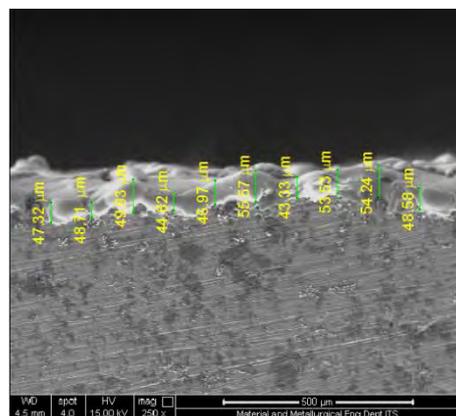
Gambar L12.3 LR kombinasi awal 2



Gambar L12.4 LR kombinasi optimum 2



Gambar L12.5 LR kombinasi awal 3



Gambar L12.6 LR kombinasi optimum 3

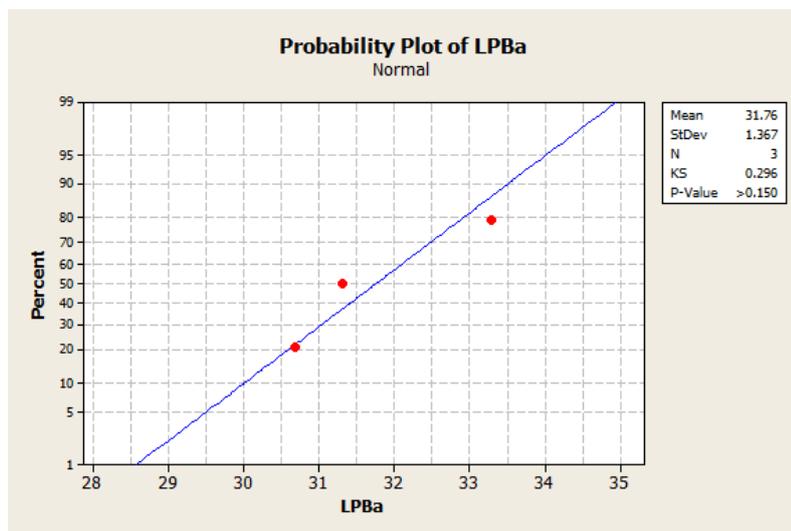
## LAMPIRAN 13

### UJI KESAMAAN RATA-RATA PENGATURAN KOMBINASI AWAL DENGAN PENGATURAN KOMBINASI OPTIMUM

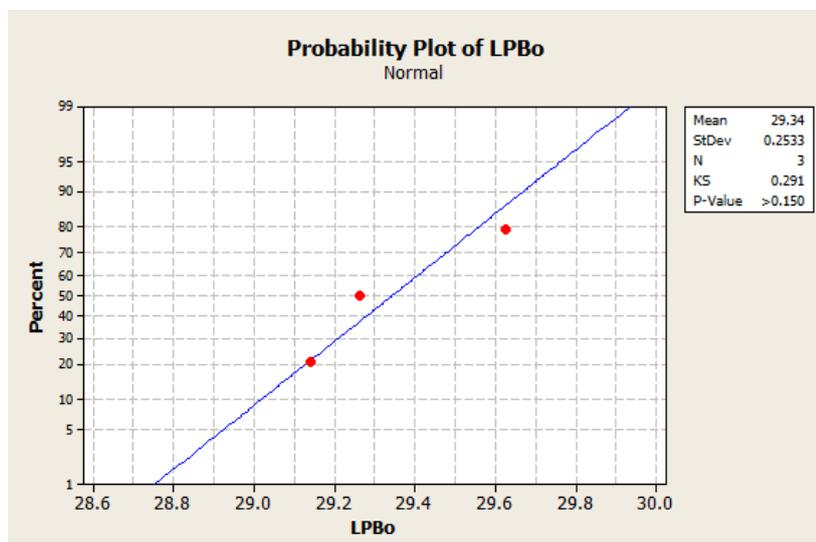
#### 1. LAJU Pengerjaan Bahan (LPB)

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

##### a. Uji kenormalan data



Gambar L13.1 *Probability plot* dari respon LPB kombinasi awal



Gambar L13.2 *Probability plot* dari respon LPB kombinasi optimum

Nilai *p-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data LPB pada kombinasi awal dan pada kombinasi optimum berdistribusi normal.

