



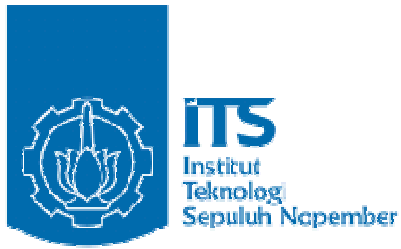
TESIS (TM 092501)

**OPTIMASI KEKASARAN PERMUKAAN, TEBAL LAPISAN *RECAST*, LEBAR PEMOTONGAN DAN LAJU Pengerjaan BAHAN PADA *WIRE-EDM* MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI DAN LOGIKA *FUZZY***

BACHTIAR  
2109201005

Dosen Pembimbing  
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN SISTEM MANUFaktur  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2012



TESIS (TM 092501)

**OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS,  
RECAST LAYER THICKNESS, CUTTING WIDTH,  
AND MATERIAL REMOVAL RATE ON WIRE-EDM  
USING TAGUCHI AND FUZZY LOGIC METHOD**

BACHTIAR  
2109201005

SUPERVISOR  
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

MASTER PROGRAM  
FIELD STUDY OF MANUFACTURING SYSTEM  
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2012

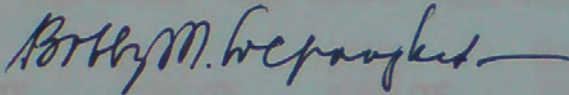
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

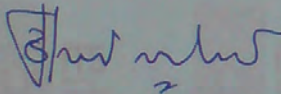
**BACHTIAR**  
NRP. 2109 201 005

Tanggal Ujian : 25 Januari 2012  
Periode Wisuda : Maret 2012

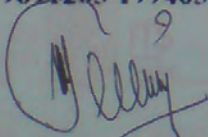
Disetujui oleh :



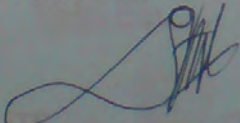
1. Ir. Bobby O. P. Soepzngkat, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 19530516 197803 1 001



2. Bambang Pramujati, ST., M.Sc.Eng., Ph.D. (Penguji)  
NIP. 19691203 199403 1 001



3. Dr. Sony Sunaryo, M.Si. (Penguji)  
NIP. 19640725 198903 1 001



4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. (Penguji)  
NIP. 19600623 198803 1 002

Direktur Program Pascasarjana



**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.**  
NIP. 19640405 199002 1 001

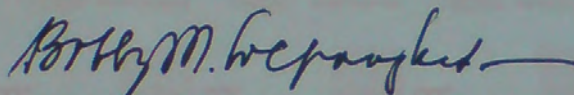
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

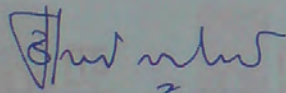
**BACI TIAR**  
NRP. 2109 201 005

Tanggal Ujian : 25 Januari 2012  
Periode Wisuda : Maret 2012

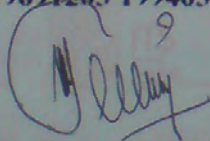
Disetujui oleh :



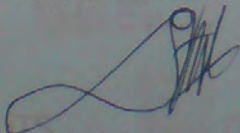
1. Ir. Bobby O. P. Soepzngkat, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 19530516 197803 1 001



2. Bambang Pramujati, ST., M.Sc.Eng., Ph.D. (Penguji)  
NIP. 19621203 199403 1 001



3. Dr. Sony Sunaryo, M.Si. (Penguji)  
NIP. 19640725 198903 1 001



4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. (Penguji)  
NIP. 19600623 198803 1 002

Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.  
NIP. 19640405 199002 1 001



**OPTIMASI KEKASARAN PERMUKAAN, TEBAL LAPISAN *RECAST*,  
LEBAR PEMOTONGAN DAN LAJU Pengerjaan BAHAN PADA  
WIRE-EDM MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI DAN LOGIKA  
FUZZY**

Nama Mahasiswa : Bachtiar  
NRP : 2109201005  
Pembimbing : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

**ABSTRAK**

Proses *wire*-EDM digunakan secara ekstensif untuk memotong benda kerja yang keras dengan bentuk-bentuk yang kompleks, dan juga membutuhkan kepresisian yang tinggi. Proses pemotongan kasar (*roughing*) pada *wire* EDM merupakan suatu proses yang menantang karena ada empat kinerja, yaitu laju pengerjaan material, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan, yang harus dioptimalkan agar dapat menghasilkan benda kerja yang presisi. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan parameter-parameter proses pemesinan *wire*-EDM yang optimal untuk memaksimalkan laju pengerjaan material serta meminimalkan kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan.

Suatu eksperimen telah dilakukan untuk menentukan pengaturan parameter-parameter pemesinan dengan menggunakan metode perancangan parameter Taguchi. Parameter-parameter pemesinan yang secara signifikan mempengaruhi keempat kinerja tersebut adalah *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed* dan *water flow*. Suatu metode *grey fuzzy* berbasis rancangan eksperimen Taguchi telah digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi multi obyektif ini.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter-parameter proses pemesinan *on time*, *open voltage* dan *off time* adalah kontributor-kontributor terbesar untuk menurunkan variasi dari keempat respon secara serentak. Untuk memaksimalkan laju pengerjaan bahan serta meminimalkan kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan, *on time* diatur pada 0.4  $\mu$ s, *open voltage* diatur pada 75 V and *off time* diatur pada 11  $\mu$ s.

Kata kunci: *wire*-EDM, *grey-fuzzyTaguchi*, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, laju pengerjaan bahan.



# OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS, RECAST LAYER THICKNESS, CUTTING WIDTH, AND MATERIAL REMOVAL RATE ON WIRE-EDM USING TAGUCHI AND FUZZY LOGIC METHOD

By : Bachtiar  
Student Identity Number : 2109201005  
Supervisor : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

## Abstract

Wire EDM is extensively used in machining of hard materials with complex shapes when precision is of prime importance. Rough cutting operation in wire EDM is considered as a challenging task because improvement of more than one performance measures such as surface roughness (SF), recast layer thickness (RLT), cutting width (kerf), and material removal rate (MRR) are sought for obtaining a precision work. Therefore, it is necessary to determine optimal machining parameters for maximization of MRR and minimization of SF, RLT and kerf in wire EDM.

An experiment was conducted to determine parameters setting by using Taguchi parameter design method. The significant parameters affecting the performance measures are identified as on time, open voltage, off time, servo voltage, wire feed and water flow. A grey fuzzy based Taguchi method is utilized to solve this multi-objective optimization problem.

The results show that machining parameters on time, open voltage, and off time are the biggest contributing factors in reducing the variation of the studied responses simultaneously. To obtain maximum MRR and minimum SF, RLT and kerf simultaneously, the settings of machining parameters are on time at 0.4  $\mu$ s, open voltage at 75 V and off time at 11  $\mu$ s.

Keywords: wire-EDM, grey-fuzzyTaguchi, surface roughness , recast layer, cutting width, material removal rate.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
LEMBAR PERSEMBAHAN	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Asumsi Penelitian	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>7</b>
2.1 Proses Pemesinan EDM	7
2.2 Prinsip Dasar <i>Wire</i> -EDM	8
2.2.1 Mekanisme Pengerjaan Material	9
2.2.2 Faktor-faktor pada <i>Wire</i> -EDM	10
2.2.3 Pembilasan Geram ( <i>Flushing</i> )	12
2.2.4 Tipe Elektroda Kawat	13
2.3 Kekasaran Permukaan	15
2.4 Lapisan <i>Recast</i>	20
2.5 Lebar Pemotongan ( <i>kerf</i> ).	22
2.6 Material Removal Rate	22
2.7 Metode Taguchi	23
2.7.1 Prosedur Eksperimen	24
2.7.2 Interpretasi Hasil Eksperimen	33
2.8 Analisa <i>grey-relational</i>	35
2.9 Logika <i>Fuzzy</i>	36
2.9.1 Pendahuluan	36
2.9.2 Fungsi Keanggotaan	38
2.9.3 Fungsi Implikasi	41
2.9.4 Sistem inferensi Fuzzy Metode Mamdani	42
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>49</b>
3.1 Faktor-faktor dalam Penelitian	49
3.2 Bahan dan Peralatan	50
3.3.1 Bahan Penelitian	50
3.3.2 Peralatan Penelitian	50



3.3	Rancangan Percobaan	53
3.3.1	Seting Faktor pada Mesin <i>Wire</i> -EDM	53
3.3.2	Pemilihan Matriks Ortogonal	54
3.4	Prosedur Penelitian	58
3.5	Pengukuran dan Pengambilan Data	59
3.5.1	Pengambilan Data Lebar Pemotongan	59
3.5.2	Pengambilan Data Laju Pengerjaan Bahan	60
3.5.3	Pengambilan Data Kekasaran Permukaan	60
3.5.4	Pengambilan Data Tebal Lapisan <i>Recast</i>	60
3.6	Karakteristik Respon Optimal	61
3.7	Unit Logika Fuzzy	61
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Data Hasil Eksperimen	63
4.2	Perhitungan Rasio S/N	65
4.3	Analisa <i>Grey-Relational</i>	66
4.4	Optimasi Multirespon dengan Logika <i>Fuzzy</i>	68
4.4.1	Fungsi keanggotaan	68
4.4.2	Aturan <i>fuzzy</i>	70
4.4.3	Penegasan ( <i>defuzzy</i> )	75
4.5	Rata-rata <i>grey-fuzzy reasoning grade</i>	77
4.6	Analisis Variansi dan Uji Distribusi F	79
4.7	Penentuan level optimum untuk faktor-faktor signifikan	83
4.8	Persen Kontribusi	86
4.9	Prediksi Rasio S/N Multirespon Optimal dan Interval Keyakinan	87
4.10	Eksperimen Konfirmasi	89
4.11	Pengaruh faktor signifikan terhadap respon individu	94
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan	97
5.2	Saran	97
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		98
<b>LAMPIRAN</b>		



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran	16
Tabel 2.2	Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan	19
Tabel 2.3	Hubungan antara panjang sampel l dan kekasaran permukaan	20
Tabel 2.4	Tabel analisis variansi	29
Tabel 3.1	Seting mesin untuk faktor konstan	53
Tabel 3.2	Seting faktor dan pengaturan level	54
Tabel 3.3	Total derajat kebebasan faktor dan level	54
Tabel 3.4	Rancangan percobaan Taguchi	56
Tabel 3.5	Tampilan data hasil eksperimen	57
Tabel 4.1	Data hasil eksperimen	63
Tabel 4.2	Rasio S/N masing-masing respon	66
Tabel 4.3	Nilai koefisien <i>grey-relational</i> masing-masing respon	67
Tabel 4.4	Nilai <i>grey-fuzzy reasoning grade</i> hasil proses defuzzifikasi	77
Tabel 4.5	Rasio S/N multirespon	78
Tabel 4.6	Rata-rata rasio S/N multirespon	79
Tabel 4.7	Analisis variansi multirespon	80
Tabel 4.8	Analisis variansi multirespon penggabungan ( <i>pooling up</i> )	81
Tabel 4.9	Kondisi hipotesis nol multirespon	82
Tabel 4.10	Kombinasi optimum pada faktor yang signifikan	85
Tabel 4.11	Analisis variansi multirespon dan persen kontribusi	87
Tabel 4.12	Kombinasi faktor pada eksperimen konfirmasi	89
Tabel 4.13	Hasil eksperimen konfirmasi	89
Tabel 4.14	Nilai rasio S/N masing-masing respon pada eksperimen konfirmasi	90
Tabel 4.15	Koefisien <i>grey-relational</i> respon eksperimen konfirmasi	90
Tabel 4.16	Nilai <i>grey-fuzzy reasoning grade</i> dan rasio S/N eksperimen konfirmasi	90
Tabel 4.17	Persen kontribusi faktor signifikan terhadap respon individu	93



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi proses pemesinan EDM	8
Gambar 2.2	Prinsip dasar <i>wire</i> -EDM	9
Gambar 2.3	Pengerjaan Material pada Wire EDM	10
Gambar 2.4	Metode <i>flushing</i>	13
Gambar 2.5	Penyimpangan rata-rata aritmatika	15
Gambar 2.6	Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik	17
Gambar 2.7	Ketidakrataan ketinggian maksimum	18
Gambar 2.8	Grafik hubungan tingkat kekasaran dengan biaya pengerjaan	18
Gambar 2.9	Kekerasan masing-masing lapisan pada benda kerja hasil <i>wire</i> -EDM	21
Gambar 2.10	Definisi kerf dan overcut pada wire EDM	22
Gambar 2.11	Grafik linier $L_{27}(3^{13})$	27
Gambar 2.12	Matrik ortogonal standar untuk $L_{27}(3^{13})$	27
Gambar 2.13	Representasi linier naik	38
Gambar 2.14	Representasi linier turun	39
Gambar 2.15	Representasi kurva segitiga	40
Gambar 2.16	Representasi kurva trapesium	41
Gambar 2.17	Fungsi Implikasi: MIN	42
Gambar 2.18	Fungsi Implikasi: DOT	42
Gambar 2.19	Komposisi aturan <i>Fuzzy</i> metode Max	44
Gambar 2.20	Proses defuzzifikasi	45
Gambar 3.1	Diagram alir metodologi penelitian	47
Gambar 3.2	Nikon <i>measurescope</i>	51
Gambar 3.3	Mitutoyo <i>surf test</i> 401	51
Gambar 3.4	Mikroskop Olympus BX41-32PO2	52
Gambar 3.5	Skema proses pemotongan	58
Gambar 3.6	Skema pengukuran lebar pemotongan	59
Gambar 3.7	Skema pengukuran kekasaran permukaan	60
Gambar 3.8	Skema pengukuran tebal lapisan <i>recast</i>	61
Gambar 4.1	Fungsi keanggotan untuk laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan <i>recast</i>	69
Gambar 4.2	Fungsi keanggotan multirespon sebagai output	70
Gambar 4.3	Prosedur penalaran logika fuzzy untuk <i>grey-fuzzy reasoning grade</i> terbesar	76
Gambar 4.4	Plot rata-rata GFRG untuk faktor utama	83
Gambar 4.5	Plot interaksi faktor A dan faktor B	84
Gambar 4.6	Plot interaksi faktor B dan faktor C	84
Gambar 4.7	Plot interaksi faktor A dan faktor C	85
Gambar 4.8	Plot interval keyakinan hasil optimasi dan eksperimen konfirmasi	93



## KATA PENGANTAR

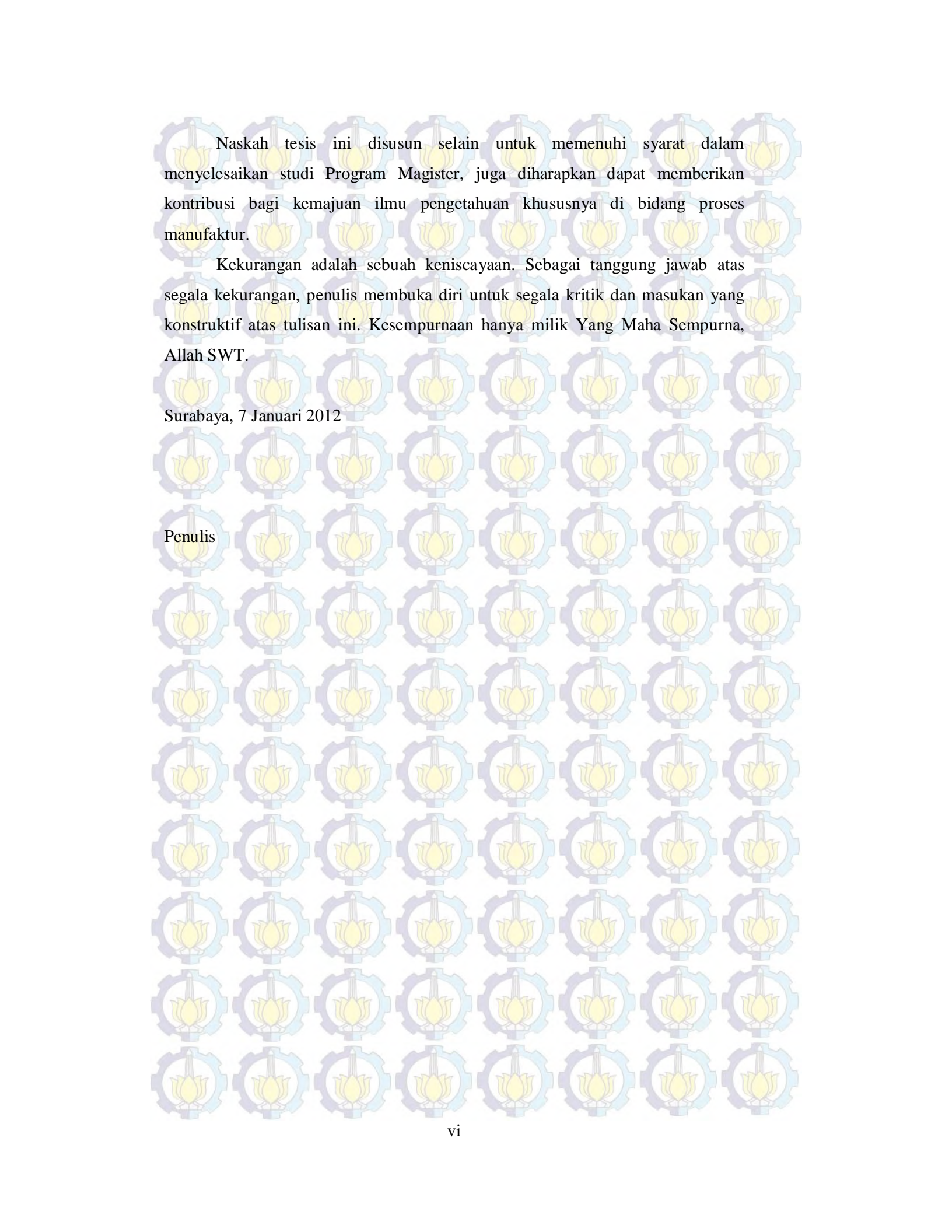
Rasa syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala nikmat dan pertolongan-Nya dalam menyelesaikan penyusunan tesis ini. Tesis dengan judul **“OPTIMASI KEKASARAN PERMUKAAN, TEBAL LAPISAN *RECAST*, LEBAR PEMOTONGAN DAN LAJU Pengerjaan BAHAN PADA *WIRE-EDM* MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI DAN LOGIKA *FUZZY*”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala dedikasinya yang telah membantu penyusunan tesis ini hingga selesai.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang sangat inspiratif, mencerahkan, sekaligus memaksa dan menantang penulis untuk keluar dari batasan pemikiran.
2. Bapak Dr.Ing. Ir. I Made Londen Batan, M.Eng, selaku Koordinator Program Magister Teknik Mesin atas segala perhatian dan motivasinya.
3. Bapak Bambang Pramujati, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. dan Bapak Dr. Sony Sunaryo, M.Si., Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc., yang telah bersedia menjadi dosen penguji demi kesempurnaan tesis ini.
4. Seluruh staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberi atmosfer kampus yang menyenangkan.
5. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS atas bantuan dan dukungannya selama studi.
6. Semua teman–teman Simanu angkatan tahun 2009 dan tahun 2010.
7. Teman-teman dosen PPNS ITS atas segala pengertian dan bantuannya
8. Teman-teman teknisi PPNS ITS atas segala bantuan dan dukungannya.
9. Bapak Priyo Budi Jatmiko staf Laboratorium Logam dan CNC BLKI Surabaya sebagai pendamping pengujian kekasaran permukaan.





Naskah tesis ini disusun selain untuk memenuhi syarat dalam menyelesaikan studi Program Magister, juga diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur.

Kekurangan adalah sebuah keniscayaan. Sebagai tanggung jawab atas segala kekurangan, penulis membuka diri untuk segala kritik dan masukan yang konstruktif atas tulisan ini. Kesempurnaan hanya milik Yang Maha Sempurna, Allah SWT.

Surabaya, 7 Januari 2012

Penulis



## LEMBAR PERSEMBAHAN



*Kupersembahkan Tesis ini untuk:*

*Istriku tercinta Nunung Sholichah,  
anak-anakku tersayang Mutiara Nadhifa Salsabila dan  
Fairus Bagastiar Athaila*



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur yang sangat pesat akhir-akhir ini membutuhkan penerapan teknologi optimasi dalam proses permesinan. Hal ini terkait dengan tingginya daya saing dan meningkatnya permintaan akan produksi yang berkualitas di pasar. Untuk menghasilkan produk yang berkualitas, industri pemanufaktur harus mengendalikan proses manufakturnya. Metode Taguchi adalah salah satu metode yang efektif untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*, tidak dengan melakukan inspeksi produk akhir pada tahap manufaktur. Produk yang diharapkan adalah produk yang memiliki variabilitas yang kecil, yang artinya produk tersebut berada dekat target yang diharapkan.

Pemotongan logam adalah salah satu proses manufaktur yang sangat penting dalam dunia industri. Studi tentang pemotongan logam berfokus pada *tool* yang digunakan, komposisi dan sifat mekanis benda kerja, serta semua parameter-parameter proses yang mempengaruhi efisiensi dan kualitas produk. Peningkatan efisiensi proses yang signifikan dapat diperoleh dengan mengoptimalkan parameter proses yang teridentifikasi dan menentukan daerah faktor kontrol proses kritis yang menghasilkan variasi produk atau respon dalam batas kriteria penerimaan yang memastikan biaya manufaktur lebih rendah (Montgomery, 1997).

*Electrical Discharge Machining* (EDM) merupakan salah satu proses pemesinan non-konvensional yang memanfaatkan energi termal berupa loncatan bunga api listrik antara benda kerja dan elektroda. Proses pemesinan EDM tidak dipengaruhi oleh sifat mekanik benda kerja, tetapi dipengaruhi oleh titik leburnya. Proses pemesinan EDM banyak digunakan ketika pembuatan benda kerja dengan proses pemesinan konvensional sulit dilakukan. Salah satu jenis EDM yang banyak digunakan untuk membuat benda kerja seperti pahat potong adalah *wire-EDM*. *Wire-EDM* menggunakan pahat kawat yang berbentuk silinder dengan diameter tertentu untuk membuat benda kerja.



Baja SKD-11 adalah baja yang biasa digunakan sebagai pahat atau alat potong dalam proses permesinan (*cutting tools*), *punch* dan *dies* karena sifatnya yang keras dan tahan terhadap panas. Karena digunakan untuk memotong atau membentuk sebuah produk, maka *cutting tools*, *punch* dan *dies* tersebut dituntut untuk memiliki permukaan yang halus dan kepresisian yang tinggi.

Penggunaan *wire-EDM* pada benda kerja SKD-11 adalah dalam pembuatan *punch dies*. Pada pengerjaan benda kerja ini hasil proses pemotongan yang dikehendaki adalah permukaan pemotongan yang halus. Hasil permukaan pemotongan yang halus pada pemotongan *wire-EDM* dapat diperoleh dengan menggunakan proses *skim cutting*. Namun, *skim cutting* merupakan proses yang harus dilakukan berulang-ulang untuk mendapatkan hasil yang diinginkan sehingga membutuhkan waktu yang lama. Selain dengan *skim cutting*, hasil permukaan pemotongan yang halus dapat diperoleh dengan penggunaan elektroda kawat dengan diameter yang lebih kecil. Tetapi penggunaan elektroda kawat yang lebih kecil seringkali dihindari. Di samping harga elektroda kawat dengan diameter kecil yang mahal dan tidak semua mesin *wire-EDM* mampu bekerja dengan elektroda kawat ini, penggunaan elektroda kawat ini juga menyebabkan kecepatan pemotongan yang terjadi menjadi lebih lambat. Hal ini tentunya mengakibatkan waktu pengerjaan yang lebih panjang dalam produksi. Hasil pemotongan yang halus juga dapat diperoleh dengan melakukan proses lanjutan pada mesin yang lain seperti *grinding*, *polishing* dan lainnya. Secara umum penggunaan beberapa cara dalam memperoleh hasil permukaan pemotongan yang halus seperti contoh di atas, membutuhkan waktu dan biaya tambahan untuk menyelesaikan proses produksi yang sebenarnya dapat dihindari.

Beberapa penelitian yang mengangkat masalah tentang pengaturan faktor pada proses pemesinan EDM telah dilakukan. Vaani dan Hameedullah (2005) melakukan penelitian dengan benda kerja *Hardened Tool Steel* (SKD-11) menggunakan kawat elektroda dari tembaga. Penelitian yang dilakukan menggunakan Pareto Anova dengan *noise* yang berupa temperatur dielektrik, konsentrasi dari partikel pada elektrolit, fluktuasi dari tegangan, atau permukaan dari elektroda. Hasilnya menyatakan bahwa seting parameter yang berupa arus, *on-time*, tekanan *flushing*, dan *voltase* akan mempengaruhi *material removal rate* dan kekasaran dari benda kerja.



Fong dan Chen (2006) melakukan penelitian tentang pengaturan faktor pada proses pemesinan EDM yang bertujuan untuk mengoptimalkan respon kepresisian dan akurasi secara serentak. Material yang digunakan adalah *Hardened Tool Steel (SKD-11)* dengan elektroda tembaga. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan metode taguchi dan logika *fuzzy*. Faktor yang dikontrol adalah: *open circuit voltage*, *pulse duration*, *duty cycle*, *pulsed peak current*, *powder concentration*, *regular distance for electrode lift*, *time interval for electrode lift* dan *powder size* yang masing-masing faktor menggunakan tiga level. Hasil eksperimen menunjukkan *factor pulse time*, *duty factor*, dan *peak current* memberikan kontribusi yang sangat signifikan sebesar 81,5% dalam mempengaruhi variasi respon.