## b. Uji kesamaan variansi

### Test and CI for Two Variances: LPBa, LPBo

Method

Null hypothesis                      Sigma (LPBa) / Sigma (LPBo) = 1  
 Alternative hypothesis              Sigma (LPBa) / Sigma (LPBo) not = 1  
 Significance level                    Alpha = 0.05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
LPBa	3	1.367	1.868
LPBo	3	0.253	0.064

Ratio of standard deviations = 5.396  
 Ratio of variances = 29.116

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal Continuous	(0.864, 33.698) ( *, *)	(0.747, 1135.535) ( *, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test	
			Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	29.12	0.066
Levene's Test (any continuous)	1	4	1.42	0.299

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

## c. Uji kesamaan rata-rata

### Two-Sample T-Test and CI: LPBa, LPBo

Two-sample T for LPBa vs LPBo

	N	Mean	StDev	SE Mean
LPBa	3	31.76	1.37	0.79
LPBo	3	29.343	0.253	0.15

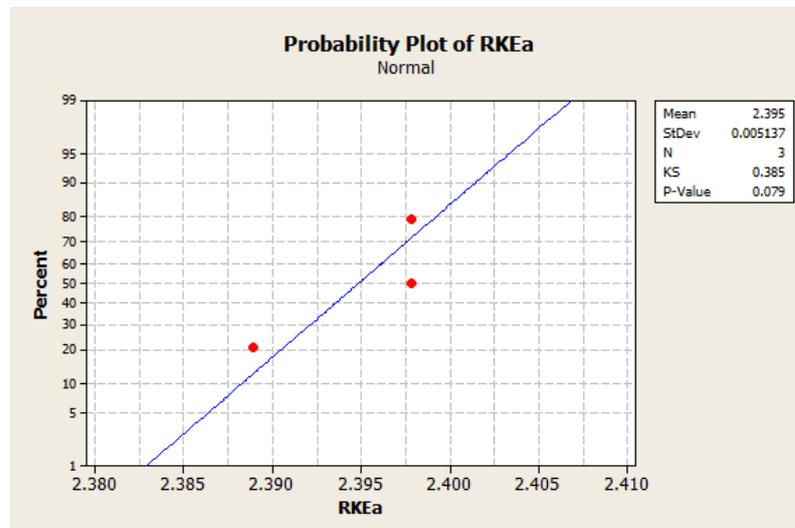
Difference = mu (LPBa) - mu (LPBo)  
 Estimate for difference: 2.413  
 95% CI for difference: (0.184, 4.641)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 3.01 P-Value = 0.040 DF = 4  
 Both use Pooled StDev = 0.9829

Nilai *p-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata LPB pada kombinasi awal dan nilai rata-rata LPB pada kombinasi optimum adalah berbeda.

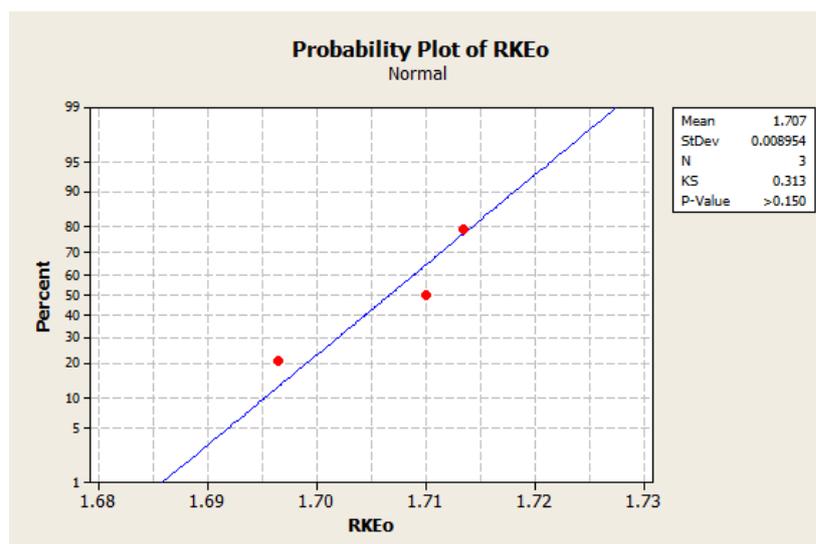
## 2. RASIO KEAUSAN ELEKTRODA (RKE)