Himawan (2008) meneliti tentang penentuan seting beberapa faktor pada *wire-EDM* untuk mengoptimasi lebar pemotongan, kekasaran permukaan, dan waktu pengerjaan material dengan menggunakan metode permukaan respon. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan rancangan percobaan *central composite design* pada baja SLD yang telah mengalami proses perlakuan panas. Variabel proses atau faktor yang digunakan adalah *on time*, *off time*, *servo reference voltage*, dan *servo speed* yang masing-masing menggunakan lima level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor yang digunakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Hasil penelitian juga menunjukkan adanya interaksi yang signifikan antara: *on time* dengan *off time*, *on time* dengan *servo reference voltage*, *on time* dengan *servo speed*, *off time* dengan *servo reference voltage*, *off time* dengan *servo speed*, dan *servo reference voltage* dengan *servo speed*.

Qibtiyah (2008) meneliti tentang penentuan seting beberapa faktor pada *wire-EDM* untuk mengoptimasi tebal lapisan *recast* dan waktu pengerjaan material, masing-masing faktor yang diteliti memiliki tiga level. Benda kerja dan elektroda yang digunakan adalah baja HSS dan kuningan. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *Box Behnken* dan optimasi dilakukan dengan menggunakan metode permukaan respon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *on time*, *off time*, *main power supply current*, *main power supply voltage* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati. Hasil penelitian juga menunjukkan adanya interaksi yang signifikan antara *on time* dengan *main power supply voltage* dan *main power supply current* dengan *main power supply voltage*.

Puri (2004) melakukan penelitian tentang seting beberapa faktor pada *wire-EDM* untuk mengoptimalkan kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan. Masing-



masing faktor yang diteliti memiliki dua level. Benda kerja dan elektroda yang dipakai adalah HCHC dan kuningan. Rancangan percobaan menggunakan *ortogonal array* dan optimasi *multi respon* menggunakan logika *fuzzy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor *gap voltage* dan *gap current* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati. Hasil penelitian juga menunjukkan kenaikan S/N rasio pada hasil eksperimen konfirmasi.

Lin (2001) melakukan penelitian tentang penentuan seting beberapa faktor pada *wire-EDM* untuk mengoptimalkan laju keausan pahat, laju pengerjaan material dan kekasaran permukaan, masing-masing faktor yang diteliti memiliki tiga level. Metode yang digunakan untuk mengoptimalkan respon yang diamati secara serentak menggunakan rancangan *orthogonal array* dan *grey relational analysis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor polaritas benda kerja dan *discharge current* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon yang diamati. Hasil eksperimen konfirmasi menunjukkan adanya peningkatan laju pengerjaan bahan, perbaikan kekasaran permukaan dan penurunan rasio laju keausan pahat.

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa pengaturan seting faktor sangat perlu dilakukan untuk mengoptimalkan respon yang diamati secara serentak. Maka, pada tesis ini dilakukan sebuah penelitian tentang penentuan seting faktor pada *wire-EDM* untuk mengoptimalkan semua respon yang dapat diamati secara serentak. Metode Taguchi dan Logika *Fuzzy* digunakan pada penelitian ini untuk menghasilkan desain proses yang *robust* terhadap faktor gangguan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah faktor-faktor seperti: *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow* memiliki kontribusi dalam mengurangi variasi dari respon tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan, dan laju pengerjaan bahan (*material removal rate*) secara serentak.
2. Bagaimana seting yang tepat dari faktor-faktor tersebut pada proses pemesinan *wire-EDM* sehingga dapat meminimumkan nilai tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan memaksimalkan *material removal rate*.



### 1.2.1 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dibutuhkan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas perubahan struktur mikro lapisan *recast* yang timbul pada permukaan benda kerja.
2. Tidak membahas tentang komponen biaya pada proses pemesinan.
3. Tidak membahas sistem elektronika, sistem kontrol, dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.
4. Kondisi pemotongan yang digunakan adalah pemotongan kasar (*roughing*).

### 1.2.2 Asumsi Penelitian

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

1. Faktor-faktor 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 bekerja dalam kondisi baik.
4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besar kontribusi dari faktor-faktor seperti: *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed*, dan *water flow* dalam mengurangi variasi dari respon tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan (*material removal rate*) secara serentak.
2. Menentukan kombinasi optimum dari faktor-faktor tersebut pada *wire*-EDM sehingga dapat meminimumkan nilai tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan memaksimalkan *material removal rate*.



#### 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyempurnakan penelitian-penelitian terdahulu yang mengangkat masalah tentang optimasi laju pengerjaan bahan, tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, dan kekasaran permukaan pada pembuatan benda kerja.
2. Menambah *database* tentang seting faktor pada proses pemesinan *wire*-EDM untuk mengoptimasikan laju pengerjaan bahan, tebal lapisan *recast*, lebar pemotongan, dan kekasaran permukaan pada pembuatan benda kerja.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Proses Pemesinan EDM

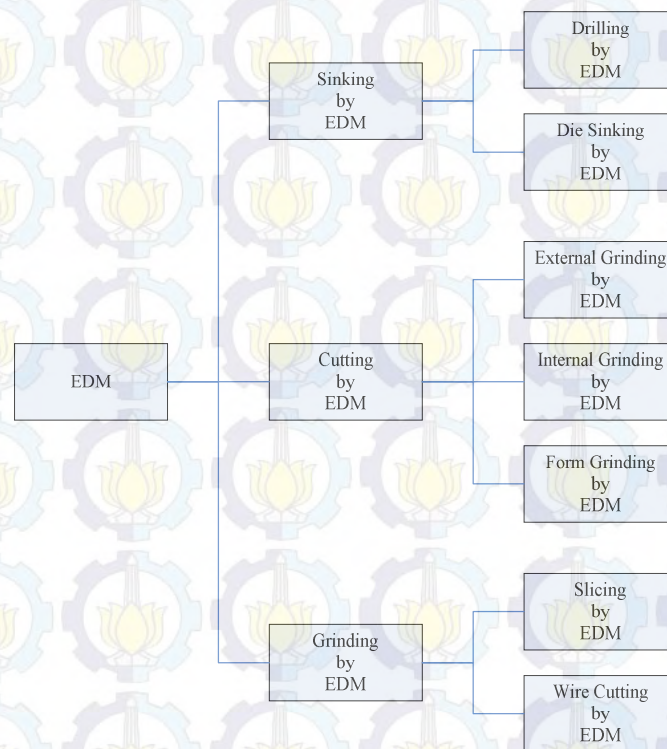
*Electrical Discharge Machining* (EDM) merupakan salah satu dari berbagai macam proses pemesinan non konvensional yang berbasis komputer sebagai pengendali utamanya. Proses pemesinan EDM banyak digunakan dalam industri pembuatan *dies* dan *mould* untuk menghasilkan spesifikasi dimensi, geometris, dan kualitas permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan proses pemesinan konvensional. Pandey dan Shan (1980) mendefinisikan proses pemesinan *Electrical Discharge Machining* (EDM) sebagai proses pengerjaan material dengan menggunakan loncatan bunga api listrik di antara dua elektroda, yaitu elektroda benda kerja dan elektroda pahat yang memanfaatkan aliran cairan dielektrik selama proses berlangsung. Proses pengerjaan material pada proses pemesinan EDM dilakukan dengan memanfaatkan energi termal. Proses pemesinan EDM memiliki banyak keunggulan, antara lain:

- a. Sifat fisis dan metalurgi seperti: kekuatan, ketangguhan, struktur mikro, dan lain-lain tidak mempengaruhi proses pemesinan sehingga proses pemesinan ini dapat diaplikasikan pada material yang konduktif.
- b. Tidak ada kontak fisik antara pahat dan benda kerja sehingga benda kerja tidak mengalami deformasi mekanik.
- c. Sebagian besar bagian benda kerja tidak mengalami pemanasan meskipun pengerjaan material dilakukan dengan memanfaatkan efek termal.
- d. Mampu mengerjakan bentuk-bentuk benda kerja yang kompleks dengan derajat kepresisian yang tinggi dan kualitas permukaan yang sangat tinggi.
- e. Mampu mengerjakan benda kerja yang sangat keras.
- f. Proses pemesinan ini memiliki laju produksi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan proses pemesinan konvensional.
- g. Distribusi kawah kecil yang dihasilkan tidak akan menurunkan kekuatan leleh benda kerja yang cukup besar.



h. Faktor operator dalam menghasilkan kualitas benda kerja dapat diabaikan karena proses ini dijalankan secara otomatis.

Proses pemesinan EDM dibagi menjadi beberapa jenis seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.1 berikut ini (Pandey dan Shan, 1980):



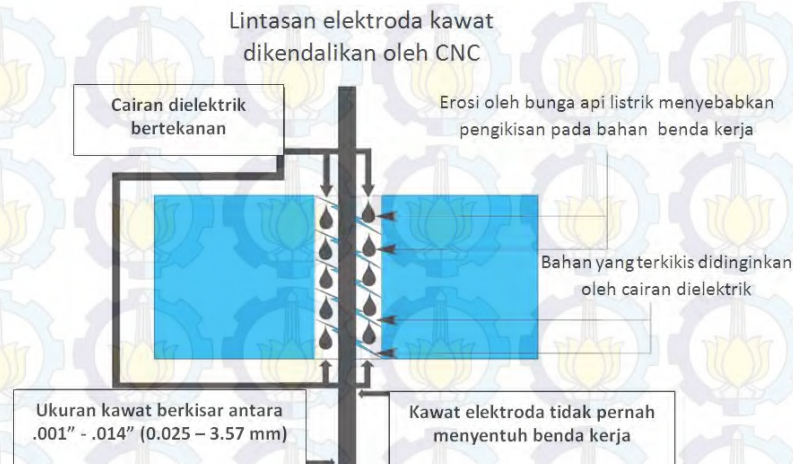
Gambar 2.1 Klasifikasi proses pemesinan EDM

## 2.2 Prinsip Dasar Wire-EDM

Somer dan Somer (2005) menjelaskan bahwa proses pemesinan *wire*-EDM dimulai dengan menghubungkan catu daya pada elektroda kawat yang memiliki diameter tertentu dengan benda kerja yang berada pada cairan dielektrik. Elektroda yang berupa kawat dan benda kerja dihubungkan pada kutub yang berlawanan. Pada umumnya elektroda kawat dihubungkan pada kutub negatif dan benda kerja dihubungkan pada kutub positif. Pada *wire*-EDM, proses pengerjaan material dilakukan oleh sejumlah loncatan bunga api listrik yang terjadi di antara celah benda kerja dan elektroda. Bunga api listrik akan meloncat dari elektroda kawat yang merupakan kutub negatif menuju benda kerja yang merupakan kutub positif. Bunga api listrik tersebut tidak terjadi secara



kontinu, tetapi periodik terhadap waktu. Prinsip dasar *wire*-EDM ditunjukkan oleh Gambar 2.2 (Somer dan Somer, 2005).



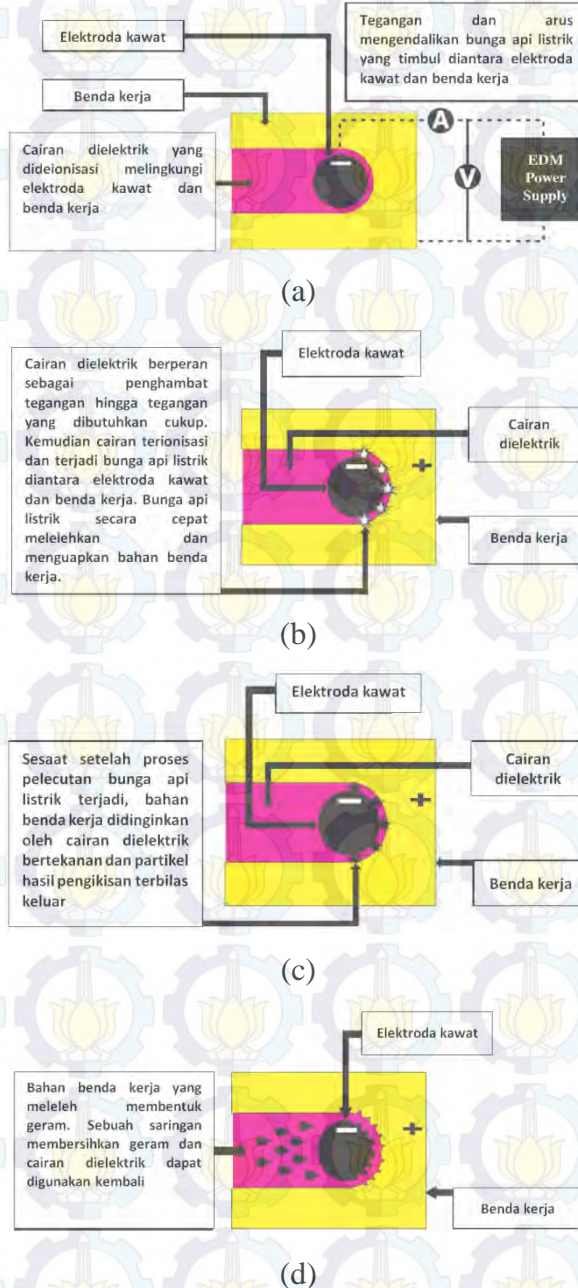
Gambar 2.2 Prinsip dasar *wire*-EDM

### 2.2.1 Mekanisme Pengerjaan Material

Setiap loncatan bunga api listrik yang memiliki energi tinggi akan menumbuk benda kerja (Bagiasna, 1979). Hal ini akan menyebabkan terjadi perubahan energi listrik menjadi energi panas sehingga permukaan benda kerja maupun elektroda akan mengalami kenaikan suhu sekitar delapan ribu hingga dua belas ribu derajat celsius. Suhu tersebut cukup untuk membuat benda kerja dan elektroda meleleh dan mengakibatkan terjadinya penguapan. Hal ini akan menimbulkan gelembung udara yang akan terus mengembang sesuai dengan kenaikan suhu yang terjadi. Pelelehan dan penguapan yang terjadi pada benda kerja jauh lebih tinggi daripada pelelehan dan penguapan yang terjadi pada elektroda. Setelah terjadi loncatan bunga api listrik, aliran listrik akan berhenti sesaat memasuki *off time*. Hal ini akan menyebabkan perubahan temperatur yang mendadak karena adanya cairan dielektrik sehingga lelehan benda kerja dan elektroda akan membeku dengan cepat. Selain itu, gelembung gas akan meledak dan terpecah keluar sehingga meninggalkan kawah-kawah halus pada permukaan material. Hasil pembekuan tersebutlah yang akan dibawa keluar oleh cairan dielektrik.

Somer dan Somer (2005) memberikan penjelasan secara sederhana mengenai urutan proses pengerjaan material pada *wire*-EDM yang diilustrasikan oleh Gambar 2.3 sebagai berikut.





Gambar 2.3 Pengerjaan material pada *wire*-EDM: a. Pembangkitan tegangan dan arus listrik oleh catu daya, b. Pengikisan material oleh bunga api listrik saat *on time*, c. Proses pengikisan material yang berhenti saat *off time*, d. Pembilasan geram oleh cairan dielektrik

## 2.2.2 Faktor-faktor pada *Wire*-EDM

Faktor-faktor pada proses pemesinan *wire*-EDM menurut *Instruction Manual Book Wirecut EDM CHMER CW32F* adalah sebagai berikut:



1. *Open voltage (OV)*

*Open voltage* adalah faktor yang mengatur perbedaan tegangan antara benda kerja dan kawat elektroda selama proses pemesinan.

2. *Low power (LP)*

*Low power* adalah faktor yang mengatur jenis sumber energi pemotongan (AC atau DC) dan besarnya energi tersebut.

3. *On time (ON)* dan *off time (OFF)*

Loncatan bunga api listrik harus terjadi selama *on time* dan harus berhenti selama *off time* secara bergantian pada saat proses pemesinan *wire*-EDM berlangsung. Pada saat *on time*, timbul tegangan listrik pada celah antara benda kerja dan kawat elektroda kemudian menghilang saat *off time*. Oleh karena itu, proses hanya terjadi saat *on time* saja.

4. *Arc on time (AN)*

*Arc on time* adalah faktor yang mengatur besarnya arus tambahan.

5. *Arc off time (AFF)*

*Arc off time* adalah faktor yang mengatur frekuensi arus tambahan tersebut.

6. *Servo voltage (SV)*

*Servo voltage* adalah tegangan yang diberikan untuk menghindari hubungan singkat yang mungkin terjadi dengan mengatur jarak antara kawat elektroda dan benda kerja.

7. *Feedrate override (FR)*

*Feedrate override* adalah faktor yang digunakan untuk menyesuaikan kecepatan pemakanan yang digunakan.

8. *Wire feed (WF)*

*Wire feed* adalah faktor yang digunakan untuk mengatur kecepatan pemakanan kawat elektroda.

9. *Wire tension (WT)*

*Wire tension* adalah faktor yang digunakan untuk mengatur ketegangan kawat elektroda.

10. *Water flow (WL)*

*Water flow* adalah faktor yang digunakan untuk mengatur tekanan *flushing* dari *upper* dan *lower nozzle*.



#### 11. *Feedrate mode* (FM) dan *feedrate* (F)

*Feedrate mode* adalah faktor yang digunakan untuk memilih kecepatan pemakanan servo atau kecepatan pemakanan konstan sedangkan *feedrate* adalah faktor yang digunakan untuk menentukan kecepatan pemakanan yang konstan.

#### 2.2.3 Pembilasan Geram (*Flushing*)

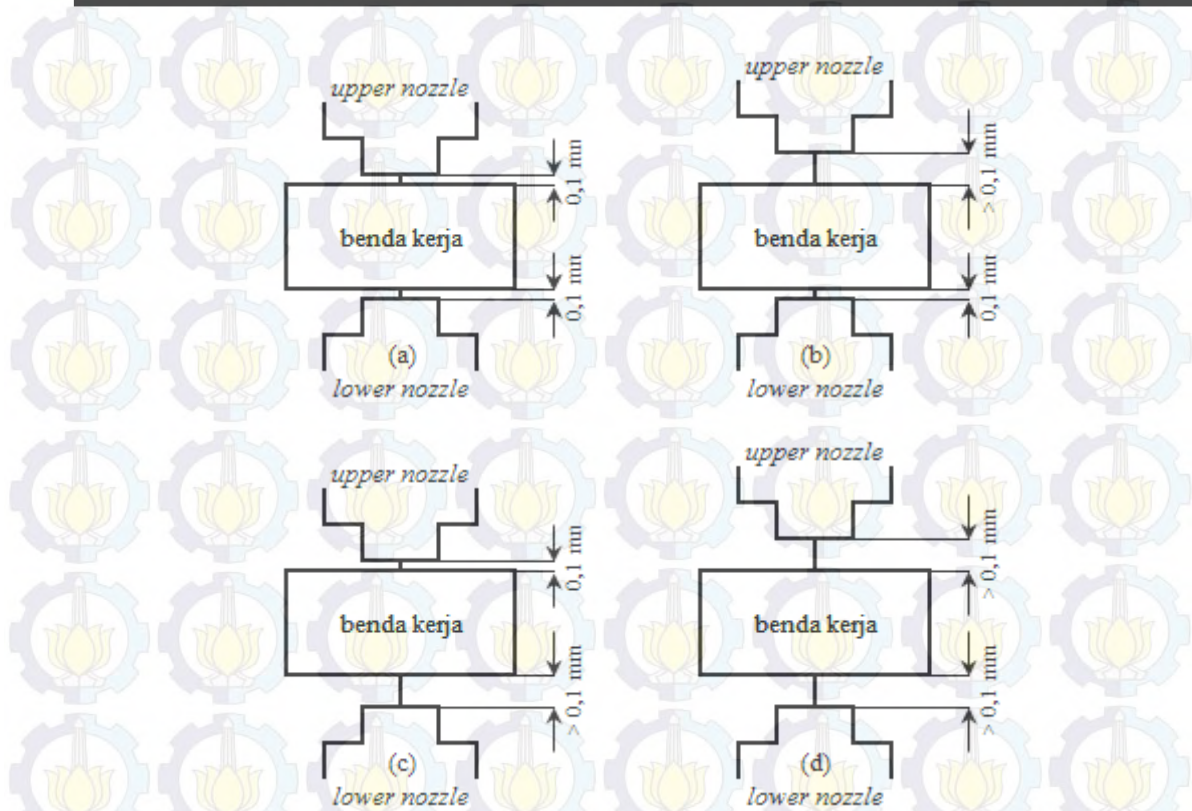
Somer dan Somer (2005) menyatakan bahwa proses pembilasan geram (*flushing*) adalah proses pembuangan geram yang dihasilkan saat proses pemesinan pada *wire-EDM*. Cairan dielektrik yang mengalir di antara celah benda kerja dan elektroda berfungsi sebagai pembilas. Pembilasan geram yang tidak sempurna akan menyebabkan penimbunan geram yang dihasilkan. Penimbunan geram tersebut akan menyebabkan loncatan bunga api menjadi tidak teratur sehingga merusak benda kerja dan elektroda. Selain itu, penimbunan geram juga akan menyebabkan hubungan singkat antara benda kerja dan elektroda.

Ada empat tipe metode *flushing* yang dikenal, yaitu:

1. *close contact machining*
2. *one side (upper) open clearance machining*
3. *one side (bottom) open clearance machining*
4. *open contact machining*.

Ilustrasi tentang keempat tipe metode *flushing* tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.4 (Somer dan Somer, 2005).





Gambar 2.4 Metode *flushing*: a. *close contact machining*, b. *one side (upper) open clearance machining*, c. *one side (bottom) open clearance machining*, d. *open contact machining*

Dengan menggunakan metode *flushing* tipe *open contact machining* dapat diperoleh hasil pemotongan yang presisi dan permukaan benda kerja yang halus Metode ini dapat menghasilkan kekasaran permukaan aritmatika hingga  $0,32 \mu\text{m}$ . Akan tetapi, metode ini tidak dianjurkan untuk memotong material yang memiliki ketebalan melebihi 70 mm (Sommer dan Sommer, 2005).

#### 2.2.4 Tipe Elektroda Kawat

Saat ini banyak tipe elektroda kawat digunakan pada proses pemesinan *wire-EDM*. Pemilihan tipe elektroda kawat yang dipakai harus disesuaikan dengan kondisi pemotongan dan benda kerja tertentu. Klasifikasi tipe elektroda kawat dengan karakter spesifik tertentu adalah sebagai berikut (Guitrau, (1997):

1. Elektroda kawat tembaga

Elektroda kawat ini terbuat dari tembaga murni dan digunakan dalam tahap awal pada proses EDM. Elektroda ini banyak memiliki kekurangan. Kekurangan-kekurangan tersebut antara lain:



- Kekuatan tarik rendah, tingkat elongasi tinggi, dan tingkat kerusakan yang berlebihan.
- Kondisi flushing kurang baik akibat penguapan temperatur tinggi.
- Kecepatan pemrosesan lambat karena konduktivitas yang tinggi.
- Pencairan lambat dan efisiensi rendah karena panas yang diserap oleh kawat bukan pekerjaan sepotong.

## 2. Elektroda kawat kuningan

Elektroda ini banyak memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan elektroda tembaga. Kelebihan elektroda kawat kuningan dibandingkan elektroda kawat tembaga antara lain:

- Mempunyai rasio campuran antara tembaga dan seng diantara 65/35 – 63/37.
- Memiliki kekuatan tarik yang tinggi dibandingkan dengan kawat tembaga, berkisar diantara 50,000 - 145,000 psi.
- *Flushing* dapat berjalan dengan sempurna karena rendahnya suhu penguapan.
- Kawat yang mengandung sejumlah aluminium atau titanium memiliki kekuatan tarik tinggi, tetapi efisiensi pembilasannya memburuk.

## 3. Elektroda kawat khusus dan berpelapis

Banyak kawat elektroda khusus yang digunakan untuk mengerjakan benda kerja dengan karakteristik tertentu. Kawat elektroda tersebut antara lain:

### a. *Coated copper core wire*

Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan dengan kecepatan pemotongan yang tinggi dan benda kerja yang tebal. Akan tetapi, kekasaran permukaan yang dihasilkan oleh kawat elektroda ini cukup besar.

### b. *Coated brass core wire*

Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan berbagai jenis material, termasuk karbida.

### c. *Molybdenum wire*

Kawat elektroda ini cocok untuk untuk proses pemesinan yang membutuhkan kepresisian yang tinggi karena tersedia dalam diameter yang sangat kecil. Akan tetapi, harga dari kawat elektroda ini sangat mahal.

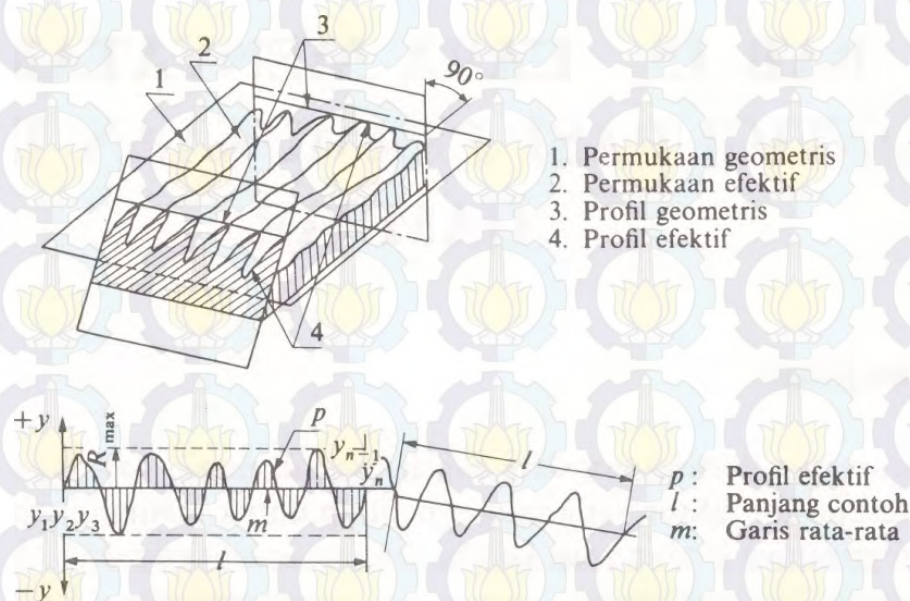


### 2.3 Kekasaran Permukaan

Permukaan didefinisikan sebagai batas yang memisahkan benda padat dengan lingkungan sekelilingnya. Karakteristik suatu permukaan memegang peranan penting dalam menentukan kualitas benda kerja. Sato dan Sugiarto (1994) mendefinisikan kekasaran permukaan sebagai penyimpangan rata-rata aritmatika dari garis rata-rata profil. ISO 1302-1978 menggunakan definisi ini untuk menetapkan harga-harga kekasaran permukaan. Juhana dan Suratman (2000) mendefinisikan tiga macam kekasaran permukaan sebagai berikut:

#### 1. Penyimpangan rata-rata aritmatika ( $R_a$ )

Penyimpangan rata-rata aritmatika ( $R_a$ ) adalah nilai rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penyimpangan rata-rata aritmatika



Harga  $R_a$  ditentukan dari nilai-nilai ordinat ( $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ ) yang dijumlahkan tanpa memperhitungkan tandanya. Secara umum  $R_a$  dirumuskan:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.1)$$

Harga  $R_a$  tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.2)$$

atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.3)$$

dengan:

$R_a$  = nilai kekasaran aritmatika

$y_n$  = tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba

$n$  = frekuensi pengukuran

$l$  = panjang sampel yang telah ditentukan, yaitu panjang dari profil efektif yang diperlukan untuk menentukan kekasaran permukaan dari permukaan yang diteliti.

Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1 (Rochim, 2001).

Tabel 2.1 Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran

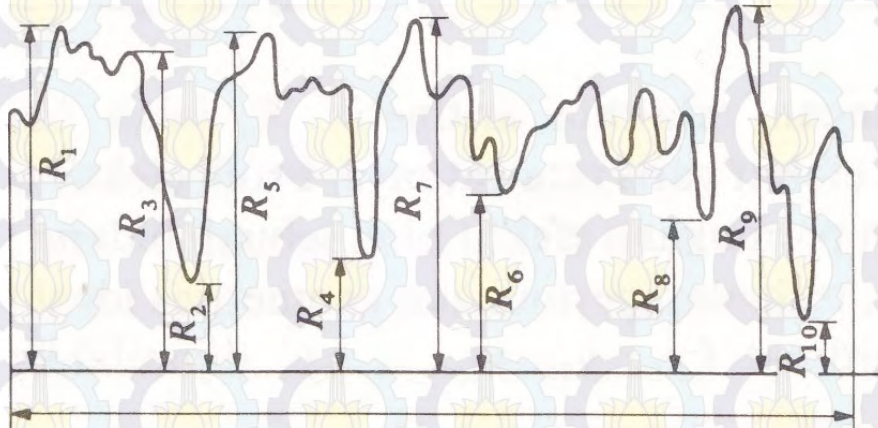
Kekasaran, $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Tingkat kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Sumber: Rochim (2001)



## 2. Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik ( $R_z$ )

Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik ( $R_z$ ) adalah jarak rata-rata antara lima puncak tertinggi dan lima lembah terdalam antara panjang sampel yang diukur dari garis yang sejajar dengan garis rata-rata dan tidak memotong profil tersebut seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik

Berdasarkan Gambar 2.6, harga  $R_z$  dirumuskan sebagai berikut:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \quad (2.4)$$

dimana:

$R_z$  = nilai kekasaran total rata-rata

## 3. Ketidakrataan ketinggian maksimum ( $R_{max}$ )

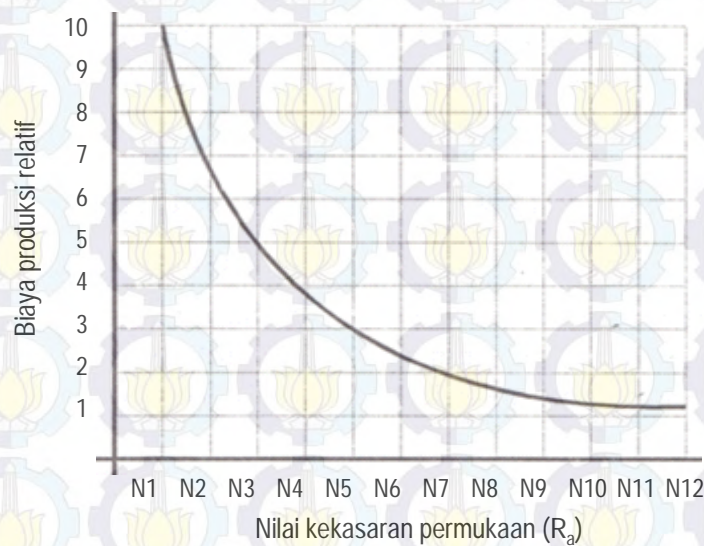
Ketidakrataan ketinggian maksimum ( $R_{max}$ ) adalah jarak antara dua garis sejajar dengan garis rata-rata dan menyinggung profil pada titik tertinggi dan titik terendah dalam panjang sampel seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7.





Gambar 2.7 Ketidakrataan ketinggian maksimum

Nilai kekasaran permukaan benda kerja ditentukan menurut fungsinya. Pencapaian nilai kekasaran permukaan tertentu tergantung oleh kemampuan proses pengerjaan manual atau pemesinan di tempat produksi. Semakin halus suatu permukaan benda kerja akan membuat biaya pengerjaan yang semakin mahal. Gambar 2.8 menunjukkan hubungan antara nilai kekasaran permukaan dengan biaya produksi relatif (Rochim, 2001).

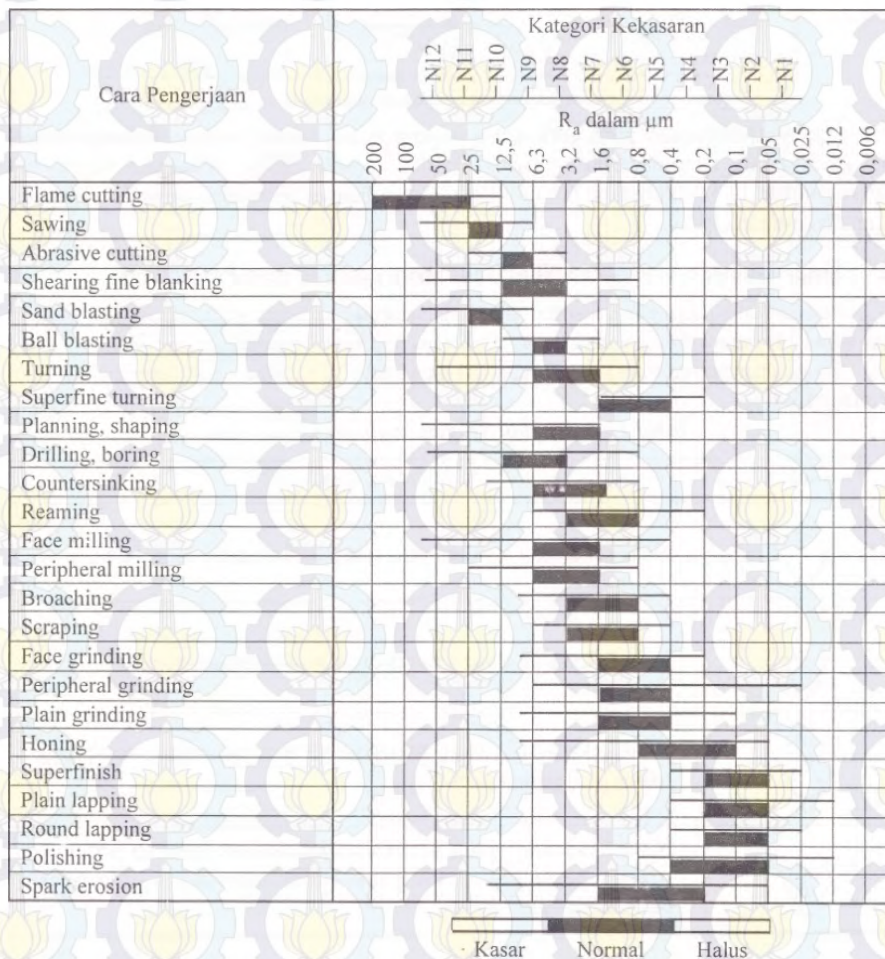


Gambar 2.8 Grafik hubungan tingkat kekasaran dengan biaya pengerjaan

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.2 (Rochim, 2001).



Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan



Sumber: Rochim (2001)

Keterangan:

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.

Panjang sampel yang digunakan untuk mengukur nilai kekasaran permukaan  $R_z$  dan  $R_{max}$  adalah 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8; 25 milimeter yang secara rinci ditunjukkan oleh tabel 2.3 sesuai dengan standar JIS 0601 (Juhana dan Suratman, 2000). Harga ini merupakan harga bulat yang diutamakan. Dalam hal pengukuran  $R_a$ , panjang sampel diambil tiga kali atau lebih dari harga bulat tersebut. Harga bulat standar adalah 0,8 mm.



Tabel 2.3 Hubungan antara panjang sampel dan kekasaran permukaan

$R_z$ atau $R_{max}$		L (mm)
	<0,8	0,25
0,8<	<0,63	0,8
6,3<	<25	2,5
25<	<100	8

Sumber: Juhana dan Suratman (2000)

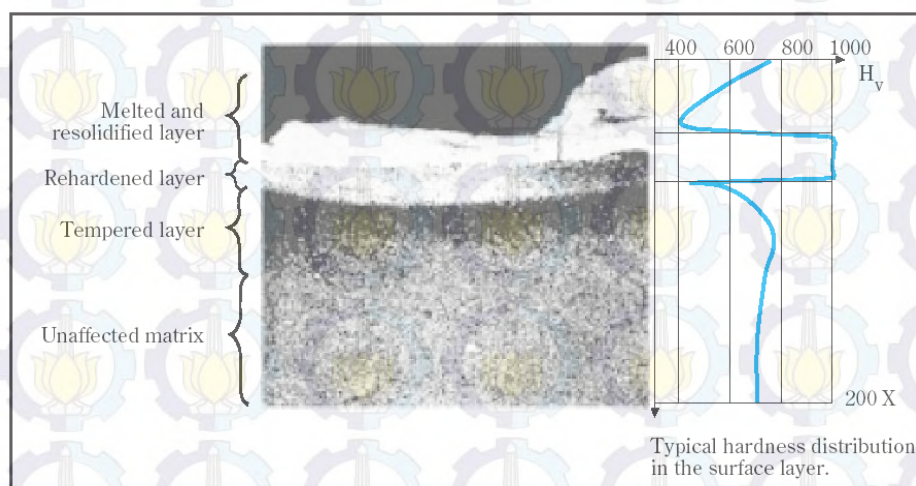
Tiga parameter permukaan di atas, yang paling sering digunakan untuk mengidentifikasi kekasaran permukaan adalah  $R_a$  (Rochim, 2001). Penggunaan parameter  $R_a$  sebenarnya tidak mempunyai dasar yang kuat untuk mengidentifikasi ketidakaturan konfigurasi permukaan karena beberapa profil permukaan dapat menghasilkan nilai  $R_a$  yang hampir sama. Akan tetapi, parameter  $R_a$  cocok digunakan untuk memeriksa kualitas permukaan akhir benda kerja yang dihasilkan dalam jumlah banyak. Parameter  $R_a$  lebih peka terhadap penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan bila dibandingkan dengan parameter-parameter kekasaran permukaan yang lain. Dengan demikian pencegahan akan dapat dilakukan jika muncul tanda-tanda penambahan angka kekasaran permukaan benda kerja.

## 2.4 Lapisan *Recast*

Permukaan benda kerja hasil pengerjaan dengan proses pemesinan *wire*-EDM akan mengalami perubahan baik di permukaan benda kerja atau di sub-permukaan. Perubahan tersebut memberikan penampilan adanya lapisan yang memiliki karakteristik berbeda. Guitrau (1997) mendefinisikan lapisan *recast* sebagai lapisan putih pada permukaan benda kerja yang terbentuk akibat pengaruh panas yang ditimbulkan oleh loncatan bunga api listrik. Lapisan *recast* merupakan bagian benda kerja (material induk) yang ikut meleleh kemudian membeku kembali dan membentuk lapisan baru pada permukaan benda kerja. Terbentuknya lapisan *recast* tidak mungkin dihilangkan dalam proses pemesinan *wire*-EDM, sehingga pengaturan faktor-faktor yang ada hanya dapat meminimumkan ketebalan lapisan *recast* yang terbentuk.



Benda kerja yang mengalami proses pemesinan dengan *wire*-EDM memiliki kekerasan yang tidak lagi homogen. Hal ini terjadi karena pada benda kerja terbentuk tiga lapisan baru dengan karakteristik yang berbeda-beda. Ketiga lapisan ini adalah lapisan *recast*, *heat affected zone*, dan material induk. Kedua lapisan teratas, yaitu lapisan *recast* dan *heat affected zone*, 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. Sifat getas pada pahat potong dapat menyebabkan pahat potong menjadi cepat aus dan rusak, bahkan dapat menimbulkan retak (*crack*). Ketidakhomogenan kekerasan pada benda kerja hasil proses pemesinan dengan *wire*-EDM ditunjukkan oleh Gambar 2.9 (Uddeholm, 2007).



Gambar 2.9 Kekerasan masing-masing lapisan pada benda kerja hasil *wire*-EDM

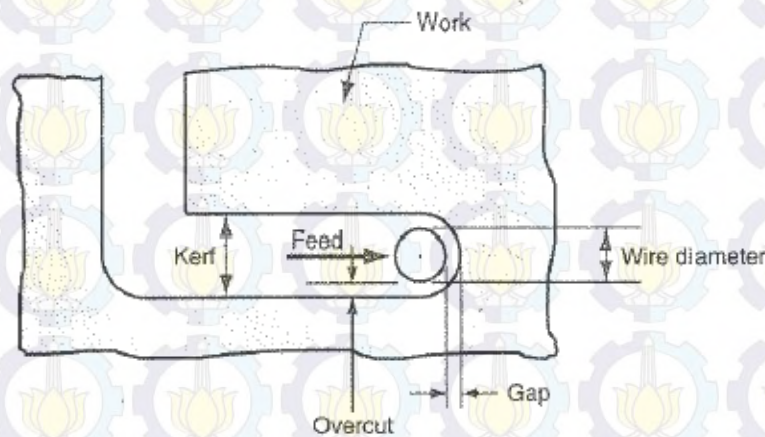
Lapisan *recast* juga merupakan bagian dari *heat affected zone*. Untuk meminimalkan tebal lapisan *recast* harus digunakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi *heat affected zone*. Somer dan Somer (2005) menyatakan bahwa kedalaman *heat affected zone* dan lapisan *recast* dipengaruhi oleh arus, jenis *power supply*, dan jumlah *skim cutting*. Jenis *power supply* yang dapat meminimumkan *heat affected zone* adalah DC *power supply*. Ketebalan lapisan *recast* menurut Yan (2007) berdasarkan hasil penelitiannya adalah 1 - 3  $\mu\text{m}$  untuk material SKD11 dengan proses *wire*-EDM. Walaupun faktor-faktor yang digunakan untuk meminimumkan ketebalan lapisan *recast* adalah faktor-faktor yang mempengaruhi *heat affected zone*, 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.

## 2.5 Lebar Pemotongan (*kerf*).

Benda kerja dan elektrode kawat merupakan kutub positif dan kutub negatif dari rangkaian listrik DC dan dipisahkan oleh celah yang dikontrol terus-menerus dengan sebuah mesin (Othman, 2008). Celah tersebut diisi oleh cairan dielektrik yang berfungsi sebagai isolator, pendingin, dan pembilas yang bertugas untuk menghilangkan partikel-partikel yang terkikis di daerah pemotongan. Uraian di atas diilustrasikan pada Gambar 2.10 berikut (Othman, 2008):



Gambar 2.10 Definisi *kerf* dan *overcut* pada *wire*-EDM.

Celah yang dihasilkan dari proses pemotongan tersebut sangat penting pada proses pemesinan *wire*-EDM. Ukuran celah atau lebar pemotongan diatur oleh sistem kontrol *servo* dengan sensor lebar celah sebagai pengendali. Lebar celah yang dihasilkan lebih besar dari diameter elektrode kawat yang digunakan sesuai dengan Gambar 2.10. Kelebihan pemotongan berkisar antara 0,020-0,050 mm, umumnya adalah 0,03 mm (Groover, 2002).

## 2.6 Material Removal Rate

Laju pengerjaan material (*Material Removal Rate*) dalam proses *wire*-EDM pada dasarnya merupakan fungsi dari arus listrik yang digunakan dan bahan titik lebur dari



benda kerja. Perhitungan MRR dalam proses *wire-EDM* secara umum dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$MRR = V_c \times b \times h \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (2.5)$$

dimana:

$V_c$  = kecepatan potong (mm/mim)

$h$  = tinggi benda kerja (mm)

$b$  = lebar pemotongan (mm)

Lebar pemotongan ( $b$ ) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$b = 2W_g + d \quad (2.6)$$

dengan:

$W_g$  = *spark gap* (mm)

$d$  = diameter kawat (mm)

## 2.7 Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taghuci (1940) yang merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan *resources* seminimal mungkin. Soejanto (2009) lebih lanjut menambahkan bahwa metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti: material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional. Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat *robust* terhadap faktor-faktor gangguan tersebut. Oleh karena itu metode Taguchi juga disebut *robust design*.

Metode Taguchi memperkenalkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu produk dan proses yang *robust* terhadap kondisi lingkungan, mengembangkan kualitas produk yang *robust* terhadap variasi komponen, dan meminimalkan variasi di sekitar target. Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.



2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks. Metode ini juga memiliki rancangan yang mengorbankan pengaruh interaksi yang cukup signifikan. Untuk mengatasi hal tersebut, pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, faktor dan level faktor dibuat bervariasi kemudian hasil dari kombinasi pengujian tertentu diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh dan tindakan yang dapat membuat perbaikan lebih lanjut.

### 2.7.1 Prosedur Eksperimen

Secara umum, desain eksperimen Taguchi dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan eksperimen. Ketiga tahap tersebut adalah sebagai berikut.

#### 1. Tahap perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. 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.

##### a. Perumusan masalah

Rumusan masalah harus didefinisikan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.



b. Penentuan tujuan eksperimen

Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan.

c. Penentuan respon

Respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain. Dalam desain eksperimen Taguchi, respon adalah karakteristik kualitas yang terdiri dari tiga kategori, yaitu:

- 1) Karakteristik yang dapat diukur, yaitu semua hasil akhir yang dapat diukur dengan skala kontinu. Contoh dari karakteristik ini adalah temperatur, berat, tekanan, dan lain-lain.
- 2) Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinu, tetapi dapat diklasifikasikan secara berkelompok. Contoh dari karakteristik ini adalah retak, jelek, baik, dan lain-lain.
- 3) Karakteristik dinamik, yaitu fungsi representasi dari proses yang diamati. Proses yang diamati digambarkan sebagai sinyal dan keluaran digambarkan sebagai hasil dari sinyal. Contoh karakteristik ini adalah sistem transmisi otomatis dengan putaran mesin sebagai masukan dan perubahan getaran sebagai keluaran.

d. Pengidentifikasi faktor

Faktor adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan faktor kontrol dan faktor gangguan

Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

f. Penentuan jumlah dan nilai level faktor

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



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

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 faktor dan level ( $v_{fl}$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level faktor} - 1 \quad (2.8)$$

h. Pemilihan matriks ortogonal

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

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

dimana:

L = rancangan bujursangkar latin.

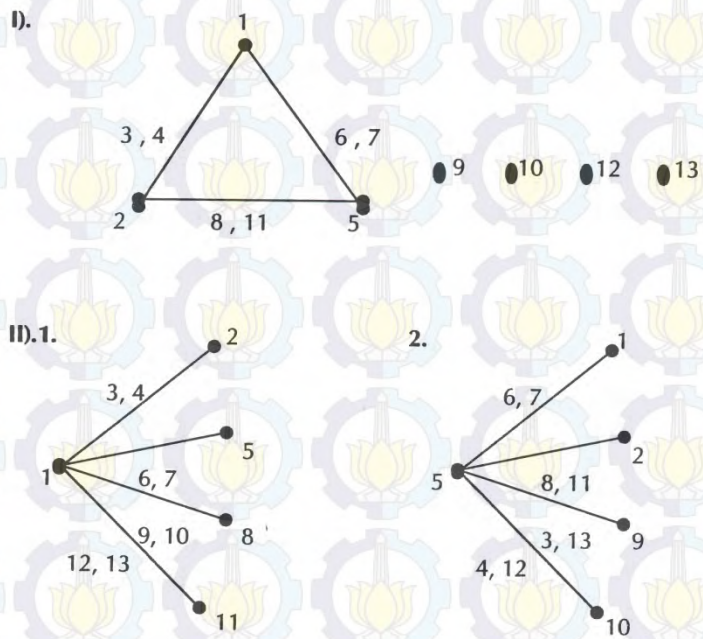
a = banyaknya eksperimen.

b = banyaknya level faktor.

c = banyaknya faktor.

Matriks ortogonal ditentukan dengan berpedoman pada grafik linier standar dari matriks ortogonal yang dipilih (Soejanto, 2009). Misalnya, grafik linier dan matriks ortogonal standar untuk  $L_{27}(3^{22})$  adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12 berikut:





Gambar 2.11 Grafik linier dan matriks standar untuk  $L_{27}(3^{13})$

Experiment number	Column number																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	0	0	0
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	0	0	0	2	2	2
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	2	0	1	2	0	1
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	2	0	1	2	0	1	1	2	0
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	0	1	2	1	2	0
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	0	1	2	0	1	2	0	1	2
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	1	2	0	1	2	0	2	0	1
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	1	2	0	0	1	2
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	1	0	2	2	1	0	0	2	1
22	2	1	0	2	0	0	2	1	0	2	2	1	0	2	1	0	0	2	1	2	1	0
23	2	1	0	2	1	1	0	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	0	2	1
24	2	2	0	2	2	2	1	0	2	1	1	0	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	0	2	1	2	0	2	1	0	2
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	0	2	1	2	1	0	2	1	0
Group	1	2	3										Mixed									

Gambar 2.12 Matriks ortogonal standar untuk  $L_{27}(3^{22})$



## 2. Tahap pelaksanaan

Tahap pelaksanaan meliputi penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

### a. Jumlah replikasi

Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi. Replikasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- 1) Menambah ketelitian data hasil eksperimen.
- 2) Mengurangi tingkat kesalahan pada eksperimen.
- 3) Memperoleh harga taksiran dari kesalahan sebuah eksperimen sehingga memungkinkan diadakan uji signifikansi hasil eksperimen.

### b. Randomisasi

Dalam sebuah eksperimen, ada pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan, seperti: kelelahan operator, fluktuasi daya mesin, dan lain-lain. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Secara umum, randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- 1) Menyebarkan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen.
- 2) Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.
- 3) Mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain.

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, juga dilakukan perhitungan dan pengujian data statistik pada data hasil eksperimen.