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

### a. Uji kenormalan data



Gambar L13.3 *Probability plot* dari respon RKE kombinasi awal



Gambar L13.4 *Probability plot* dari respon RKE kombinasi optimum

Nilai *p-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data RKE pada kombinasi awal dan pada kombinasi optimum berdistribusi normal.

## b. Uji kesamaan variansi

### Test and CI for Two Variances: RKEa, RKEo

Method

Null hypothesis                       $\text{Sigma}(\text{RKEa}) / \text{Sigma}(\text{RKEo}) = 1$   
 Alternative hypothesis            $\text{Sigma}(\text{RKEa}) / \text{Sigma}(\text{RKEo}) \text{ not } = 1$   
 Significance level                  $\text{Alpha} = 0.05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
RKEa	3	0.005	0.000
RKEo	3	0.009	0.000

Ratio of standard deviations = 0.574  
 Ratio of variances = 0.329

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0.092, 3.583)	(0.008, 12.836)
Continuous	( *, *)	( *, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	0.33	0.495
Levene's Test (any continuous)	1	4	0.28	0.622

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

## c. Uji kesamaan rata-rata

### Two-Sample T-Test and CI: RKEa, RKEo

Two-sample T for RKEa vs RKEo

	N	Mean	StDev	SE Mean
RKEa	3	2.39486	0.00514	0.0030
RKEo	3	1.70664	0.00895	0.0052

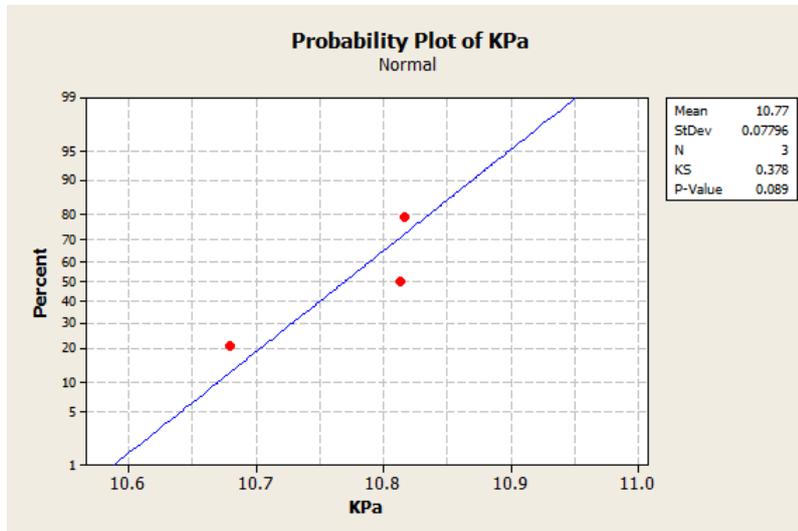
Difference =  $\mu(\text{RKEa}) - \mu(\text{RKEo})$   
 Estimate for difference: 0.68823  
 95% CI for difference: (0.67168, 0.70477)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 115.48    P-Value = 0.000    DF = 4  
 Both use Pooled StDev = 0.0073

Nilai *p-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata RKE pada kombinasi awal dan nilai rata-rata RKE pada kombinasi optimum adalah berbeda.

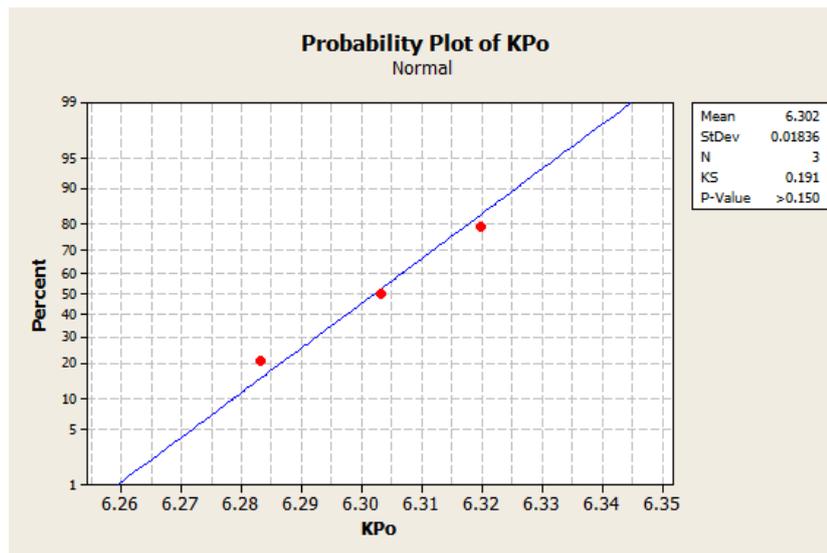
### 3. KEKASARAN PERMUKAAN (KP)

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

#### a. Uji kenormalan data



Gambar L13.5 *Probability plot* dari respon KP kombinasi awal



Gambar L13.6 *Probability plot* dari respon KP kombinasi optimum

Nilai *p-value* lebih besar dari  $\alpha=0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data KP pada kombinasi awal dan pada kombinasi optimum berdistribusi normal.

## b. Uji kesamaan variansi

### Test and CI for Two Variances: KPa, KPo

Method

Null hypothesis                    Sigma (KPa) / Sigma (KPo) = 1  
 Alternative hypothesis        Sigma (KPa) / Sigma (KPo) not = 1  
 Significance level            Alpha = 0.05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
KPa	3	0.078	0.006
KPo	3	0.018	0.000

Ratio of standard deviations = 4.247  
 Ratio of variances = 18.033

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0.680, 26.520)	(0.462, 703.286)
Continuous	( *, *)	( *, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	18.03	0.105
Levene's Test (any continuous)	1	4	0.57	0.494

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

## c. Uji kesamaan rata-rata

### Two-Sample T-Test and CI: KPa, KPo

Two-sample T for KPa vs KPo

	N	Mean	StDev	SE Mean
KPa	3	10.7700	0.0780	0.045
KPo	3	6.3022	0.0184	0.011

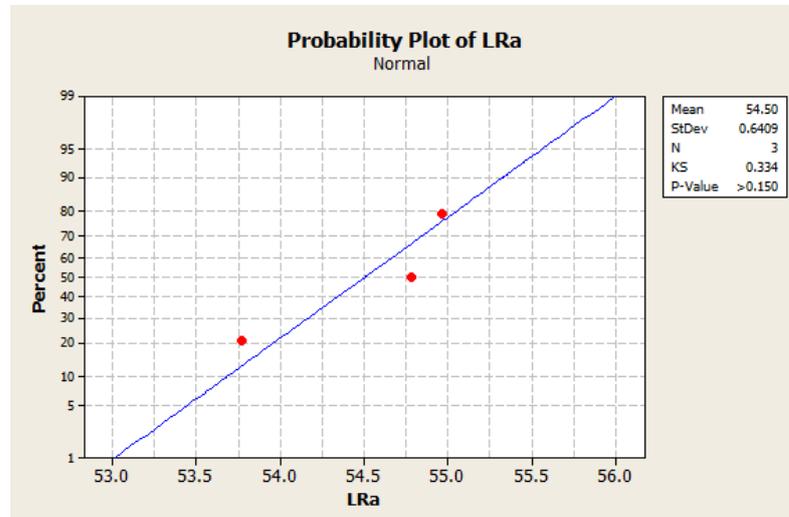
Difference = mu (KPa) - mu (KPo)  
 Estimate for difference: 4.4678  
 95% CI for difference: (4.3394, 4.5962)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 96.62 P-Value = 0.000 DF = 4  
 Both use Pooled StDev = 0.0566

Nilai *p-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata KP pada kombinasi awal dan nilai rata-rata KP pada kombinasi optimum adalah berbeda.