### a. Analisis variansi



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 faktor. 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 faktor 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 2.4

Tabel 2.4 Tabel analisis variansi

Sumber variasi	db	SS	MS	$F_{hitung}$
Faktor A	$\nu_A$	$SS_A$	$MS_A$	$F_A$
Faktor B	$\nu_B$	$SS_B$	$MS_B$	$F_B$
Faktor AB	$\nu_{AB}$	$SS_{AB}$	$MS_{AB}$	$F_{AB}$
Faktor C	$\nu_C$	$SS_C$	$MS_C$	$F_C$
Faktor AC	$\nu_{AC}$	$SS_{AC}$	$MS_{AC}$	$F_{AC}$
Faktor D	$\nu_D$	$SS_D$	$MS_D$	$F_D$
Error	$\nu_{error}$	$SS_{error}$	$MS_{error}$	
Total	$\nu_T$	$SS_T$		

Sumber: Hasil olahan komputer

Dimana:

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

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

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



$$\begin{aligned} \nu_{AB} &= \text{derajat bebas interaksi faktor A dan B.} \\ &= k_{AB} - 1 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \nu_{\text{error}} &= \text{derajat bebas error.} \\ &= \nu_T - \nu_A - \nu_B - \nu_C - \nu_D - \nu_E - \nu_F \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{jumlah keseluruhan.} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{faktor koreksi.} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{jumlah kuadrat total.} \\ &= \sum_{i=1}^N Y_i - CF \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{jumlah kuadrat faktor A.} \\ &= \left[ \sum_{i=1}^{k_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} SS_B &= \text{jumlah kuadrat faktor B.} \\ &= \left[ \sum_{i=1}^{k_B} \left( \frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \text{jumlah kuadrat interaksi faktor A dan B.} \\ &= \left[ \sum_{i=1}^{k_C} \left( \frac{AB_i^2}{n_{C_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} SS_E &= \text{jumlah kuadrat error.} \\ &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_E - SS_F \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} MS_A &= \text{kuadrat tengah faktor A.} \\ &= SS_A / \nu_A \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} MS_B &= \text{kuadrat tengah faktor B.} \\ &= SS_B / \nu_B \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} MS_{AB} &= \text{kuadrat tengah interaksi faktor A dan B.} \\ &= SS_C / \nu_C \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$MS_E = \text{kuadrat tengah error.}$$



$$= SS_E / \nu_E \quad (2.25)$$

$k_A$  = 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

Hasil analisis variansi tidak membuktikan adanya perbedaan pengaruh faktor dalam eksperimen. Pembuktian ini dilakukan melalui uji distribusi F. Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan variansi *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan. 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. Respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.26)$$

dengan:  $i = 1, \dots, 27$ ;  $j = 1, \dots, 4$ ;  $k = 1, \dots, 3$

Maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah

Untuk taraf faktor A  $\rightarrow H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_k = 0$

$H_1$  : salah satu  $\tau$  tidak sama dengan 0

Untuk taraf faktor B  $\rightarrow H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_k = 0$

$H_1$  : salah satu  $\beta$  tidak sama dengan 0

Untuk interaksi A dan B  $\rightarrow H_0 : \tau_i \beta_j = 0$

$H_1$  : ada satu nilai  $\tau_i \beta_j$  yang tidak sama dengan 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  $H_0$  didasarkan pada nilai  $F_{hitung}$  yang dirumuskan sebagai berikut.

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

$$\text{Untuk taraf faktor B} \quad \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.28)$$

$$\text{Untuk interaksi A dan B} \quad \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_{AB}}{MS_E} \quad (2.29)$$

Penerimaan  $H_0$  pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi sebagai berikut.

$$\text{Untuk taraf faktor A} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.30)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.31)$$

$$\text{Untuk interaksi A dan B} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_{AB}, v_E} \quad (2.32)$$

Bila menggunakan *software Minitab 16*, kegagalan menolak  $H_0$  dilakukan jika *p-value* lebih besar daripada  $\alpha$  (taraf signifikansi). Kegagalan menolak  $H_0$  juga dilakukan apabila nilai  $F_{hitung}$  lebih besar dari dua (Park, 1996).

### c. Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu:

#### 1) Semakin kecil semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non-negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.



$$S/N = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.33)$$

2) Tertuju pada nilai tertentu

Adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$S/N = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.34)$$

3) Semakin besar semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non-negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$S/N = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.35)$$

## 2.7.2 Interpretasi Hasil Eksperimen

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

### 1. Persen kontribusi

Persen kontribusi merupakan porsi masing-masing faktor dan/atau interaksi faktor yang signifikan terhadap total variansi yang diamati. Persen kontribusi merupakan fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing faktor yang signifikan. Persen kontribusi menunjukkan kekuatan relatif dari suatu faktor untuk mereduksi variasi. Pada persen kontribusi akan dihitung persen kontribusi faktor, interaksi faktor, dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka berarti tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan, tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen mengindikasikan ada faktor yang berpengaruh terabaikan sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu faktor dirumuskan dengan menggunakan persamaan:



$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (2.36)$$

dengan:

$$SS'_A = SS_A - v_A \cdot MS_E \quad (2.37)$$

## 2. Prediksi rasio S/N yang optimal

Rasio S/N prediksi yang diperoleh dengan menggunakan kombinasi faktor-faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon pada level optimalnya dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\mu_{prediksi} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (2.38)$$

dimana:

$q$  = jumlah faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon.

$\hat{\eta}_m$  = rata-rata total rasio S/N multirespon.

## 3. Interval keyakinan

Interval keyakinan pada analisis hasil eksperimen dengan menggunakan metode Taguchi dihitung dalam tiga kondisi, yaitu:

a. Interval kepercayaan untuk kondisi perlakuan yang diprediksi

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.39)$$

$$\mu_{prediksi} - CI_1 \leq \mu_{prediksi} \leq \mu_{prediksi} + CI_1 \quad (2.40)$$

dengan:

$\mu_{prediksi}$  = dugaan rata-rata rasio S/N pada kombinasi optimal

$n_{eff}$  = banyaknya pengamatan efektif.

$$= \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan untuk perkiraan rata-rata}} \quad (2.41)$$

b. Interval keyakinan untuk memprediksi eksperimen konfirmasi

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.42)$$



dengan:

$r$  = jumlah sampel dalam eksperimen konfirmasi.

#### 4. Eksperimen konfirmasi

Eksperimen konfirmasi adalah percobaan yang dilakukan untuk memeriksa kesimpulan yang diperoleh. Tujuan eksperimen konfirmasi sebagai berikut:

- a. Memverifikasi dugaan yang dibuat pada saat model, performansi, penentuan faktor, dan interaksi yang dibuatnya.
- b. Merancang parameter hasil analisis yang optimum dari hasil percobaan pada performansi yang diharapkan.

Eksperimen konfirmasi dilakukan menurut langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Merancang kondisi optimum untuk faktor dan level yang signifikan.
- b. Membandingkan rata-rata dan variansi hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata dan variansi yang diharapkan.

Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil bila:

- a. Terjadi perbaikan dari hasil proses yang ada setelah eskperimen Taguchi dilakukan.
- b. Hasil eksperimen konfirmasi dekat dengan nilai yang diprediksi.

#### 2.8 Analisa *grey-relational*

Analisa *grey-relational* digunakan untuk menormalisasi S/N rasio hasil analisa metode Taguchi, Pada analisa ini nilai S/N rasio dinormalkan dalam nilainya yang besarnya pada interval antara 0 dan 1. Proses untuk menormalisasikan S/N rasio menggunakan persamaan sebagai berikut (Lu et. al., 2008):

$$x_i(k) = \frac{\eta_i(k) - \min(\eta_i(k))}{maks(\eta_i(k)) - \min(\eta_i(k))} \quad (2.43)$$

Dengan:

$x_i(k)$  = nilai hasil normalisasi S/N rasio

$\min(\eta_i(k))$  = nilai minimum dari S/N rasio pada respon ke- $i$

$maks(\eta_i(k))$  = nilai maksimum dari S/N rasio pada respon ke- $i$



Selanjutnya, perubahan nilai  $x_i(k)$  menjadi koefisien *grey-relational* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\gamma(x_o(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \cdot \Delta_{\max}} \quad (2.44)$$

Dengan:

$\Delta_{oi}(k) = \|x_o(k) - x_i(k)\|$ , yaitu nilai absolut dari perbedaan nilai ideal  $x_o(k)$  dan  $x_i(k)$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall i} \min_{\forall k} \Delta_{oi}(k)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall i} \max_{\forall k} \Delta_{oi}(k)$$

$\xi$ : koefisien pembeda,  $\xi \in [0,1]$

## 2.9 Logika Fuzzy

### 2.9.1 Pendahuluan

*Fuzzy Logic* diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh pada tahun 1965, dan merupakan metode yang mempunyai kemampuan untuk memproses variabel yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara eksak/pasti, misalnya tinggi, lambat, dan bising. Dalam *fuzzy logic*, variabel yang bersifat kabur direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai *crisp* dan derajat keanggotaannya (*membership function*). Logika *fuzzy* berbeda dengan logika *digital* biasa. Logika *digital* biasa hanya mengenal dua keadaan, yaitu Ya dan Tidak, atau *ON* dan *OFF*, atau *High* dan *Low*, atau "1" dan "0", sedangkan logika *Fuzzy* meniru cara berpikir manusia dengan menggunakan konsep sifat kesamaran suatu nilai. Dengan teori himpunan *fuzzy*, suatu objek dapat menjadi anggota dari banyak himpunan dengan derajat keanggotaan yang berbeda pada masing-masing himpunan.

Beberapa alasan untuk menggunakan logika *fuzzy* adalah sebagai berikut (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

- a) Konsep logika *fuzzy* mudah dimengerti. Konsep matematis yang mendasari penalaran *fuzzy* juga sangat sederhana dan mudah dimengerti.
- b) Logika *fuzzy* sangat fleksibel.
- c) Logika *fuzzy* memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.



- d) Logika *fuzzy* mampu memodelkan fungsi-fungsi non-linear yang sangat kompleks.
- e) Logika *fuzzy* dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
- f) Logika *fuzzy* dapat bekerja sama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
- g) Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa alami.

Beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy* adalah sebagai berikut.

a) Variabel *fuzzy*

Merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*, sebagai contoh adalah umur, temperatur, dan permintaan.

b) Himpunan *fuzzy*

Merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel *fuzzy*. Sebagai contoh adalah variabel umur yang terbagi menjadi 3 himpunan *fuzzy*, yaitu muda, paruh baya, dan tua.

Himpunan *fuzzy* mempunyai 2 atribut, yaitu:

- Linguistik

Yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: muda, paruh baya, dan tua.

- Numeris

Yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel, seperti 4, 25, dan 50.

c) Semesta pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan riil yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya, sebagai contoh adalah:

- Semesta pembicaraan untuk variabel umur adalah  $[0 +\infty]$ .
- Semesta pembicaraan untuk variabel temperatur adalah  $[0-40]$ .



d) Domain

Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diizinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy*. Seperti halnya dengan semesta pembicaraan, *domain* merupakan himpunan bilangan *real* yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai *domain* dapat berupa bilangan positif maupun negatif, sebagai contoh adalah:

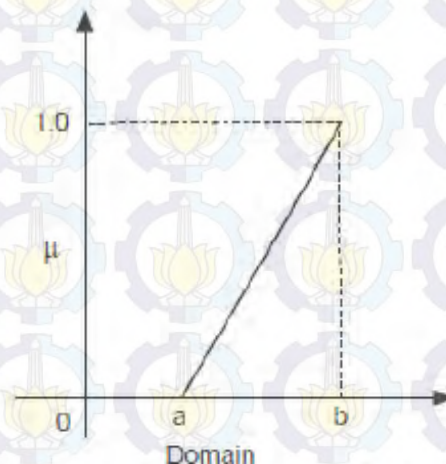
- Muda =  $[0, 45]$
- Paruh baya =  $[35, 55]$
- Tua =  $[45, +\infty]$

## 2.9.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Ada beberapa representasi yang dapat digunakan, yaitu (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

a) Representasi Linier Naik

Kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan 0 dan bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Representasi linier naik

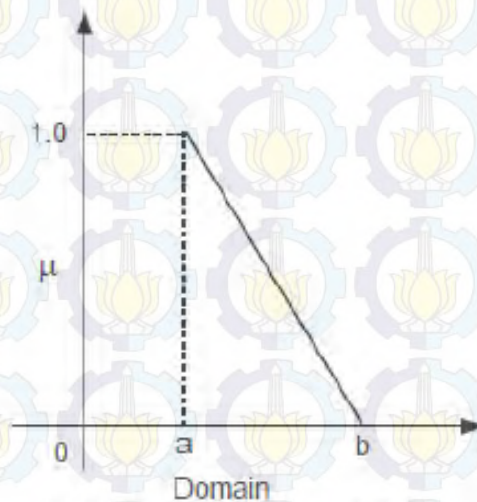


Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a) / (b - a); & a < x < b \\ 1; & x \geq b \end{cases}$$

#### b) Representasi Linier Turun

Merupakan kebalikan dari representasi linear naik. Garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Representasi linier turun

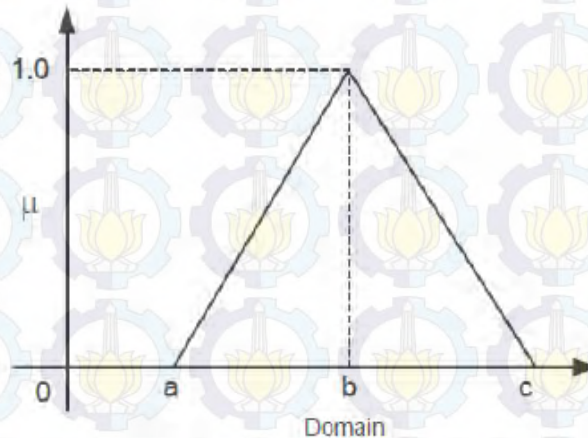
Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu[x] = \begin{cases} 1; & x \leq a \\ (b - x) / (b - a); & a < x < b \\ 0; & x \geq b \end{cases}$$



### c) Representasi Kurva Segitiga

Kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis linier, yaitu garis linier naik dan garis linier turun. Ilustrasi dari representasi kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Representasi kurva segitiga

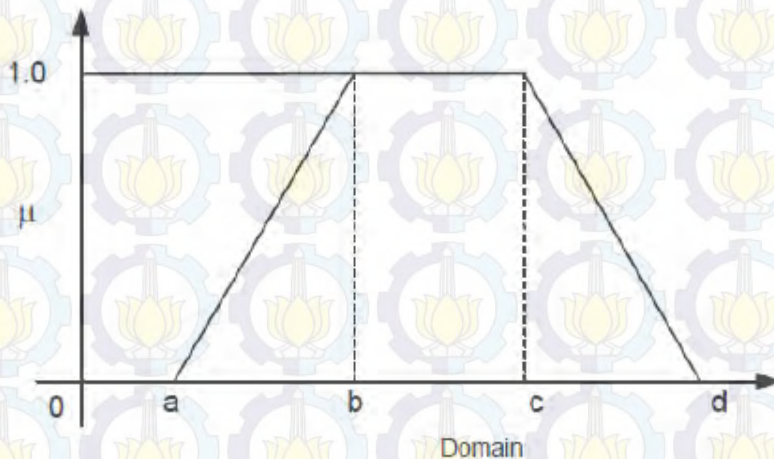
Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a) / (b - a); & a < x \leq b \\ (c - x) / (c - b); & b < x < c \\ 1; & x \geq c \end{cases}$$

### d) Representasi Kurva Trapesium

Kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1. Ilustrasi dari representasi kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.16.





Gambar 2.16 Representasi kurva trapesium

Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ (x - a) / (b - a); & a < x < b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ (d - x) / (d - c); & x > c \end{cases}$$

### 2.9.3 Fungsi Implikasi

Tiap-tiap aturan (proposisi) pada basis pengetahuan *fuzzy* akan berhubungan dengan suatu relasi *fuzzy*. Bentuk umum dari aturan yang digunakan dalam fungsi implikasi sebagai berikut (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

IF x is A THEN y is B

dengan x dan y adalah skalar, dan A dan B adalah himpunan *fuzzy*. Proposisi yang mengikuti IF disebut sebagai anteseden, sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut sebagai konsekuen. Proposisi ini dapat diperluas dengan menggunakan operator *fuzzy*, seperti:

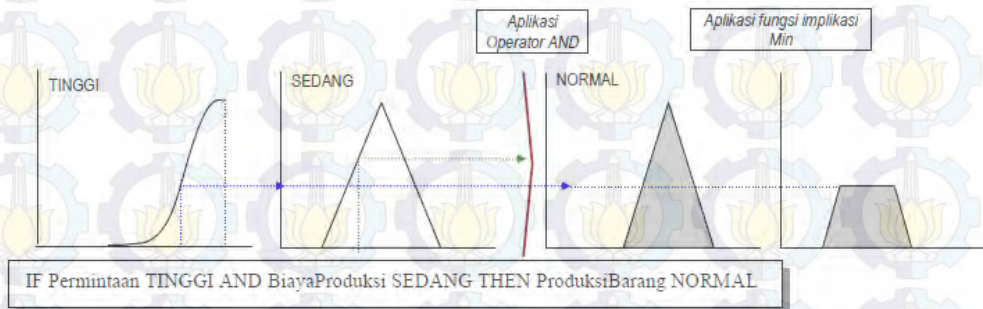
IF (x<sub>1</sub> is A<sub>1</sub>) • (x<sub>2</sub> is A<sub>2</sub>) • (x<sub>3</sub> is A<sub>3</sub>) • ..... • (x<sub>N</sub> is A<sub>N</sub>) THEN y is B  
dengan • adalah operator (misal: OR atau AND).



Secara umum, ada 2 fungsi implikasi yang dapat digunakan, yaitu:

a. Min (minimum)

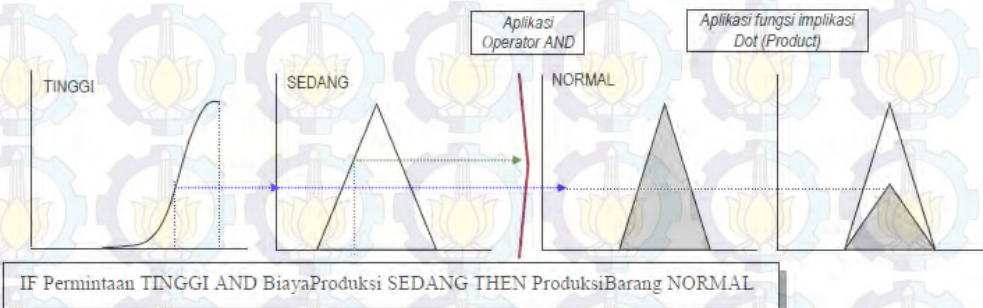
Fungsi ini akan memotong output himpunan *fuzzy*. Gambar 2.17 menunjukkan salah satu contoh penggunaan fungsi min.



Gambar 2.17 Fungsi implikasi: MIN.

b. Dot (produk)

Fungsi ini akan menskala output himpunan fuzzy. Gambar 2.18 menunjukkan salah satu contoh penggunaan fungsi dot.



Gambar 2.18 Fungsi implikasi: DOT.

### 2.9.4 Sistem Inferensi *Fuzzy* Metode Mamdani

Metode Mamdani sering juga dikenal dengan nama Metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan output, diperlukan 4 tahapan, yaitu (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

1. Pembentukan himpunan *fuzzy*
2. Aplikasi fungsi implikasi (aturan)
3. Komposisi aturan
4. Penegasan (*defuzzy*)



### 1. Pembentukan himpunan *fuzzy*

Pada Metode Mamdani, baik variabel input maupun variabel output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *fuzzy*.

### 2. Aplikasi fungsi implikasi

Pada Metode Mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah Min.

### 3. Komposisi Aturan

Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem *fuzzy*, yaitu: max, aditif, dan probabilistik OR (probor).

#### a. Metode Max (*Maximum*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah *fuzzy* dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR (union). Jika semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan *fuzzy* yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Secara umum fungsi max dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$\mu_{sf}[x_i]$  = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i;

$\mu_{kf}[x_i]$  = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-i.

Misalkan ada 3 aturan (proposisi), maka penulisannya adalah sebagai berikut:

[R1] IF Biaya Produksi RENDAH And Permintaan NAIK

THEN Produksi Barang BERTAMBAH;

[R2] IF Biaya Produksi STANDAR

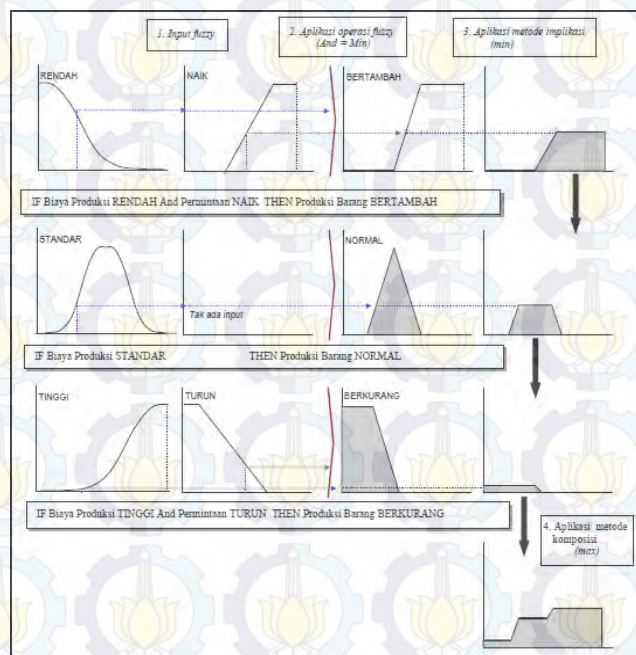
THEN Produksi Barang NORMAL;

[R3] IF Biaya Produksi TINGGI And Permintaan TURUN

THEN Produksi Barang BERKURANG.

Proses inferensi dengan menggunakan metode Max untuk menyusun komposisi aturan ditunjukkan pada Gambar 2.19 (Kusumadewi dan Purnomo, 2010). Apabila digunakan fungsi implikasi MIN, maka metode komposisi ini sering disebut dengan nama MAX-MIN atau MIN-MAX atau MAMDANI.





Gambar 2.19 Komposisi aturan *Fuzzy* metode Max

#### b. Metode Aditif (*Sum*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan *bounded-sum* terhadap semua output daerah *fuzzy*. Secara umum penulisannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \min(1, \mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$\mu_{sf}[x_i]$  = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-*i*;

$\mu_{kf}[x_i]$  = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-*i*.

#### c. Metode Probabilistik OR (probor)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan produk terhadap semua output daerah *fuzzy*. Secara umum penulisannya adalah sebagai berikut:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow (\mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) - (\mu_{sf}[x_i] * \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

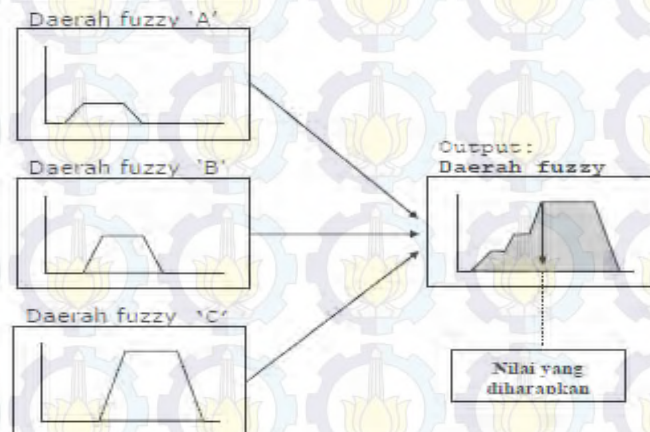
$\mu_{sf}[x_i]$  = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-*i*.

$\mu_{kf}[x_i]$  = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-*i*.



#### 4. Penegasan (*defuzzy*)

Input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Apabila diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam interval tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai *crisp* tertentu sebagai output seperti terlihat pada Gambar 2.20 (Kusumadewi dan Purnomo, 2010).



Gambar 2.20 Proses defuzzifikasi

Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan MAMDANI, yaitu:

##### a. Metode *Centroid* (*Composite Moment*)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat ( $z^*$ ) daerah *fuzzy*, dan secara umum perumusannya adalah sebagai berikut (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):

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

##### b. Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan separuh dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*, dan secara umum penulisannya adalah sebagai berikut (Kusumadewi dan Purnomo, 2010):



$z_p$  sedemikian hingga  $\int_{\mathbb{R}^1}^p \mu(z) dz = \int_p^{\mathbb{R}^n} \mu(z) dz$

c. Metode *Mean of Maximum* (MOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

d. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

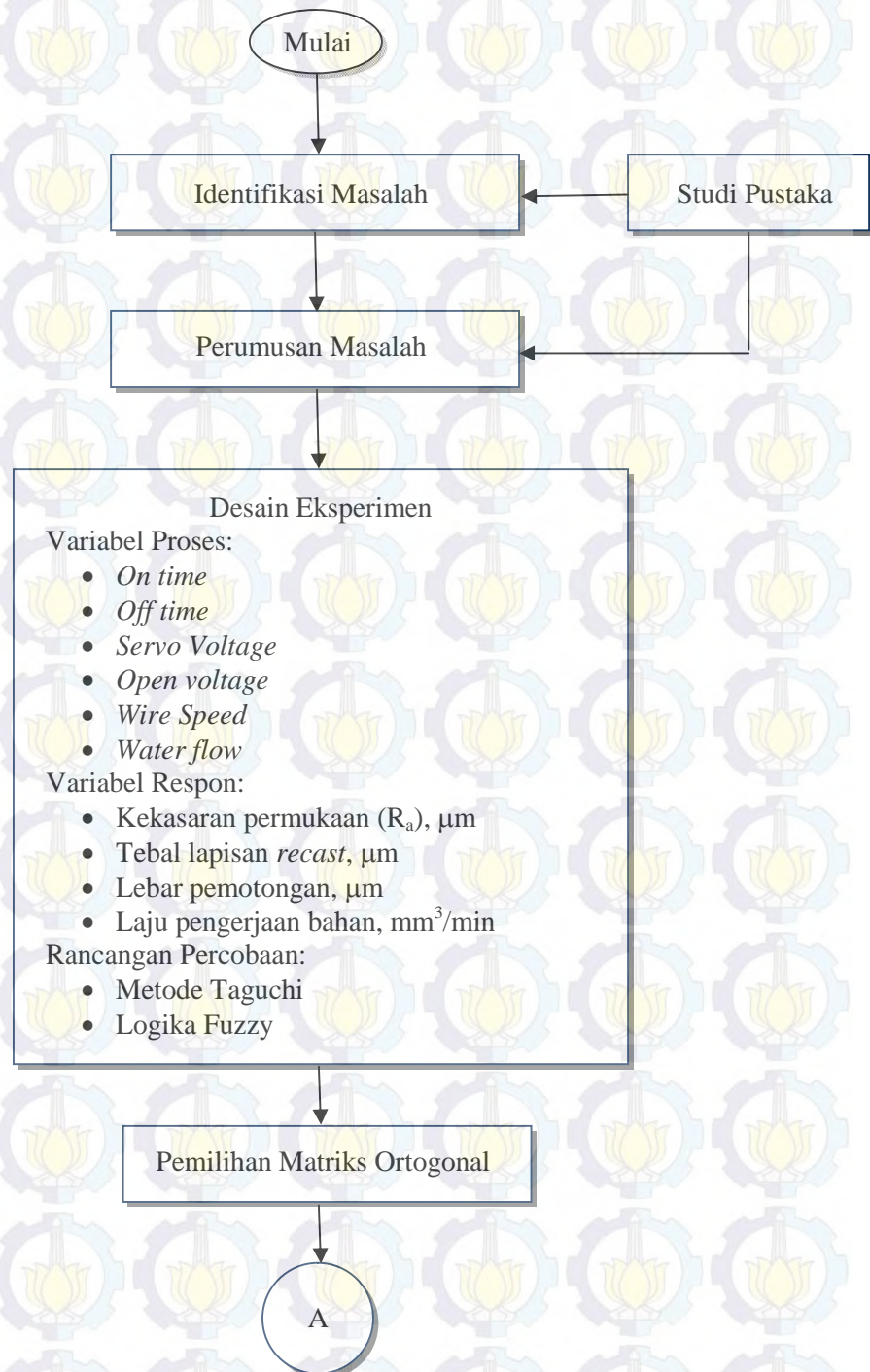
e. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.