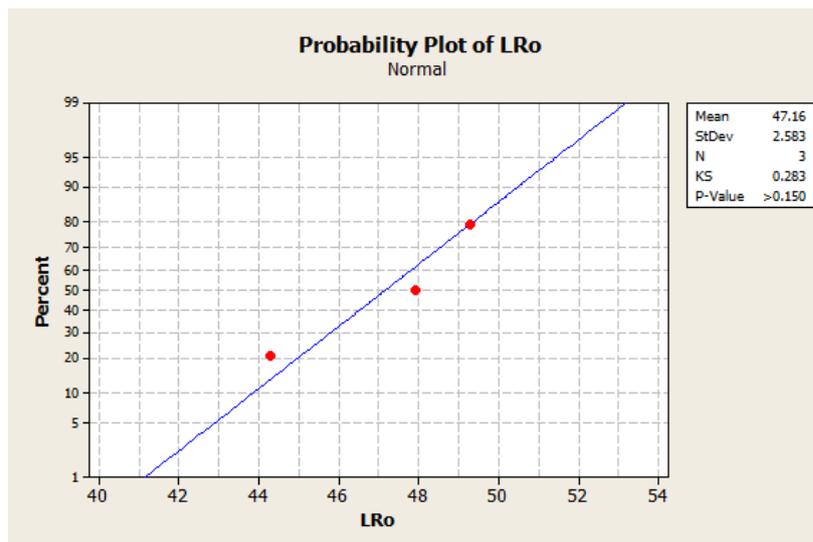
#### 4. TEBAL LAPISAN *RECAST* (LR)

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

##### a. Uji kenormalan data



Gambar L13.7 *Probability plot* dari respon LR kombinasi awal



Gambar L13.8 *Probability plot* dari respon LR kombinasi optimum

Nilai *p-value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa data LR pada kombinasi awal dan pada kombinasi optimum berdistribusi normal.

#### d. Uji kesamaan variansi

##### Test and CI for Two Variances: LRa, LRo

Method

Null hypothesis                       $\text{Sigma}(\text{LRa}) / \text{Sigma}(\text{LRo}) = 1$   
Alternative hypothesis                 $\text{Sigma}(\text{LRa}) / \text{Sigma}(\text{LRo}) \text{ not } = 1$   
Significance level                       $\text{Alpha} = 0.05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
LRa	3	0.641	0.411
LRo	3	2.583	6.671

Ratio of standard deviations = 0.248  
Ratio of variances = 0.062

95% Confidence Intervals

Distribution	CI for StDev of Data	CI for Variance
Normal	(0.040, 1.549)	(0.002, 2.401)
Continuous	( *, *)	( *, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	0.06	0.116
Levene's Test (any continuous)	1	4	1.31	0.316

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

#### e. Uji kesamaan rata-rata

##### Two-Sample T-Test and CI: LRa, LRo

Two-sample T for LRa vs LRo

	N	Mean	StDev	SE Mean
LRa	3	54.504	0.641	0.37
LRo	3	47.16	2.58	1.5

Difference =  $\mu(\text{LRa}) - \mu(\text{LRo})$   
Estimate for difference: 7.34  
95% CI for difference: (3.07, 11.61)  
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4.78 P-Value = 0.009 DF = 4  
Both use Pooled StDev = 1.8817

Nilai *p-value* kurang dari  $\alpha = 0,05$  maka  $H_0$  ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata LR pada kombinasi awal dan nilai rata-rata LR pada kombinasi optimum adalah berbeda.







---

## DAFTAR PUSTAKA

- Blank, L. T. (1982), *Statistical Procedures for Engineering, Management, and Science*, McGraw-Hill, Inc., USA.
- Dhavamani, C. dan Alwarsamy, T. (2011), "Review on Optimization of Machining Operation," *International Journal of Academic Research*, Vol. 3, hal. 476-485.
- Fikri, M. A. (2013), *Optimasi Multi Respon pada Proses EDM Sinking Material SKD11 Dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy*, Tesis yang Tidak Dipublikasikan, Program Magister Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- Groover, M. P. (2002), *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Guitrau, E. B. (1997), *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
- Iriawan, N. dan Astuti, S. P. (2006), *Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan Minitab 14*, Edisi I, Andi Offset, Yogyakarta.
- Khan, A. A., Ali, M. Y. dan Haque, M. M. (2009), "A Study of Electrode Shape Configuration on The Performance of Die Sinking EDM," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, Vol. 4, No. 1, hal 19-23.
- Krar, S. F. dan Check, A. F. (1997), *Technology of Machine Tools*, Glencoe McGraw-Hill, New York.
- Kusumadewi, S. dan Purnomo, H. (2010), *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*, Edisi kedua, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Kusumaningrum, I. (2012), *Optimasi Multi Respon Pada Proses EDM Sinking Material SKD11 dengan Menggunakan Metode Taguchi-Fuzzy*, Tesis yang Tidak Dipublikasikan, Program Magister Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- Lin, C. L., Lin, J. L. dan Ko, T. C. (2002), "Optimisation of The EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, hal. 271-277.



- Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2002), "The use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, hal. 237-244.
- Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2005), "The Use of Grey-Fuzzy Logic for the Optimization of the Manufacturing Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, hal. 9-14.
- Montgomery, D. C. (2009), "*Design and Analysis of Experiment*", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pandey, P. C. dan Shan, H. S. (1980), *Modern Machining Processes*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Park, S. H. (1996), *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, 1<sup>st</sup> edition, Chapman & Hall, London.
- Rochim, T. (1993), *Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T. (2001), *Spesifikasi, Metrologi & Kontrol Kualitas Geometrik*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Ross, P. J. (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill International Editions, Taiwan.
- Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Tosun, N. (2006), "Determination of Optimum Parameters for Multi Performance Characteristics in Drilling by Using Grey Relational Analysis," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, hal. 450-500.
- Vaani, T. dan Hameedullah, M. (2005). "Optimization Control Parameter in Electric Discharge Machining of Hardened Steel With Copper Electroplated Aluminum Electrode," *Proceeding of the International Conference on Recent Advance in Mechanical & Material Engineering*, Malaysia.
- Widarto, Wijanarka, B. S., Sutopo dan Paryanto (2008), *Teknik Pemesinan untuk SMK*, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional.



---

Yan, B. H., Wang, C. C., Chow, H. M. dan Lin, Y. C. (2000), "Feasibility Study of Rotary Electrical Discharge Machining with Ball Burnishing for Al 203/6061 Al Composite," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40(10), hal. 1403-1421.

<http://www.edmtechman.com>, diakses 12 Nopember 2014



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

## BIODATA PENULIS



Rahayu Mekar Bisono, lahir di Kabupaten Ponorogo pada tanggal 25 Januari 1990, penulis adalah putri kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Budi Bisono dan Ibu Kartini. Pendidikan dasar ditempuh di SDN Tonatan 2 Ponorogo, lulus pada 2002. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMPN 1 Ponorogo, lulus pada 2005. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMAN 1 Ponorogo, lulus tahun 2008. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dengan mengambil Jurusan Teknik Desain dan Manufaktur. Gelar Sarjana Sains Terapan diperoleh setelah menamatkan pendidikan pada tahun 2012. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya tepatnya di Jurusan Teknik Mesin program studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur dengan program beasiswa *Fresh Graduate*. Apabila pembaca ingin berkorespondensi dengan penulis dapat melalui email: [rahayu.mekar@yahoo.com](mailto:rahayu.mekar@yahoo.com).