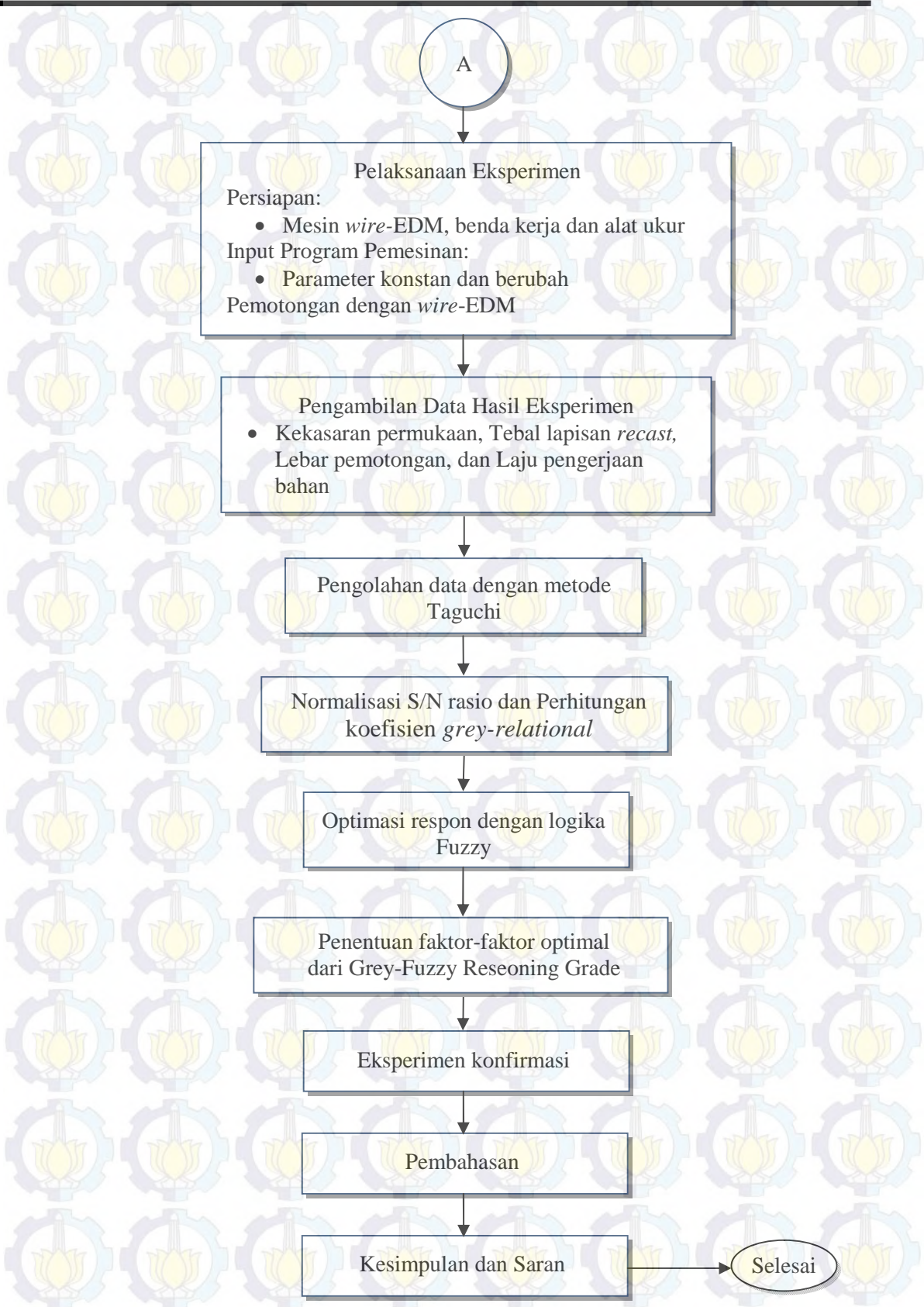
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan pada pelaksanaan tesis ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian (lanjutan)



## 1.1 Faktor-faktor dalam Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari hasil eksperimen. Faktor-faktor yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 1. Faktor Kontrol

Faktor kontrol merupakan faktor yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan dari penelitian yang dilakukan dan pertimbangan yang lain. Faktor kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. *On time* (ON)
- b. *Open voltage* (OV)
- c. *Off time* (OFF)
- d. *Servo reference voltage* (SV)
- e. *Wire feed* (WF)
- f. *Water flow* (WL)

### 2. Faktor Konstan

Faktor konstan merupakan faktor yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai faktor ini dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Faktor-faktor yang menjadi faktor konstan pada penelitian ini adalah:

- a. *Low power* (LP)
- b. *Arc on time* (AN)
- c. *Arc off time* (AFF)
- d. *Feedrate override* (FR)
- e. *Wire tension* (WT)
- f. *Feedrate mode* (FM)
- g. *Feedrate* (F)

### 3. Faktor Noise

Faktor *noise* adalah faktor gangguan yang memiliki pengaruh terhadap respon, tetapi sangat sulit untuk dikendalikan. Faktor-faktor yang mungkin menjadi *noise* dalam penelitian ini adalah temperatur cairan dielektrik, konsentrasi geram dalam cairan dielektrik dan kondisi permukaan kawat elektroda. Faktor-faktor ini tidak dimasukkan



ke dalam rancangan percobaan, sehingga pengambilan data dilakukan dengan replikasi untuk mengatasi pengaruh faktor *noise* pada hasil penelitian.

## 1.2 Bahan dan Peralatan

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

### 3.2.1 Bahan Penelitian

Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja perkakas dan kawat elektroda yang digunakan adalah kuningan. Informasi lengkap mengenai bahan penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

#### 1. Benda kerja

Material yang digunakan adalah baja perkakas SKD-11. Material ini memiliki kekerasan 60 HRC dengan dimensi 15 x 30 x 200 mm.

#### 2. Elektroda kawat

Elektroda kawat yang digunakan adalah Seiki Denko HSD-25P-5RT berbahan kuningan dengan diameter 0,25 milimeter.

### 3.2.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin *wire*-EDM, peralatan ukur, dan peralatan bantu. Peralatan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. Mesin *wire*-EDM

Mesin *wire*-EDM yang digunakan pada penelitian ini adalah CHMER CW32F. Mesin tersebut memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Arah pergerakan : lima sumbu (x,y,z,u,v)

Diameter kawat : 0,15–0,30 mm

Kecepatan kawat maksimal : 250 mm/detik

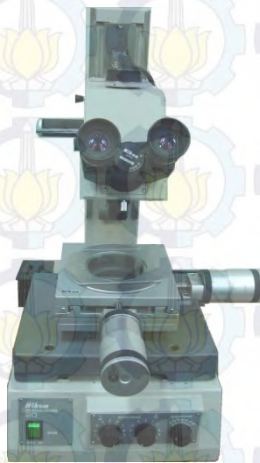
Dimensi meja kerja : 600 mm x 400 mm

#### 2. Peralatan ukur

##### a. *Measurescope*

Pengukuran lebar pemotongan pada penelitian ini dilakukan dengan Nikon *measurescope* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Alat ukur ini memiliki kecermatan 1  $\mu\text{m}$ . Panjang maksimum yang dapat diukur dengan menggunakan alat ini adalah 5 mm.





Gambar 3.2 Nikon *measurescope*

b. *Surface roughness tester*

Pengukuran angka kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *surftest* 401 seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.3. Alat ini memiliki kecermatan sebesar  $0,1 \mu\text{m}$ .



Gambar 3.3 Mitutoyo *surftest* 401

c. Foto mikroskop

Pengukuran tebal lapisan *recast* pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan foto mikroskop merk Olympus BX41-32PO2 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Mikroskop ini dilengkapi dengan perangkat tambahan yang dapat menampilkan gambar melalui layar komputer. Perangkat tambahan tersebut adalah Evolution LC Camera U-TVO5XC3 yang terkoneksi dengan perangkat lunak *image pro-express*. Perangkat lunak ini dapat mengukur tebal lapisan *recast* pada permukaan benda kerja secara langsung dengan kecermatan  $0,01 \mu\text{m}$ .





Gambar 3.4 Mikroskop Olympus BX41-32PO2

### 3. Peralatan bantu

#### a. Gerinda dan kertas gosok

Alat ini digunakan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen uji serta membersihkan benda kerja dari kotoran yang bersifat isolator seperti: cat, lilin, plastik, dan lain-lain.

#### b. Mistar insut

Alat ini digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja. Alat ini mempunyai kecermatan 0,05 mm.

#### c. Meja rata

Meja rata digunakan untuk meletakkan spesimen uji pada saat pengukuran kekasaran permukaan.

#### d. Lampu danudukan

Digunakan untuk memberikan pencahayaan tambahan pada benda kerja. Hal ini dilakukan karena pencahayaan yang diberikan oleh mikroskop berada di bawah benda kerja, sehingga tidak dapat menembus struktur benda kerja yang pejal.



### 3.3 Rancangan Percobaan

#### 3.3.1 Seting Faktor pada Mesin Wire-EDM

Penentuan seting faktor pada mesin *wire*-EDM dilakukan dengan merujuk rekomendasi *Wire Cut Cutting Data Manual*. Nilai seting faktor yang digunakan untuk kawat elektroda berdiameter 0,25 mm dan material benda kerja SKD-11 dengan ketebalan 10-20 mm untuk satu kali pemotongan. Metode *flushing* yang digunakan pada eksperimen ini adalah *open contact machining* dengan jarak antara *upper nozzle* dan *lower nozzle* sebesar 10 mm. Seting faktor yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Seting mesin untuk faktor konstan

No	Faktor konstan	Nilai
1	<i>Low power</i>	10
2	<i>Arc off time</i>	13
3	<i>Arc on time</i>	4
4	<i>Feedrate override</i>	9
5	<i>Wire tension</i>	8
6	<i>Feedrate mode</i>	0
7	<i>Feedrate</i>	1

Sumber: *Manual book mesin wire-EDM CHMER CW32F*

Penentuan level dari masing-masing faktor yang diteliti dilakukan dengan mempertimbangkan:

1. Nilai masing-masing level masih dalam batas *range* yang ditetapkan pada buku panduan operasional.
2. Titik-titik level yang menunjukkan nilai ekstrim.
3. Titik-titik level tersebut masih dapat digunakan pada proses pemotongan dan tidak terjadi *short circuit*.

Berdasarkan pertimbangan di atas, hasil penelitian sebelumnya, pengalaman operator dan *Wire Cut Cutting Data Manual*, maka seting faktor kontrol yang digunakan pada eksperimen ditunjukkan pada Tabel 3.2 sebagai berikut:



Tabel 3.2 Seting faktor dan pengaturan level.

Faktor/parameter proses			level 1	level 2	level 3
A	<i>On time</i>	$\mu\text{s}$	0,4 (4)	0,6 (6)	0,8 (8)
B	<i>Open voltage</i>	volt	75 (2)	80 (3)	85 (4)
C	<i>Off time</i>	$\mu\text{s}$	10 (10)	11 (11)	12 (12)
D	<i>Servo voltage</i>	volt	30 (30)	35 (35)	40 (40)
E	<i>Wire feed</i>	mm/s	170 (8)	200 (9)	220 (10)
F	<i>Water flow</i>	kg/cm <sup>2</sup>	8 (5)	10 (10)	12 (15)

Sumber: Hasil konversi dari kode mesin ke nilai sebenarnya

### 3.3.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang akan digunakan harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan faktor dan level yang telah ditetapkan. Derajat kebebasan faktor dan level tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6 dan disajikan pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Total derajat kebebasan faktor dan level

No	Faktor	Jumlah Level (k)	$v_{fl} (k-1)$
1	<i>On time</i> (A)	3	2
2	<i>Open voltage</i> (B)	3	2
3	<i>Off time</i> (C)	3	2
4	<i>Servo voltage</i> (D)	3	2
5	<i>Wire feed</i> (E)	3	2
6	<i>Water flow</i> (F)	3	2
7	<i>On time x Open voltage</i> (AxB)	3	4
8	<i>On time x Of time</i> (AxC)	3	4
9	<i>Open voltage x Off time</i> (BxC)	3	4
Total derajat kebebasan		24	

Sumber: Hasil perhitungan



Tabel 3.3 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan faktor dan level yang digunakan adalah duapuluh empat. Hal ini mengakibatkan derajat kebebasan minimum yang harus dimiliki oleh matriks ortogonal yang akan digunakan adalah duapuluh empat. Oleh karena itu, sesuai dengan pilihan yang tersedia, matriks ortogonal  $L_{27} (3^{13})$  memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan.

Berdasarkan grafik linier dan matriks ortogonal standar yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13 dapat diketahui bahwa:

- Faktor A ditempatkan pada kolom 1
- Faktor B ditempatkan pada kolom 2
- Faktor C ditempatkan pada kolom 5
- Faktor D ditempatkan pada kolom 9
- Faktor E ditempatkan pada kolom 10
- Faktor F ditempatkan pada kolom 12
- Interaksi faktor A dan faktor B pada kolom 3 dan 4.
- Interaksi faktor A dan faktor C pada kolom 6 dan 7.
- Interaksi faktor B dan faktor C pada kolom 8 dan 11.

Eksperimen ini mengakomodasi adanya interaksi antar faktor yang diduga mempunyai kontribusi dalam mempengaruhi respon. Dengan demikian digunakan rancangan percobaan matriks ortogonal  $L_{27}$ , seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.4 berikut ini:



Tabel 3.4 Rancangan percobaan Taguchi

Eks.	Faktor											
	A	B	AXB	AXB	C	AXC	AXC	BXC	D	E	BXC	F
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3

Sumber: Hasil olahan komputer

Eksperimen dilakukan secara acak dengan mengacu pada rancangan percobaan yang telah ditetapkan. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Minitab 16*. Masing-masing unit eksperimen dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung. Bila data hasil eksperimen dikumpulkan sesuai dengan kombinasi seting faktor yang sejenis, maka tampilan data yang akan diperoleh adalah seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.5 berikut ini.



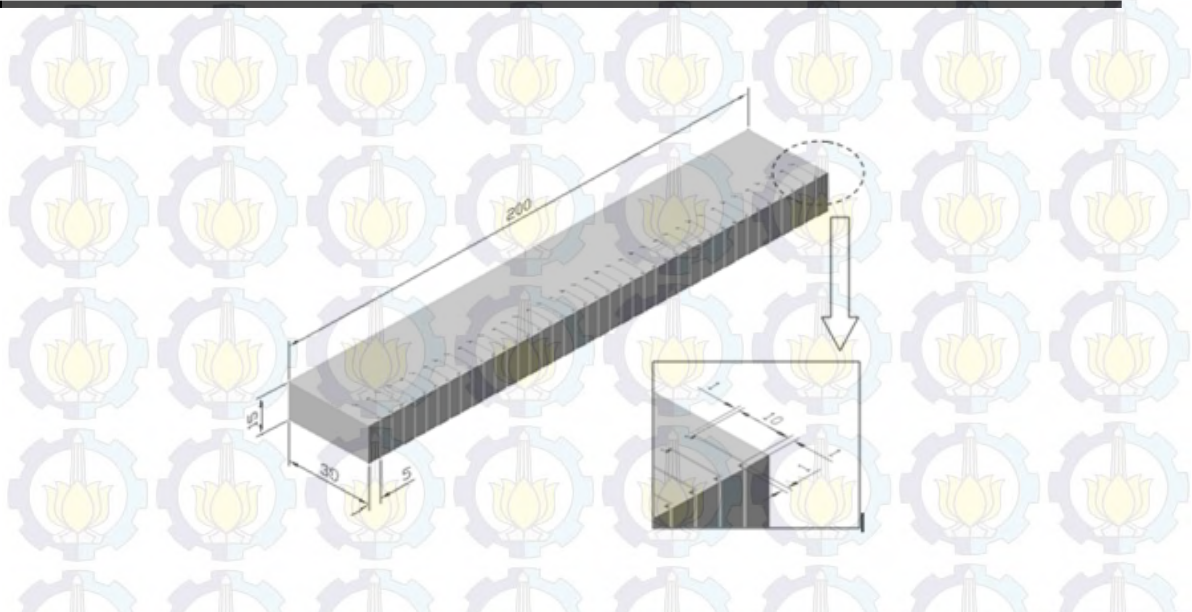
Tabel 3.5 Tampilan data hasil eksperimen

Seting faktor, kombinasi ke-	Laju pengerjaan bahan	Tebal lapisan <i>recast</i>	Lebar pemotongan	Kekasaran permukaan
	mm <sup>3</sup> /min	μm	μm	μm
1	Y <sub>111</sub>	Y <sub>121</sub>	Y <sub>131</sub>	Y <sub>141</sub>
	Y <sub>112</sub>	Y <sub>122</sub>	Y <sub>132</sub>	Y <sub>142</sub>
	Y <sub>113</sub>	Y <sub>123</sub>	Y <sub>133</sub>	Y <sub>143</sub>
2	Y <sub>211</sub>	Y <sub>221</sub>	Y <sub>231</sub>	Y <sub>241</sub>
	Y <sub>212</sub>	Y <sub>222</sub>	Y <sub>232</sub>	Y <sub>242</sub>
	Y <sub>213</sub>	Y <sub>223</sub>	Y <sub>233</sub>	Y <sub>243</sub>
3	Y <sub>311</sub>	Y <sub>321</sub>	Y <sub>331</sub>	Y <sub>341</sub>
	Y <sub>312</sub>	Y <sub>322</sub>	Y <sub>332</sub>	Y <sub>342</sub>
	Y <sub>313</sub>	Y <sub>323</sub>	Y <sub>333</sub>	Y <sub>343</sub>
-	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
-	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
27	Y <sub>2711</sub>	Y <sub>2721</sub>	Y <sub>2731</sub>	Y <sub>2741</sub>
	Y <sub>2712</sub>	Y <sub>2722</sub>	Y <sub>2732</sub>	Y <sub>2742</sub>
	Y <sub>2713</sub>	Y <sub>2723</sub>	Y <sub>2733</sub>	Y <sub>2743</sub>

Keterangan: Y<sub>ijk</sub> adalah data untuk kombinasi seting faktor ke-i, respon ke-j, dan replikasi ke-k. dengan: i = 1, ..., 27; j = 1, ..., 4; k = 1, ..., 3

Gambar 3.5 menunjukkan konfigurasi proses pemotongan yang dilakukan. Pemotongan material dilakukan sepanjang 10 mm dengan jarak antar pemotongan sebesar 5 mm. Setelah semua proses pemotongan selesai dilakukan dan lebar pemotongan untuk masing-masing eksperimen telah diukur, material dipotong dengan arah tegak lurus pemotongan awal pada jarak 5 mm dari ujung pemotongan awal.





Gambar 3.5 Skema proses pemotongan

### 3.4 Prosedur Percobaan

Percobaan yang akan dilakukan mengikuti langkah-langkah percobaan sebagai berikut:

- a. Menyiapkan spesimen yang meliputi: penyesuaian ukuran, perataan dan penghalusan permukaan, serta pembersihan spesimen dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu proses pemotongan.
- b. Memasang spesimen pada jig yang tersedia pada mesin dan menjepit bagian spesimen yang tidak mengalami proses pemotongan, kemudian menentukan sumbu referensi pemesinan pada spesimen.
- c. Memeriksa kawat elektroda 0,25 mm pada jalur roll-roll yang tersedia pada mesin.
- d. Menghidupkan mesin *wire*-EDM dan menyeting faktor-faktor yang telah ditetapkan sesuai dengan rancangan eksperimen.
- e. Melaksanakan proses pemotongan berdasarkan seting faktor yang telah ditentukan.
- f. Mengeluarkan dan mengeringkan benda kerja setelah proses pemotongan selesai.
- g. Mencatat waktu pengerjaan yang tercantum pada layar display CNC LN1W.
- h. Mengukur lebar pemotongan yang terjadi setelah semua eksperimen selesai dilakukan dengan menggunakan *measurescope*.
- i. Mengukur kekasaran permukaan dengan menggunakan *surface roughness tester*.

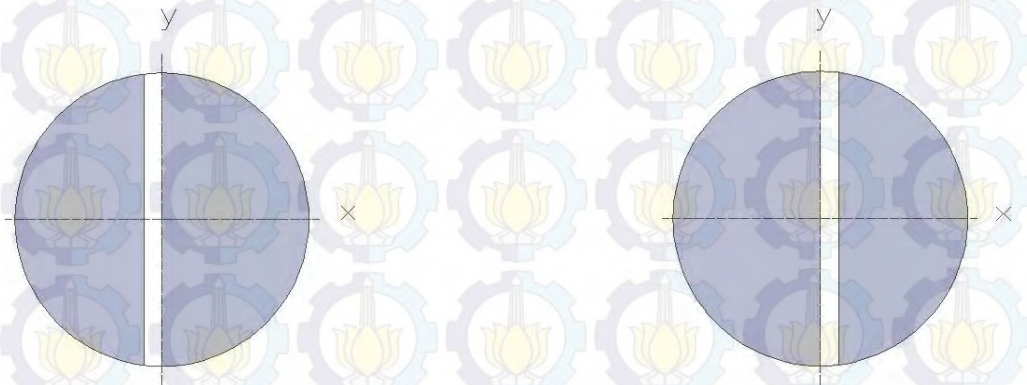


- j. Mengamati dan mengambil gambar lapisan *recast* yang terbentuk pada permukaan benda kerja kemudian mengukur tebal lapisan *recast* pada foto mikroskop.

### 3.5 Pengukuran dan Pengambilan Data

#### 3.5.1 Pengambilan Data Lebar Pemotongan

Pengukuran jarak pada *measurescope* dilakukan dengan menggunakan prinsip proyeksi serta pembesaran penampang benda kerja. Oleh karena itu, benda kerja yang akan diukur harus benar-benar diletakkan tegak lurus terhadap lensa pengukur. Pengukuran dan pengambilan data lebar pemotongan pada benda kerja yang telah dipotong dengan *wire-EDM* ditunjukkan oleh Gambar 3.6 sebagai berikut:



Gambar 3.6 Skema pengukuran lebar pemotongan

Lebar pemotongan akan diukur sepanjang 1 mm. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan salah satu sisi celah pemotongan sejajar dan tepat berada pada salah satu sumbu referensi (sumbu-x atau sumbu-y). Selanjutnya, posisi celah pertama yang berada pada sumbu referensi digeser sejajar hingga celah kedua tepat berada pada sumbu referensi. Lebar pemotongan diperoleh dengan menghitung selisih nilai pengukuran yang didapatkan pada posisi pertama dan kedua. Nilai pengukuran pada masing-masing posisi ditunjukkan oleh spindel pengukuran yang terdapat pada *measurescope*.

#### 3.5.2 Pengambilan Data Laju Pengerjaan Bahan

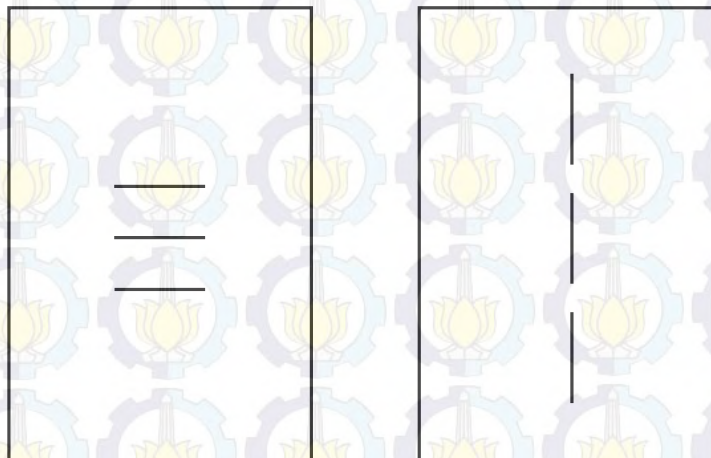
Waktu yang diperlukan untuk melakukan sekali proses pemotongan dapat diketahui dari *counter time* pada display CNC LN1W *wire-EDM* CHMER CW32F. Besarnya waktu yang diperoleh digunakan untuk menghitung kecepatan pemotongan ( $V_c$ ), kemudian laju pengerjaan bahan (MRR) dihitung menggunakan persamaan (2.5).



### 3.5.3 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan

Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika ( $R_a$ ) yang dinyatakan dalam  $\mu\text{m}$ . Tabel 2.1 merekomendasikan panjang sampel pengukuran yang digunakan adalah 0,8 mm. Masing-masing pengukuran akan dilakukan dengan panjang sampel pengukuran dikali dengan lima, sehingga panjang lintasan ukurnya adalah 4 mm.

Permukaan celah benda kerja hasil pemotongan akan diukur kekasaran permukaannya baik secara vertikal maupun horizontal dalam dua posisi, yaitu: sejajar dengan arah potong dan tegak lurus dengan arah potong benda kerja, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7. Hasil pengukuran dari ketiga posisi akan diuji dengan pengujian *anova* untuk mengetahui signifikansi perbedaan posisi pengukuran. Analisis variansi hasil pengukuran dari ketiga posisi ditunjukkan pada Lampiran 6.



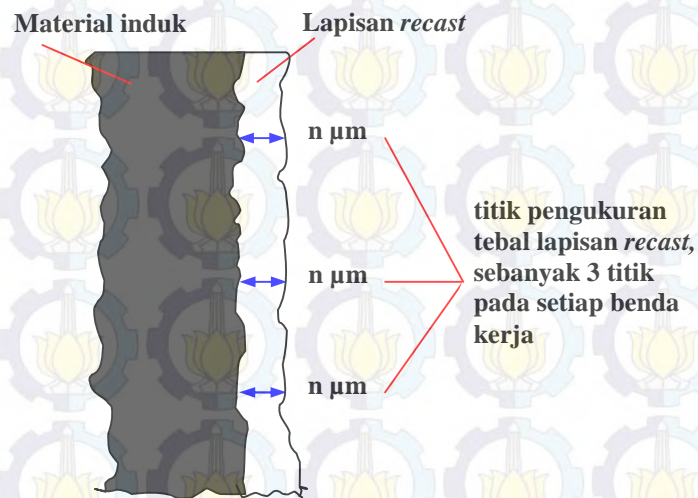
Gambar 3.7 Skema pengukuran kekasaran permukaan

### 3.5.4 Pengambilan Data Tebal Lapisan *Recast*

Sebelum tebal lapisan *recast* diukur, benda kerja diamati terlebih dahulu melalui foto mikroskop. Setelah lapisan tersebut terlihat pada layar, gambar tersebut kemudian difoto sebanyak tiga kali pada masing-masing spesimen dan disimpan. Pengukuran tebal lapisan *recast* dilakukan pada setiap foto tersebut dengan menarik garis ukur antara kedua tepi lapisan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8. Untuk masing-masing diambil 3 titik pengukuran pada permukaan benda kerja. Hasil pengukuran lalu dihitung



nilai rata-ratanya, sehingga diperoleh tebal lapisan *recast* untuk masing-masing spesimen.



Gambar 3.8 Skema pengukuran tebal lapisan *recast*

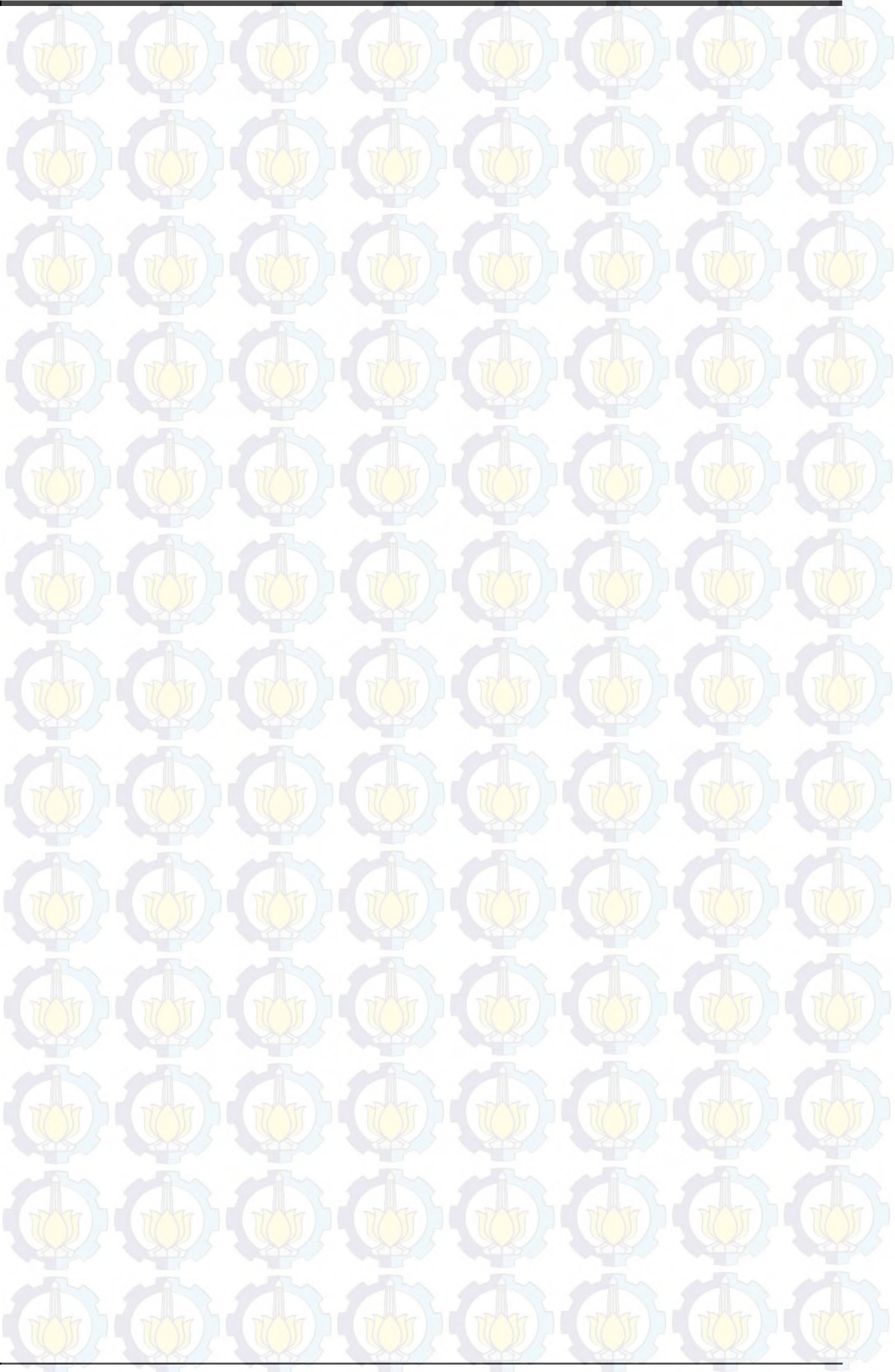
### 3.6 Karakteristik Respon Optimal

Karakteristik respon optimal yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik dan semakin besar semakin baik. Karakteristik semakin kecil semakin baik berlaku untuk kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan. Karakteristik semakin besar semakin baik berlaku pada laju pengerjaan bahan (MRR). Nilai kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast* dan lebar pemotongan yang paling minimum adalah yang paling diharapkan, sedangkan untuk laju pengerjaan bahan (MRR) yang paling diharapkan adalah yang paling maksimal. Perhitungan rasio S/N rasio masing-masing respon dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Minitab 16*.

### 3.7 Unit Logika Fuzzy

Unit logika *fuzzy* terdiri dari fuzzifikasi, fungsi keanggotaan, aturan *fuzzy*, mesin inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi. Pada proses fuzzifikasi koefisien *grey-relational* masing-masing respon dirubah menjadi himpunan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan. Selanjutnya, mesin inferensi melakukan penalaran *fuzzy* sesuai dengan aturan (*rule*) untuk menghasilkan nilai *fuzzy*. Hasil dari unit logika *fuzzy* ini adalah *Grey-Fuzzy Reasoning Grade*. Seluruh proses pada unit ini menggunakan bantuan perangkat lunak *Mathlab* dengan fasilitas *toolbox fuzzy*.







## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan faktor-faktor yang terdapat pada mesin *wire*-EDM CHMER CW32F yaitu: *on time* (A), *open voltage* (B), *off time* (C), *servo voltage* (D), *wire feed* (E) dan *water flow* (F). Data hasil eksperimen yang diambil pada penelitian ini adalah laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*.

Urutan pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran waktu pemotongan.
2. Pengukuran lebar pemotongan.
3. Pengukuran kekasaran permukaan.
4. Pengukuran tebal lapisan *recast*.

Rincian tentang data waktu pengerjaan, perhitungan laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* berturut-turut ditunjukkan pada lampiran-lampiran 2, 3, 4, 5, 6 dan 7. Tabel 4.1 menunjukkan semua data yang diperoleh selama eksperimen.

Tabel 4.1 Data hasil eksperimen.

Seting faktor kombinasi ke-	Laju pengerjaan bahan (mm <sup>3</sup> /min)	Lebar pemotongan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)	Tebal lapisan <i>recast</i> (μm)
1	17.41	350.00	1.58	1.85
	17.14	343.33	1.63	1.40
	17.25	346.67	1.62	1.49
2	14.59	336.67	1.63	1.45
	14.22	326.67	2.02	0.87
	14.31	330.00	1.72	1.31
3	12.90	330.00	2.02	3.10
	12.92	330.00	2.19	2.82
	12.79	326.67	1.95	2.71
4	16.14	340.00	2.00	2.44
	16.07	336.67	2.16	3.06
	15.93	333.33	2.30	2.95
5	15.10	343.33	2.11	3.06
	15.22	346.67	2.20	3.60
	14.94	340.00	2.15	3.81
6	17.82	343.33	2.18	4.69
	17.38	333.33	2.27	4.24
	17.62	340.00	2.27	3.97



Tabel 4.1 Data hasil eksperimen. (lanjutan 1)

Seting faktor kombinasi ke-	Laju pengerjaan bahan (mm <sup>3</sup> /min)	Lebar pemotongan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)	Tebal lapisan recast (μm)
7	16.19	336.67	2.12	4.04
	16.22	336.67	1.86	3.09
	16.91	350.00	1.96	3.97
8	16.65	340.00	2.11	3.27
	16.92	346.67	1.82	2.43
	17.13	350.00	1.95	2.55
9	15.52	350.00	2.25	4.06
	15.17	343.33	2.34	4.40
	15.01	340.00	2.15	3.76
10	21.43	353.33	2.66	5.12
	21.04	350.00	2.07	4.80
	21.78	360.00	2.44	5.69
11	19.95	360.00	1.98	2.24
	19.84	356.67	2.21	3.56
	19.73	353.33	2.15	3.00
12	21.41	350.00	2.32	3.14
	21.20	346.67	2.18	3.30
	21.67	353.33	2.20	3.18
13	21.75	350.00	1.69	13.28
	21.56	346.67	1.79	12.75
	21.59	346.67	1.73	13.88
14	23.84	350.00	2.22	12.77
	24.08	356.67	2.27	13.11
	24.00	350.00	2.27	14.18
15	21.21	360.00	2.25	8.69
	21.03	356.67	2.49	8.92
	21.42	363.33	2.44	9.70
16	22.27	350.00	2.49	3.85
	21.77	343.33	2.50	5.34
	22.28	350.00	2.45	5.05
17	22.07	356.67	2.15	5.92
	22.00	356.67	2.08	7.89
	22.13	360.00	2.18	8.96
18	21.19	360.00	2.56	9.65
	20.54	350.00	2.13	9.55
	20.78	353.33	2.44	10.29
19	28.35	370.00	2.38	2.81
	27.89	366.67	2.41	2.64
	28.33	366.67	2.43	2.63
20	28.97	370.00	2.87	0.57
	28.98	370.00	2.69	0.54
	28.72	366.67	2.83	0.00
21	29.17	370.00	2.89	2.28
	28.66	363.33	2.45	1.14
	29.32	370.00	2.64	1.04



Tabel 4.1 Data hasil eksperimen. (lanjutan 2)

Seting faktor kombinasi ke-	Laju pengerjaan bahan (mm <sup>3</sup> /min)	Lebar pemotongan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)	Tebal lapisan <i>recast</i> (μm)
22	21.84	360.00	2.57	8.06
	21.79	360.00	2.74	6.65
	21.80	360.00	2.60	6.56
23	26.27	350.00	2.50	7.24
	26.59	353.33	2.35	7.11
	26.69	353.33	2.46	7.68
24	25.09	360.00	2.87	11.27
	24.85	356.67	2.71	9.89
	25.23	363.33	2.87	10.60
25	27.95	360.00	2.86	7.30
	28.64	360.00	2.72	8.03
	28.30	360.00	2.73	7.67
26	27.08	350.00	2.42	8.04
	28.01	366.67	2.70	9.41
	27.71	356.67	2.53	8.76
27	27.51	360.00	2.84	6.94
	27.17	353.33	2.92	6.76
	27.55	360.00	3.23	6.73

Sumber: Hasil olahan komputer

#### 4.2 Perhitungan rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan suatu rancangan untuk melakukan transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Sebagai contoh, perhitungan rasio S/N untuk respon laju pengerjaan bahan yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2.35) dan karakteristik respon semakin besar semakin baik (*larger is better*) pada kombinasi seting faktor pertama adalah sebagai berikut:

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

$$\eta_j = -10 \log \left[ \frac{1}{3} \times \left( \frac{1}{17.41^2} + \frac{1}{17.14^2} + \frac{1}{17.25^2} \right) \right]$$

$$\eta_j = -10 \log 0.00335$$

$$\eta_j = 24.74428$$



Sesuai dengan prosedur perhitungan yang telah dilakukan, nilai rasio S/N yang diperoleh untuk masing-masing respon yang diamati pada masing-masing kombinasi seting faktor ditunjukkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Rasio S/N masing-masing respon.

Eks	Faktor												Laju pergerjaan bahan	Lebar pemotongan	Kekasaran permukaan	Tebal lapisan recast
	A	B	AB(1)	AB(2)	C	AC(1)	AC(2)	BC(1)	D	E	BC(2)	F				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24.74	-50.80	-4.12	-4.06
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	23.15	-50.40	-5.09	-1.85
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	22.19	-50.34	-6.27	-9.20
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	24.11	-50.54	-6.68	-9.03
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	23.57	-50.71	-6.65	-10.90
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	24.91	-50.60	-7.00	-12.69
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	24.31	-50.66	-5.95	-11.43
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	24.56	-50.77	-5.85	-8.86
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	23.65	-50.74	-7.03	-12.21
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	26.61	-50.99	-7.62	-14.35
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	25.95	-51.05	-6.51	-9.50
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	26.62	-50.88	-6.98	-10.12
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	26.70	-50.83	-4.79	-22.49
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	27.59	-50.94	-7.05	-22.52
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	26.53	-51.13	-7.57	-19.19
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	26.89	-50.83	-7.89	-13.60
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	26.87	-51.07	-6.59	-17.72
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	26.37	-50.99	-7.54	-19.86
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	29.00	-51.31	-7.63	-8.61
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	29.22	-51.34	-8.93	6.92
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	29.26	-51.31	-8.51	-4.03
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	26.77	-51.13	-8.41	-17.06
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	28.47	-50.94	-7.74	-17.32
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	27.98	-51.13	-8.99	-20.51
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	29.03	-51.13	-8.85	-17.70
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	28.82	-51.07	-8.13	-18.85
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	28.76	-51.07	-9.55	-16.66

Sumber: Hasil olahan komputer

### 4.3 Analisis *grey-relational*

Analisis *grey-relational* digunakan untuk menormalisasi rasio S/N hasil analisis metode Taguchi. Pada analisis ini, nilai rasio S/N dinormalkan dalam nilai yang besarnya antara 0 dan 1.



Sebagai contoh perhitungan, koefisien *grey-relational* respon laju pengerjaan bahan yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2.43) dan persamaan (2.44) pada kombinasi seting faktor pertama adalah sebagai berikut:

Nilai rasio S/N maksimum respon laju pengerjaan bahan = 29.26

Nilai rasio S/N maksimum respon laju pengerjaan bahan = 22.19

$$x_i = \frac{24.74 - 22.19}{29.26 - 22.19}$$

$$x_i = 0.3610774$$

$$\text{Nilai } \Delta_{0i}(k) = 1 - 0.3610744 = 0.6389226$$

Nilai koefisien *grey-relational* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \cdot \Delta_{\max}}$$

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{0 + 0.5 \times 1}{0.6389226 + 0.5 \times 1} = 0.4390$$

Sesuai dengan prosedur perhitungan yang telah dilakukan, nilai koefisien *grey-relational* yang diperoleh untuk masing-masing respon yang diamati pada masing-masing kombinasi seting faktor ditunjukkan oleh Tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3 Nilai koefisien *grey-relational* masing-masing respon.

Eks	Faktor												Laju pengerjaan bahan	Lebar penolongan	Kekasaran permukaan	Tebal lapisan resin
	A	B	AC(1)	AC(2)	C	AC(1)	AC(2)	BC(1)	D	E	BC(2)	F				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0430	0525	1000	0528
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0364	0890	0732	0626
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0333	1000	0584	0473
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	0408	07104	0553	0479
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	0382	0576	05175	0454
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	0485	0656	0485	0488
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	0466	06103	05978	0452
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	04291	0539	06107	04826
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	0367	05536	04832	04848
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	0576	04338	04371	0490
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	05164	04144	05323	04727
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	05720	04797	04876	04535
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	05800	05068	08033	03336
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	06795	04556	04811	03333



Tabel 4.3 Nilai koefisien *grey-relational* masing-masing respon. (lanjutan)

Eks	Faktor												Laju pengerjaan bahan	Lebar pemotongan	Kekasaran permukaan	Tebal lapisan <i>recast</i>
	A	B	AB(1)	AB(2)	C	AC(1)	AC(2)	BC(1)	D	E	BC(2)	F				
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	05644	03883	04403	03605
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	05984	05067	04186	04177
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	05969	04053	05236	03740
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	05304	04338	04424	03547
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	09314	03393	04364	04866
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	09873	03333	03607	1.0000
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1.0000	03392	03322	05734
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	05869	03884	03878	03804
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	08172	04557	04286	03778
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	07336	03883	03883	03493
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	09393	03884	03648	03742
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	08880	04048	04039	03636
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	08753	04053	03333	03843

Sumber: Hasil olahan komputer

#### 4.4 Optimasi multirespon dengan logika *fuzzy*.

Logika *fuzzy* digunakan untuk mengoptimalkan semua respon yang diamati menggunakan sistem inferensi metode Mamdani.

##### 4.4.1 Fungsi keanggotaan

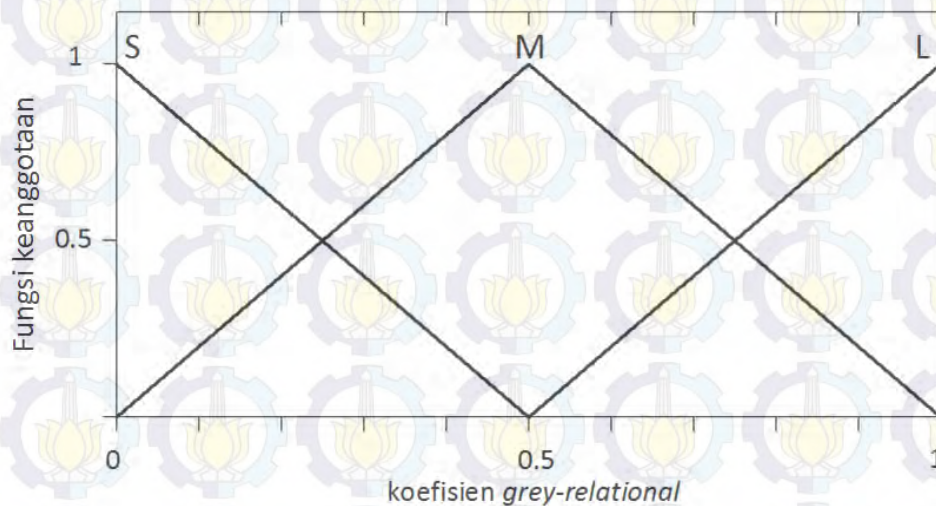
Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut sebagai derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Variabel-variabel input dari sistem logika *fuzzy* adalah koefisien *grey-relational* untuk respon laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*. Koefisien *grey-relational* tersebut akan diubah kedalam *linguistic fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan dengan bentuk segitiga (*triangle*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Secara umum fungsi keanggotaan didefinisikan menjadi 3 *Fuzzy Subsets*, yaitu *Small* (S), *Medium* (M) dan *Large* (L). Fungsi keanggotaan untuk masing-masing koefisien *grey-relational* dapat dituliskan sebagai berikut:



$$\mu_{\text{small}}(x) = \begin{cases} 1; & x = 0 \\ (0.5 - x)/0.5; & 0 < x < 0.5 \\ 0; & x > 0.5 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{medium}}(x) = \begin{cases} 0; & x = 0; x = 1 \\ x / 0.5; & 0 < x < 0.5 \\ (1 - x) / 0.5; & 0.5 < x < 1 \\ 1; & x = 0.5 \end{cases}$$

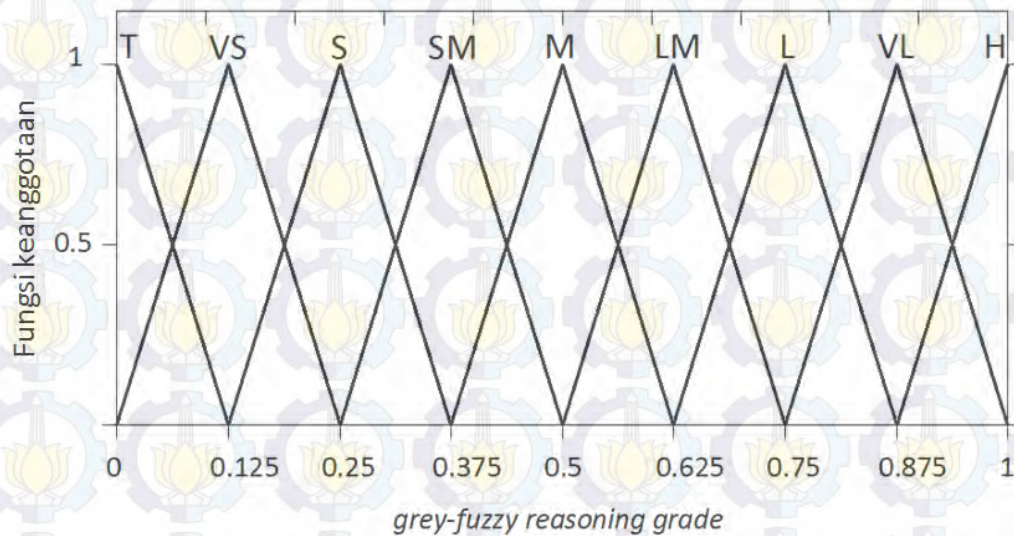
$$\mu_{\text{large}}(x) = \begin{cases} 0; & x < 0.5 \\ (x - 0.5) / 0.5; & 0.5 < x < 1 \\ 1; & x = 1 \end{cases}$$



Gambar 4.1 Fungsi keanggotaan untuk laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*.

Sebagai variabel output dari sistem logika *fuzzy* adalah *grey-fuzzy reasoning grade*, yang juga diubah kedalam *linguistic fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Secara uniform fungsi keanggotaan didefinisikan menjadi 9 *Fuzzy Subsets*, yaitu *Tiny* (T), *Very Small* (VS), *Small* (S) *Smaller Middle* (SM), *Middle* (M), *Larger Middle* (ML), *Large* (L), *Very Large* (VL) dan *Huge* (H).





Gambar 4.2 Fungsi keanggotaan multirespon sebagai output.

#### 4.4.2 Aturan Fuzzy

Aturan dasar fuzzy terdiri dari sekelompok aturan kontrol jika-maka (*if-then*) untuk mengungkapkan hubungan antara koefisien *grey-fuzzy relational* sebagai variabel input dan *grey-fuzzy reasoning grade* sebagai variabel output. Aturan dasar fuzzy yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *tiny*)
2. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *very\_small*)
3. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *small*)
4. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *very\_small*)
5. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small*)
6. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
7. If (MRR is *low*) and (lebar is *S*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small*)
8. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)



9. If (MRR is *low*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
10. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *very\_small*)
11. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small*)
12. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
13. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small*)
14. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
15. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
16. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
17. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
18. If (MRR is *low*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
19. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small*)
20. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
21. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
22. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
23. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
24. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
25. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *middle*)



26. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
27. If (MRR is *low*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large*)
28. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *very\_small*)
29. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small*)
30. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
31. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small*)
32. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
33. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
34. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
35. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
36. If (MRR is *medium*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
37. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small*)
38. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
39. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
40. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
41. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
42. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)



43. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
44. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
45. If (MRR is *medium*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large*)
46. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
47. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
48. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
49. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
50. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
51. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large*)
52. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
53. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large*)
54. If (MRR is *medium*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *very\_large*)
55. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small*)
56. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
57. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
58. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
59. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)



60. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
61. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
62. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
63. If (MRR is *high*) and (lebar is *low*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large*)
64. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *small\_middle*)
65. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
66. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
67. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
68. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
69. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large*)
70. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
71. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large*)
72. If (MRR is *high*) and (lebar is *medium*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *very\_large*)
73. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *middle*)
74. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)
75. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *low*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *large*)
76. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *large\_middle*)



77. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *large*)

78. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *medium*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *very\_large*)

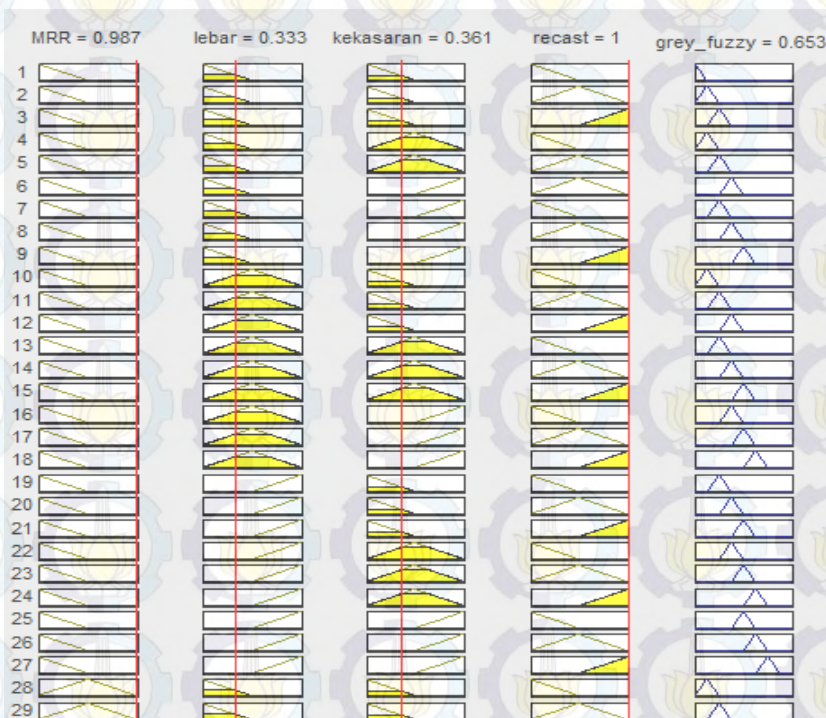
79. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *low*) then (grey\_fuzzy is *large*)

80. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *medium*) then (grey\_fuzzy is *very\_large*)

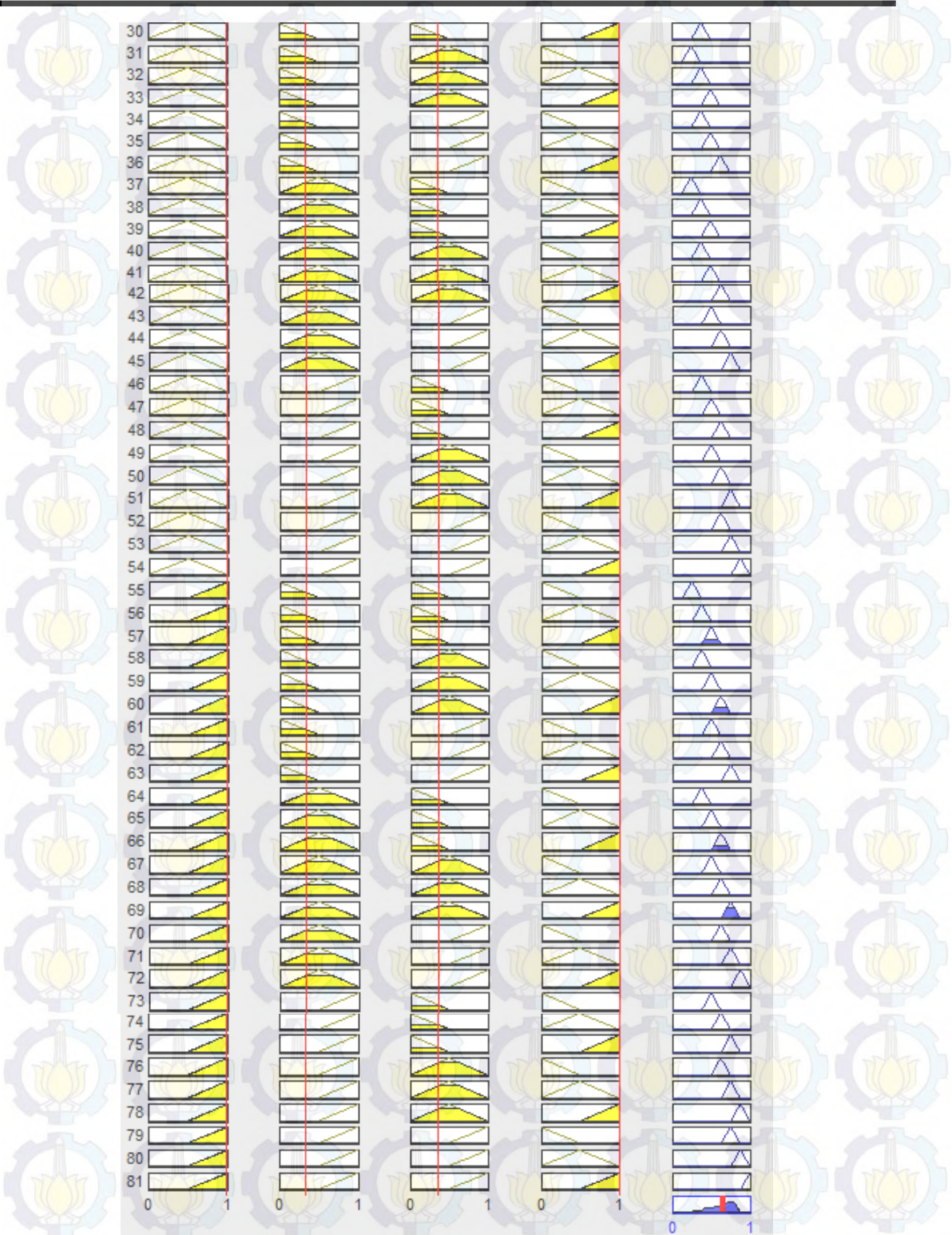
81. If (MRR is *high*) and (lebar is *high*) and (kekasaran is *high*) and (recast is *high*) then (grey\_fuzzy is *huge*)

#### 4.4.2 Penegasan (*defuzzy*)

Defuzzifikasi adalah proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Koefisien *grey-fuzzy relational* yang digunakan sebagai input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan *grey-fuzzy reasoning grade* sebagai output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Proses defuzzifikasi dilakukan dengan menggunakan metode *Centroid* (titik tengah), yaitu dengan cara mengambil titik tengah dari daerah fuzzy, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Hasil dari proses defuzzifikasi ditunjukkan pada Tabel 4.4.







Gambar 4.3 Hasil proses defuzzifikasi yang menghasilkan *grey-fuzzy reasoning grade* terbesar



Tabel 4.4 Nilai *grey-fuzzy reasoning grade* hasil proses defuzzifikasi.

Eks.	Koefisien <i>grey-relational</i>				Grey-fuzzy reasoning grade
	Laju pengerjaan bahan	Lebar pemotongan	Kekasaran permukaan	Tebal lapisan <i>recast</i>	
1	0.4390	0.5215	1.0000	0.5728	0.6380
2	0.3664	0.8940	0.7382	0.6266	0.6458
3	0.3333	1.0000	0.5584	0.4773	0.5903
4	0.4068	0.7104	0.5153	0.4799	0.5213
5	0.3832	0.5716	0.5175	0.4524	0.4773
6	0.4485	0.6566	0.4855	0.4288	0.4888
7	0.4166	0.6103	0.5978	0.4452	0.5207
8	0.4291	0.5369	0.6107	0.4826	0.5173
9	0.3867	0.5536	0.4832	0.4348	0.4488
10	0.5716	0.4338	0.4371	0.4090	0.4351
11	0.5164	0.4144	0.5323	0.4727	0.4807
12	0.5720	0.4797	0.4876	0.4635	0.4912
13	0.5800	0.5068	0.8033	0.3336	0.5512
14	0.6795	0.4556	0.4811	0.3333	0.4765
15	0.5644	0.3883	0.4403	0.3605	0.4150
16	0.5984	0.5067	0.4186	0.4177	0.4734
17	0.5969	0.4053	0.5236	0.3740	0.4681
18	0.5504	0.4338	0.4424	0.3547	0.4224
19	0.9314	0.3393	0.4364	0.4866	0.5156
20	0.9873	0.3333	0.3607	1.0000	0.6526
21	1.0000	0.3392	0.3822	0.5734	0.5639
22	0.5869	0.3884	0.3878	0.3804	0.4046
23	0.8172	0.4557	0.4286	0.3778	0.4825
24	0.7336	0.3883	0.3583	0.3493	0.4246
25	0.9393	0.3884	0.3648	0.3742	0.4676
26	0.8880	0.4048	0.4039	0.3636	0.4589
27	0.8753	0.4053	0.3333	0.3843	0.4498

Sumber: Hasil olahan komputer

Nilai *grey-fuzzy reasoning grade* hasil defuzzifikasi ini selanjutnya dianalisis sebagai variabel respon baru (*multirespon*) yang mewakili variabel laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*.

#### 4.5 Rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade*.

Desain eksperimen Taguchi yang memanfaatkan bentuk ortogonal memungkinkan adanya pemisahan pengaruh setiap faktor pada level yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 sebagai berikut:



Tabel 4.5 Nilai *grey-fuzzy reasoning grade* dalam matriks ortogonal.

Eks.	Faktor												GRRG
	A	B	AXB(1)	AXB(2)	C	AXC(1)	AXC(2)	BXC(1)	D	E	BXC(2)	F	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6380
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0.6458
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0.5903
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	0.5213
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	0.4773
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	0.4888
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	0.5207
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	0.5173
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	0.4488
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	0.4351
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	0.4807
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	0.4912
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	0.5512
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	0.4765
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	0.4150
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	0.4734
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	0.4681
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	0.4224
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	0.5156
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	0.6526
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	0.5639
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	0.4046
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	0.4825
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	0.4246
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	0.4676
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	0.4589
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	0.4498

Sumber: Hasil olahan komputer

Sebagai contoh, rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* dari faktor A (*on time*) pada level satu dihitung dengan mencari nilai rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* pada eksperimen pertama hingga kesembilan. Rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* dari faktor *on time* pada level kedua dihitung dengan mencari nilai rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* pada eksperimen kesepuluh hingga kedelapanbelas. Hal ini berlaku juga untuk rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* faktor yang lain. Sebagai contoh perhitungan, rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* dari faktor *on time* pada level satu adalah sebagai berikut:

$$\bar{\eta}_a = \frac{0.6380 + 0.6458 + 0.5903 + 0.5213 + 0.4773 + 0.4888 + 0.5207 + 0.5173 + 0.4488}{9}$$

$$\bar{\eta}_a = 0.5387$$



Sesuai dengan prosedur perhitungan yang telah dilakukan, nilai rata-rata dari *grey-fuzzy reasoning grade* untuk setiap level faktor seperti ditunjukkan oleh Tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.6

Tabel 4.6 Rata-rata dari *grey-fuzzy reasoning grade* pada setiap level

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
A	0.5387	0.4682	0.4911	0.0705
B	0.5013	0.4242	0.4697	0.0771
AXB(1)	0.5055	0.4271	0.4662	0.0785
AXB(2)	0.4693	0.5093	0.4206	0.0887
C	0.4528	0.4660	0.4295	0.0365
AXC(1)	0.4603	0.4538	0.4341	0.0262
AXC(2)	0.4544	0.4357	0.4582	0.0225
BXC(1)	0.4361	0.4577	0.4543	0.0216
D	0.4592	0.4448	0.4442	0.0151
E	0.4612	0.4456	0.4414	0.0199
BXC(2)	0.4346	0.4569	0.4567	0.0223
F	0.4619	0.4417	0.4446	0.0203
<i>Rata-rata grey-fuzzy reasoning grade</i>				0.4993

Sumber: Hasil olahan komputer

#### 4.6 Analisis variansi dan uji distribusi F.

Analisis variansi dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas faktor-faktor yang diteliti. Pada tahap ini akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat diidentifikasi kontribusi masing-masing faktor.

Pada kasus optimasi multirespon, jumlah kuadrat total (*total sum of square*) dihitung dengan menjumlahkan kuadrat dari selisih antara *grey-fuzzy reasoning grade* masing-masing unit eksperimen dengan rata-rata total *grey-fuzzy reasoning grade*. Sebagai contoh perhitungan dari jumlah kuadrat total adalah sebagai berikut:



$$SS_T = \sum_{j=1}^p (\eta_j - \eta_m)^2$$

$$SS_T = (0.6458-0.4993)^2 + (0.6458-0.4993)^2 + (0.5903-0.4993)^2 + (0.5213-0.4993)^2 + (0.4773-0.4993)^2 + (0.4888-0.4993)^2 + (0.5207-0.4993)^2 + (0.5173-0.4993)^2 + (0.4488-0.4993)^2 + (0.4351-0.4993)^2 + (0.4807-0.4993)^2 + (0.4912-0.4993)^2 + (0.5512-0.4993)^2 + (0.4765-0.4993)^2 + (0.4150-0.4993)^2 + (0.4734-0.4993)^2 + (0.4681-0.4993)^2 + (0.4224-0.4993)^2 + (0.5156-0.4993)^2 + (0.6526-0.4993)^2 + (0.5639-0.4993)^2 + (0.4046-0.4993)^2 + (0.4825-0.4993)^2 + (0.4246-0.4993)^2 + (0.4676-0.4993)^2 + (0.4589-0.4993)^2 + (0.4498-0.4993)^2$$

$$SS_T = 0.118664$$

Jumlah kuadrat total masing-masing faktor dihitung dengan menjumlahkan kuadrat dari selisih *grey-fuzzy reasoning grade* masing-masing level terhadap rata-rata total *grey-fuzzy reasoning grade*. Sebagai contoh perhitungan, jumlah kuadrat dari faktor *on time* dalam eksperimen pada faktor A adalah sebagai berikut:

$$SS_A = 9 \times [(0.5387-0.4933)^2 + (0.4682-0.4933)^2 + (0.4911-0.4933)^2]$$

$$SS_A = 0.23290$$

Hasil perhitungan jumlah kuadrat keseluruhan kemudian digunakan untuk melakukan analisis variansi multirespon (*grey-fuzzy reasoning grade*) seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Analisis variansi multirespon

Sumber variasi	db	SS	MS	F <sub>hitung</sub>
A	2	0.023290	0.011645	-
B	2	0.044940	0.022470	-
AXB	4	0.023547	0.005887	-
OFF	2	0.007584	0.003792	-
AXC	4	0.007348	0.001837	-
BXC	4	0.003651	0.000913	-
SV	2	0.001609	0.000805	-
WF	2	0.002437	0.001219	-
VL	2	0.002668	0.001334	-
Error	2	0.001590	0.000795	-
Total	26	0.118664		

Sumber: Hasil olahan komputer



Untuk mengetahui faktor/interaksi yang secara statistik signifikan mempengaruhi rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* yang optimal, maka dilakukan penggabungan (*pooling up*) beberapa faktor ke dalam *error*. Penggabungan tersebut dimulai dari faktor dengan *sum of square* (SS) terkecil. Penggabungan ini dilakukan sampai derajat bebas (db) *error* sama dengan atau lebih dari setengah derajat bebas total.

Urutan faktor yang memiliki *sum of square* (SS) terkecil dari faktor yang tidak signifikan adalah *water flow* (WL), *wire feed* (WF) dan interaksi antara *open voltage* dan *off time* (OVxOFF). Penggabungan faktor (*pooling up*) faktor-faktor tersebut ke dalam *error* menyebabkan struktur tabel analisis variansi berubah menjadi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.8 Analisis variansi multirespon penggabungan (*pooling up*)

Sumber variasi	db	SS	MS	F <sub>hitung</sub>	*
A	2	0.023290	0.0116	12.2579	17.53
B	2	0.044940	0.0225	23.6526	35.77
A X B	4	0.023547	0.0059	6.1966	15.64
OFF	2	0.007584	0.0038	3.9916	4.29
A X C	4	0.007348	0.0018	1.9337	2.00
B X C		<i>Pooled</i>			
SV		<i>Pooled</i>			
WF		<i>Pooled</i>			
WL		<i>Pooled</i>			
Error	12	0.014949	0.0012		24.77
Total	26	0.118664			

Sumber: Hasil olahan komputer

Nilai F<sub>hitung</sub> yang lebih besar dari F<sub>tabel</sub> mengindikasikan bahwa faktor tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *grey-fuzzy reasoning grade*. Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

1. Untuk faktor A (*on time*)

H<sub>0</sub>: tidak ada pengaruh faktor A terhadap multirespon

H<sub>1</sub>: ada pengaruh faktor A terhadap multirespon

Kesimpulan: F<sub>hitung</sub> = 12.2579 > F<sub>(0.5;2;12)</sub> = 3.885294, maka H<sub>0</sub> ditolak, yang artinya ada pengaruh *on time* terhadap multirespon.



2. Untuk faktor B (*open voltage*).

$H_0$  : tidak ada pengaruh faktor B terhadap multirespon

$H_1$  : ada pengaruh faktor B terhadap multirespon

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 23.6526 > F_{(0.5;2;12)} = 3.885294$ , maka  $H_0$  ditolak, yang artinya ada pengaruh *open voltage* terhadap multirespon.

3. Untuk interaksi faktor AxB (*on time x open voltage*)

$H_0$  : tidak ada pengaruh faktor AxB terhadap multirespon

$H_1$  : ada pengaruh faktor AxB terhadap multirespon

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 6.1966 > F_{(0.5;4;12)} = 3.259167$ , maka  $H_0$  ditolak, yang artinya ada pengaruh interaksi antara faktor *on time* dengan faktor *open voltage* terhadap multirespon.

4. Untuk faktor C (*off time*).

$H_0$  : tidak ada pengaruh faktor C terhadap multirespon

$H_1$  : ada pengaruh faktor C terhadap multirespon

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 3.9916 > F_{(0.5;2;12)} = 3.885294$ , maka  $H_0$  ditolak, yang artinya ada pengaruh *off time* terhadap multirespon.

5. Untuk interaksi faktor AxC (*on time x off time*)

$H_0$  : tidak ada pengaruh faktor AxC terhadap multirespon

$H_1$  : ada pengaruh faktor AxC terhadap multirespon

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 1.9337 < F_{(0.5;4;12)} = 3.259167$ , maka  $H_0$  gagal ditolak, artinya tidak ada pengaruh interaksi antara faktor *on time* dengan faktor *off time* terhadap multirespon

Kondisi  $H_0$  untuk masing-masing faktor ditunjukkan oleh Tabel 4.9 sebagai berikut:

Tabel.4.9 Kondisi hipotesis nol multirespon.

Sumber variasi	Kondisi $H_0$
A	ditolak
B	ditolak
A x B	ditolak
C	ditolak
A x C	gagal ditolak

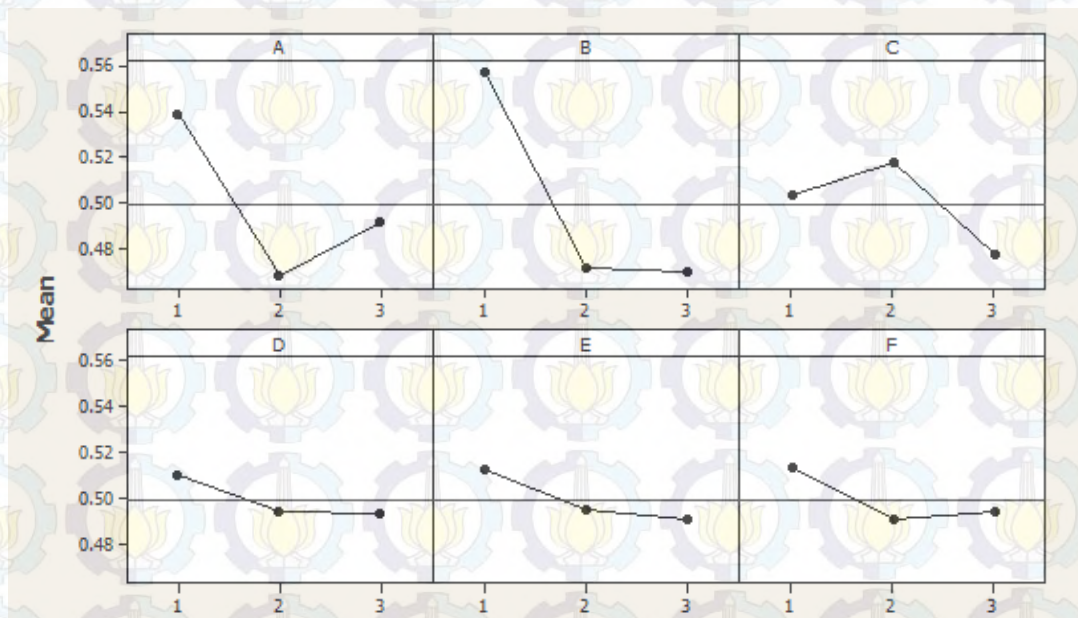
Sumber: Hasil olahan komputer



Tabel 4.9 menunjukkan maka faktor yang berpengaruh secara statistik signifikan dalam menghasilkan *grey-fuzzy reasoning grade* optimum adalah faktor A (*on time*), faktor B (*open voltage*), faktor C (*off time*). Interaksi faktor yang yang berpengaruh secara signifikan menghasilkan multirespon optimum adalah interaksi faktor A (*on time*) dengan faktor B (*open voltage*), sedangkan faktor yang tidak signifikan adalah faktor D, faktor E dan faktor F.

#### 4.7 Penentuan level optimum untuk faktor-faktor yang signifikan.

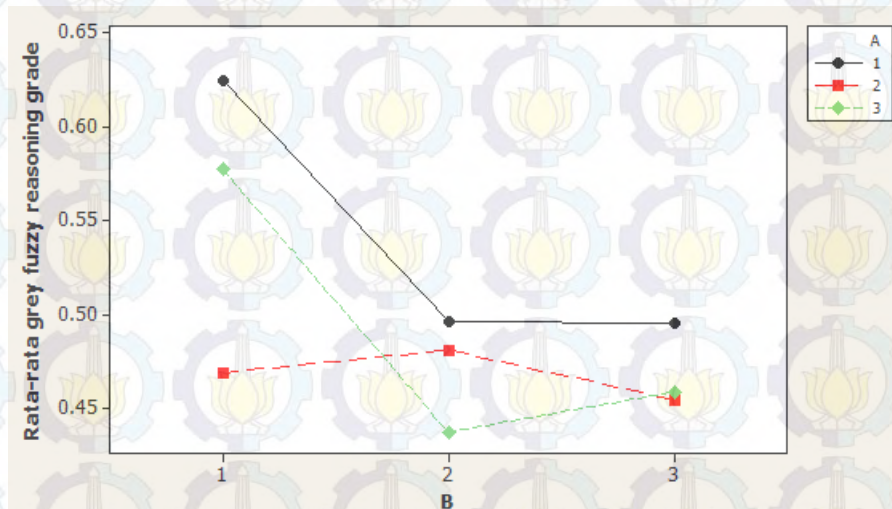
Penentuan level optimum untuk faktor-faktor yang signifikan dilakukan dengan menggunakan nilai *grey-fuzzy reasoning grade* dari masing-masing level faktor terdapat pada Tabel 4.6 yang kemudian diplot dalam sebuah grafik. Hal ini dilakukan agar rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* dan masing-masing faktor terlihat lebih jelas. Rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* yang lebih tinggi menunjukkan semakin kecilnya variabilitas di sekitar target yang diinginkan. Oleh karena itu, level dari faktor tersebut kemudian dipilih sebagai level dari kombinasi seting yang akan menghasilkan respon optimum menurut Taguchi. Grafik rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* untuk faktor utama ditunjukkan oleh Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Plot rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* untuk faktor utama

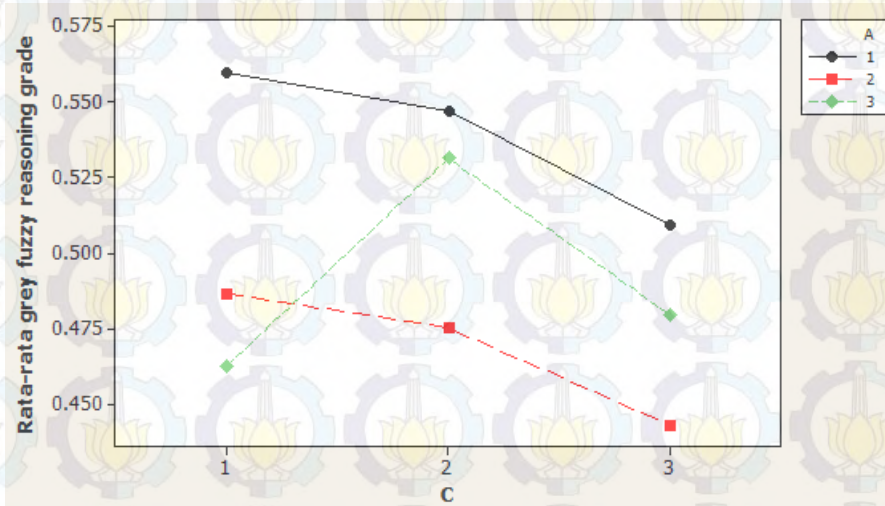


Plot interaksi antara faktor A dengan faktor B, faktor A dengan faktor C dan faktor B dengan faktor C terhadap rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* ditunjukkan pada Gambar 4.5, Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4.5 Plot interaksi antara faktor A dan faktor B

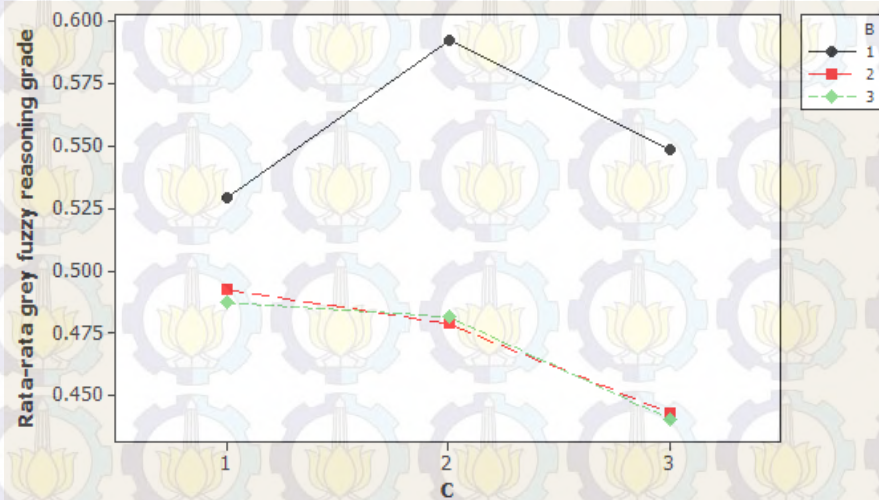
Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa kombinasi level optimum dari interaksi faktor A dengan faktor B adalah  $A_1 \times B_1$ .



Gambar 4.6 Plot interaksi antara faktor A dan faktor C

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa kombinasi level optimum dari interaksi faktor A dengan faktor C adalah  $A_1 \times C_1$ .





Gambar 4.7 Plot interaksi antara faktor B dan faktor C

Dari Gambar 4.7 terlihat bahwa kombinasi level optimum dari interaksi faktor B dengan faktor C adalah  $B_1 \times C_2$ .

Level dari faktor yang optimal dapat ditentukan dengan melihat grafik plot interaksinya. Interaksi faktor yang menghasilkan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* paling besar adalah merupakan level faktor yang optimal. Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa interaksi faktor A level 1 dengan faktor B level 1 menghasilkan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* yang paling besar, maka dapat ditentukan bahwa faktor A level 1 dan faktor B level 1 adalah level yang optimal.

Berdasarkan analisis variansi dan uji hipotesis, interaksi antara faktor A dan faktor C tidak signifikan. Oleh karena itu, penentuan level faktor C yang optimal dilakukan dengan menggunakan Gambar 4.4, yang menyatakan bahwa faktor C yang optimum berada pada level 2. Secara ringkas, level optimal dari faktor-faktor yang berpengaruh signifikan secara statistik terhadap *grey-fuzzy reasoning grade* ditunjukkan pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Kombinasi optimum dari faktor-faktor yang signifikan.

Faktor	A ( <i>on time</i> )	B ( <i>open voltage</i> )	C ( <i>off time</i> )
Level optimum	Level 1 0.4 $\mu$ s	Level 1 75 volt	Level 2 11 $\mu$ s

Sumber: Hasil olahan komputer



#### 4.8 Persen kontribusi.

Persen kontribusi menunjukkan porsi (kekuatan relatif) masing-masing faktor terhadap total variansi yang diamati. Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan. Persen kontribusi *error* yang besarnya lebih dari limabelas persen mengindikasikan ada faktor yang berpengaruh terabaikan sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Akan tetapi, hal ini tidak berlaku bagi *error* yang jumlah kuadratnya telah digabung dengan jumlah kuadrat faktor dalam proses *pooling up*. Jumlah kuadrat *pooled error* boleh mencapai lima puluh persen untuk setengah derajat kebebasan dalam matriks ortogonal (Soejanto, 2009).

Persen kontribusi dihitung dari hasil analisis variansi setelah *pooling up* terakhir dilakukan dengan menggunakan rumus (2.36) dan (2.37). Sebagai contoh perhitungan, dengan menggunakan data pada tabel 4.8, dilakukan perhitungan persen kontribusi untuk pada faktor A sebagai berikut:

$$SS'_A = SS_A - db_A \cdot MS_E$$

$$SS'_A = 0.023290 - 2 \times 0.0012$$

$$SS'_A = 0.02089$$

sehingga

$$\rho_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\%$$

$$\rho_A = \frac{0.02089}{0.118664} \times 100\%$$

$$\rho_A = 17.53\%$$

Hasil perhitungan persen kontribusi untuk semua faktor ditunjukkan pada Tabel 4.11.



Tabel 4.11 Analisis variansi multirespon dan persen kontribusi.

Sumber variasi	db	SS	MS	F <sub>hitung</sub>	ρ %
A	2	0.023290	0.0116	12.2579	17.53
B	2	0.044940	0.0225	23.6526	35.77
A X B	4	0.023547	0.0059	6.1966	15.64
OFF	2	0.007584	0.0038	3.9916	4.29
A X C	4	0.007348	0.0018	1.9337	2.00
Error	12	0.014949	0.0012		24.77
Total	26	0.118664			

Sumber: Hasil olahan komputer

Dari Tabel 4.11 terlihat bahwa pada proses pemotongan material SKD 11 dengan menggunakan *wire*-EDM, faktor B (*open voltage*) memiliki pengaruh paling besar terhadap nilai *grey-fuzzy reasoning grade* dengan kontribusi sebesar 35.77%. Selanjutnya, faktor A (*on time*) memberikan kontribusi sebesar 17.53 %, interaksi faktor A dengan faktor B memberikan kontribusi sebesar 15.64 % dan faktor C (*off time*) memberikan kontribusi sebesar 4,29%.

Tabel 4.11 menunjukkan bahwa *error* memberikan kontribusi yang relatif cukup besar, yaitu 24.77%. Hal ini berarti bahwa masih ada faktor-faktor atau variabel-variabel proses yang sebenarnya memiliki pengaruh terhadap respon yang diamati tetapi belum dimasukkan pada penelitian ini. Penentuan nilai level faktor yang kurang tepat juga bisa mengakibatkan faktor-faktor yang seharusnya signifikan menjadi tidak signifikan. Kontribusi *error* yang relatif cukup besar juga dapat disebabkan oleh penentuan level faktor yang kurang tepat.

#### 4.9 Prediksi multirespon optimal dan interval keyakinan

*Grey-fuzzy reasoning grade* (multirespon) prediksi diperoleh dengan menggunakan kombinasi faktor-faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap multirespon yang optimal, yaitu:



1. Faktor A pada level 1
2. Faktor B pada level 1
3. Interaksi faktor A pada level 1 dan faktor B pada level 1
4. Faktor C pada level 2

Perhitungan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* (multirespon) prediksi dengan menggunakan persamaan (2-38) adalah sebagai berikut:

$$\mu_{prediksi} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m)$$

$$\mu_{prediksi} = \eta_m + (\bar{\eta}_{A1} - \eta_m) + (\bar{\eta}_{B1} - \eta_m) + [(\bar{\eta}_{A1 \times B1} - \eta_m) - (\bar{\eta}_{A1} - \eta_m) - (\bar{\eta}_{B1} - \eta_m)] + (\bar{\eta}_{C2} - \eta_m)$$

$$\mu_{prediksi} = 0.4933 + (0.5387 - 0.4933) + (0.5013 - 0.4933) + [(0.6247 - 0.4933) - (0.5387 - 0.4933) - (0.5013 - 0.4933)] + (0.4660 - 0.4933)$$

$$\mu_{prediksi} = 0.4933 + 0.0454 + 0.0080 + (0.1314 - 0.0454 - 0.0080) - 0.0273$$

$$\mu_{prediksi} = 0.5974$$

Rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* prediksi adalah = 0.5974.

Penentuan interval keyakinan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* prediksi dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung banyaknya pengamatan efektif. Banyaknya pengamatan efektif dihitung dengan menggunakan persamaan (2-41) sebagai berikut:

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

$$n_{eff} = \frac{27 \times 3}{1 + (2 + 2 + 4 + 2)}$$

$$n_{eff} = 7.36$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* prediksi dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-39) dan (2-40) sebagai berikut:

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}}$$

Dengan menggunakan nilai-nilai  $F_{(0.05;1;12)} = 4.747225$  dan  $MS_E = 0.0012$ , maka:

$$CI_1 = \sqrt{\frac{4.747225 \times 0.0012}{7.36}}$$



$$CI_1 = \pm 0.0278$$

Interval keyakinan 95% rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* prediksi adalah  $0.5974 \pm 0.0278$  atau  $0.5696 \leq GFRG_{\text{prediksi}} \leq 0.6252$ .

#### 4.10 Eksperimen konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi hasil yang telah diperoleh. Hal ini dilakukan dengan membandingkan interval keyakinan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* prediksi dengan interval keyakinan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* hasil eksperimen konfirmasi. Selain itu, validasi juga dilakukan dengan membandingkan respon-respon hasil dari seting faktor kombinasi awal dengan respon-respon hasil dari seting faktor kombinasi optimum secara individu. Kombinasi awal adalah kombinasi faktor yang diseting pada level 2, sedangkan kombinasi optimum adalah kombinasi seting faktor yang diperoleh dari hasil optimasi. Kombinasi awal dan kombinasi optimum yang digunakan pada eksperimen konfirmasi ditunjukkan oleh Tabel 4.12 berikut ini.

Tabel 4.12 Kombinasi faktor pada eksperimen konfirmasi.

Seting faktor	Kombinasi awal	Kombinasi optimum
A ( <i>on time</i> )	Level 2	Level 1
B ( <i>open voltage</i> )	Level 2	Level 1
C ( <i>off time</i> )	Level 2	Level 2
D ( <i>servo voltage</i> )	Level 2	Level 1
E ( <i>wire feed</i> )	Level 2	Level 1
F ( <i>water flow</i> )	Level 2	Level 1

Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan replikasi sebanyak lima kali dan hasilnya dapat dilihat pada lampiran 9. Secara ringkas, hasil tersebut ditunjukkan oleh Tabel 4.13 sebagai berikut:



Tabel 4.13 Hasil eksperimen konfirmasi

Seting faktor	Laju pengerjaan bahan (mm <sup>3</sup> /min)	Lebar pemotongan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)	Tebal lapisan <i>recast</i> (μm)
Kombinasi awal	17.93	353	2.05	9.12
	18.06	360	2.56	8.72
	17.76	353	2.39	8.64
	17.98	350	2.43	9.35
	16.93	357	2.53	9.27
rata-rata	17.73	354.67	2.39	9.02
Kombinasi optimum	16.76	340	2.19	1.97
	16.60	340	1.76	2.74
	16.57	340	1.89	2.55
	16.24	337	1.92	3.01
	16.22	330	1.87	2.97
rata-rata	16.48	337.33	1.93	2.65

Sumber: Hasil pengumpulan data

Dari Tabel 4.13 terlihat bahwa seting faktor kombinasi optimum menghasilkan rata-rata lebar pemotongan sebesar 337.33 μm. Menurut Groover (2002) kelebihan pemotongan dengan menggunakan proses pemesinan *wire-EDM* secara umum berkisar antara 0,020-0,050 mm. Pada penelitian ini digunakan kawat elektroda dengan diameter 0.25 mm, sehingga kelebihan pemotongannya adalah  $(0.337 - 0.25) / 2 = 0.0335$  mm. Jadi kelebihan pemotongan hasil eksperimen konfirmasi dengan seting faktor kombinasi optimum masih dalam batas-batas yang diberikan oleh Groover (2002).

Rochim (2001) memberikan contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa proses pemesinan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Hasil pengerjaan dengan proses pemesinan *wire-EDM* pada tingkat kekasaran normal mempunyai  $R_a$  1.6 – 0.2 μm. Hasil eksperimen konfirmasi dengan seting faktor kombinasi optimal memberikan nilai kekasaran permukaan rata-rata  $R_a = 1.93$  μm. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa hasil eksperimen konfirmasi dengan seting faktor kombinasi optimum memberikan nilai kekasaran yang mendekati nilai kekasaran permukaan normal.

Dari Tabel 4.13 juga terlihat bahwa seting faktor kombinasi optimum menghasilkan rata-rata tebal lapisan *recast* sebesar 2.65 μm. Menurut hasil penelitian Yan (2007) ketebalan lapisan *recast* untuk material SKD11 dengan larutan dielektrik air murni pada proses *wire-EDM* adalah sebesar 1 – 3 μm. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa



hasil eksperimen konfirmasi dengan seting faktor optimum memberikan tebal lapisan *recast* yang masih dalam interval yang dihasilkan oleh penelitian Yan (2007).

Nilai rasio S/N untuk masing-masing respon sesuai dengan karakteristiknya dihitung dengan menggunakan persamaan (2-42) dan hasilnya ditunjukkan oleh Tabel 4.14 berikut:

Tabel 4.14 Nilai rasio S/N masing-masing respon pada hasil eksperimen konfirmasi

Seting faktor	Laju pengerjaan bahan	Lebar pemotongan	Kekasaran permukaan	Tebal lapisan <i>recast</i>
Kombinasi awal	24.97	-51.00	-7.60	-19.11
Kombinasi optimum	24.34	-50.56	-5.72	-8.54

Sumber: Hasil olahan komputer

Tabel 4.14 menunjukkan adanya peningkatan rasio S/N respon secara individu berdasarkan hasil seting faktor kombinasi awal dengan seting faktor kombinasi optimum pada respon lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*. Sebaliknya, pada respon laju pengerjaan bahan terjadi penurunan rasio S/N. Hal ini terjadi karena secara individu seting faktor kombinasi awal menghasilkan laju pengerjaan bahan yang lebih besar. *Grey-fuzzy reasoning grade* (multirespon) sebagai variabel baru yang mewakili respon laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* mengalami peningkatan yang signifikan, yaitu sebesar 40.51% seperti ditunjukkan oleh Tabel 4.16.

Nilai rasio S/N untuk masing-masing respon kemudian dinormalisasi dengan menggunakan persamaan (2.43) dan persamaan (2.44). Hasil dari proses normalisasi nilai rasio S/N adalah koefisien *grey-relational* seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.15 berikut ini.



Tabel 4.15 Koefisien *grey-relational* respon hasil eksperimen konfirmasi.

Seting faktor	Laju pengerjaan bahan	Lebar pemotongan	Kekasaran permukaan	Tebal lapisan <i>recast</i>
Kombinasi awal	0.4515	0.4319	0.4384	0.3612
Kombinasi optimum	0.4178	0.6931	0.6301	0.4877

Sumber: Hasil olahan komputer

Logika *fuzzy* digunakan untuk menghitung *grey-fuzzy reasoning grade* dengan koefisien *grey-relational* sebagai variabel input. Hasil perhitungan *grey-fuzzy reasoning grade* ditunjukkan oleh Tabel 4.16 sebagai berikut:

 Tabel 4.16 Nilai *grey-fuzzy reasoning grade* hasil eksperimen konfirmasi.

Seting faktor	<i>grey-fuzzy reasoning grade</i>
Kombinasi awal	0.4008
Kombinasi optimum	0.5632
Peningkatan	40.51%

Sumber: Hasil olahan komputer

Penentuan interval keyakinan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* (multi-respon) eksperimen konfirmasi dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung banyaknya pengamatan efektif. Banyaknya pengamatan efektif dihitung dengan menggunakan persamaan (2-41) sebagai berikut:

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

$$n_{\text{eff}} = \frac{27 \times 3}{1 + (2 + 2 + 4 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 7.36$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* (multi-respon) eksperimen konfirmasi dengan menggunakan persamaan (2-42) adalah sebagai berikut:

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;n_{\text{eff}}}} \cdot MS_E \left[ \frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{r} \right]$$

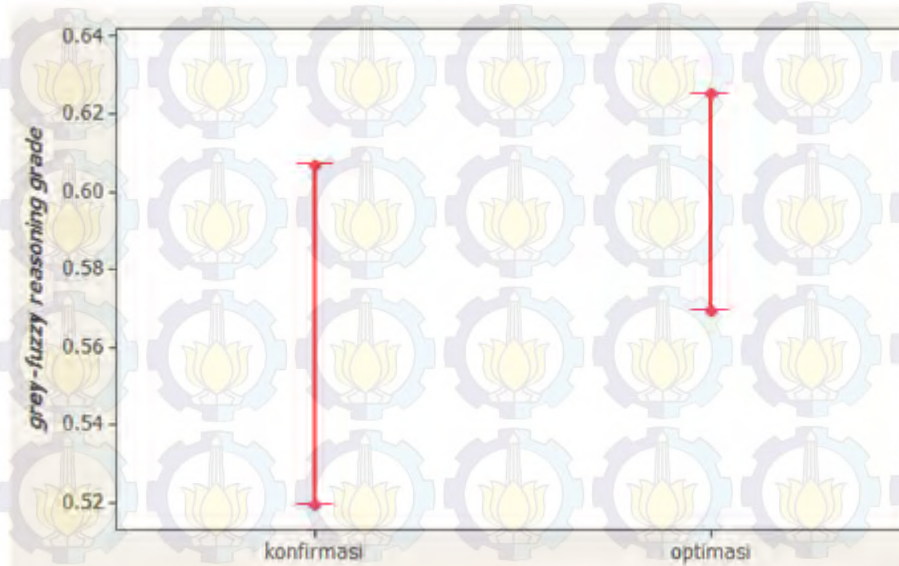


Dengan menggunakan nilai-nilai  $F_{(0.05;1;12)} = 4.747225$  dan  $MS_E = 0.0012$ , maka:

$$CI_2 = \sqrt{4.747225 \times 0.012 \times \left[ \frac{1}{7.36} + \frac{1}{5} \right]}$$

$$CI_2 = \pm 0.04371$$

Interval keyakinannya 95% rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* eksperimen konfirmasi adalah  $0.5632 \pm 0.04371$  atau  $0.5195 \leq GFRG_{\text{konfirmasi}} \leq 0.6069$ . Hasil plot interval keyakinan 95% rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* optimasi dan eksperimen konfirmasi ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Plot interval keyakinan hasil optimasi dan eksperimen konfirmasi.

Interval kepercayaan 95% rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* eksperimen konfirmasi adalah  $0.5632 \pm 0.04371$  atau  $0.5195 \leq GFRG_{\text{konfirmasi}} \leq 0.6069$ . Interval kepercayaan 95% rata-rata *grey-fuzzy reasoning grade* hasil optimasi sebesar  $0.5974 \pm 0.5118$  atau  $0.5696 \leq GFRG_{\text{prediksi}} \leq 0.6252$ . Kedua interval kepercayaan tersebut mempunyai daerah yang beririsan, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan antara *grey-fuzzy reasoning grade* hasil optimasi dengan dengan *grey-fuzzy reasoning grade* hasil eksperimen konfirmasi.



#### 4.11 Pengaruh faktor signifikan terhadap respon secara individu.

Analisis variansi pengaruh faktor *on time*, *open voltage*, *off time*, *servo voltage*, *wire feed* dan *water flow* terhadap respon laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* secara individu ditunjukkan lampiran 10. Secara ringkas, hasil perhitungan persen kontribusi masing-masing faktor dalam mempengaruhi respon secara individu ditunjukkan oleh Tabel 4.17 sebagai berikut:

Tabel 4.17 Persen kontribusi faktor signifikan terhadap respon individu

Faktor signifikan	Laju pengerjaan bahan		Lebar pemotongan		Kekasaran permukaan		Tebal lapisan <i>recast</i>	
	F <sub>hitung</sub>	(%)	F <sub>hitung</sub>	(%)	F <sub>hitung</sub>	(%)	F <sub>hitung</sub>	(%)
<i>on time</i>	211.81	88.37	60.85	73.65	63.33	60.38	17.08	20.39
<i>open voltage</i>	-	-	-	-	4.17	3.08	38.96	48.14
<i>off time</i>	-	-	-	-	8.76	7.52	2.20	1.52

Sumber: Hasil olahan komputer

Analisis dari pengaruh faktor-faktor atau variabel-variabel terhadap keempat macam respon yang diamati adalah sebagai berikut:

a. Faktor *on time*

Faktor *on time* pada proses pemesinan *wire*-EDM secara statistik mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap respon-respon yang diamati secara individu. Faktor *on time* juga mempunyai kontribusi yang cukup besar dalam mempengaruhi variansi respon secara individu seperti ditunjukkan pada Tabel 4.17. Secara proses dapat dijelaskan bahwa pada *wire*-EDM proses pemotongan hanya terjadi pada saat *on time*, sehingga nilai *on time* sangat menentukan besarnya respon yang optimal. Nilai *on time* yang lebih besar akan mengakibatkan waktu peloncatan bunga api listrik yang semakin panjang. Hal ini akan menyebabkan semakin banyaknya benda kerja yang terkikis dalam setiap satuan waktu, sehingga waktu pengerjaan menjadi semakin singkat dan laju pengerjaan bahan menjadi lebih besar.

Nilai *on time* yang lebih besar juga mengakibatkan energi yang digunakan juga akan semakin besar. Energi yang besar akan membuat benda kerja terkikis semakin banyak sehingga lebar pemotongan yang terjadi juga akan semakin besar. Selain itu, energi yang lebih besar akan membuat kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja semakin dalam, sehingga lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal



lapisan *recast* yang dihasilkan juga meningkat. Oleh karena itu, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* yang lebih kecil akan diperoleh bila nilai *on time* diseting lebih kecil. Hasil optimasi respon secara individu yang diperoleh sesuai dengan fenomena ini, yaitu nilai *on time* untuk respon laju pengerjaan bahan yang optimal berada pada level 3, sedangkan untuk respon lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* yang optimal berada pada level 1.

b. Faktor *open voltage*

Faktor *open voltage* secara statistik mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap proses pemesinan *wire*-EDM hanya pada respon kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* yang diamati secara individu. Faktor *open voltage* juga mempunyai kontribusi yang cukup besar terhadap respon kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.17. Secara proses dapat dijelaskan bahwa pada proses pemesinan *wire*-EDM benda kerja dan kawat elektroda dipisahkan oleh cairan dielektrik dengan beda potensial tertentu. Loncatan bunga api listrik akan terjadi ketika beda potensial cukup untuk mengionisasi cairan dielektrik. Beda potensial tersebut sangat menentukan besarnya energi loncatan bunga api listrik dan ditentukan oleh nilai *open voltage* yang diberikan. Semakin besar nilai *open voltage* yang diseting, maka semakin besar pula beda potensial yang terjadi. Dengan demikian, semakin besar nilai *open voltage* tentu akan membuat waktu pengerjaan menjadi semakin singkat. Fenomena ini sesuai dengan hasil optimasi respon kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* yang memberikan nilai optimum pada level 1.

c. Faktor *off time*

Faktor *off time* secara statistik signifikan terhadap proses pemesinan *wire*-EDM hanya pada respon kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* yang diamati secara individu. Faktor *off time* mempunyai kontribusi yang relatif kecil yaitu: 7.52% pada respon kekasaran permukaan dan 1.52% pada respon tebal lapisan *recast*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.15. Secara proses dapat dijelaskan bahwa loncatan bunga api listrik akan berhenti saat *off time*, sehingga proses pemotongan tidak terjadi. Nilai *off time* yang besar akan membuat waktu antar loncatan bunga api listrik semakin lama. Hal ini tentu membuat waktu pengerjaan yang dibutuhkan menjadi lebih lama sehingga laju pengerjaan bahan menjadi kecil.



Nilai *off time* yang lebih besar mengakibatkan proses pembilasan geram berjalan lebih sempurna karena cairan dielektrik memiliki cukup waktu untuk membawa geram yang terbentuk. Dengan demikian, proses pemotongan juga akan berjalan lebih stabil. Oleh karena itu, tebal lapisan *recast* yang lebih tipis, lebar pemotongan yang lebih sempit, dan kekasaran permukaan yang lebih kecil akan dapat diperoleh bila *off time* diseting dengan nilai yang lebih besar. Hasil optimasi respon secara individu telah sesuai dengan fenomena yang terjadi. Akan tetapi, hasil yang berbeda dengan fenomena didapatkan pada respon kekasaran permukaan.



## BAB V

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisisnya serta hasil eksperimen konfirmasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontribusi dari faktor-faktor yang signifikan untuk meminimumkan lebar pemotongan, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast*, dan memaksimalkan laju pengerjaan bahan (*material removal rate*) adalah sebagai berikut:

- Faktor *on time* sebesar 17.53%.
- Faktor *open voltage* sebesar 35.77%.
- Faktor *off time* sebesar 4.29%.
- Interaksi faktor *on time* dengan faktor *open voltage* sebesar 15.64%.

2. Kombinasi optimum dari faktor-faktor yang signifikan untuk meminimumkan lebar pemotongan, kekasaran permukaan, tebal lapisan *recast*, dan memaksimalkan laju pengerjaan bahan adalah sebagai berikut:

- *On time* diatur pada 0.4  $\mu$ s.
- *Open voltage* diatur pada 75 volt
- *Off time* diatur pada 11  $\mu$ s.

#### 5.2. Saran

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

1. Kontribusi *error* masih sebesar 24.77%, sehingga pada penelitian selanjutnya sebaiknya diikut sertakan faktor-faktor penting yang lain untuk mengurangi besarnya *error*.
2. Metode optimasi multirespon dalam penelitian ini menggunakan logika *fuzzy*. Pada penelitian selanjutnya, dapat dilakukan sebuah studi untuk melakukan optimasi multirespon dengan menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai perbandingan.



Lampiran 1

**SPESIFIKASI MESIN WIRE-EDM**

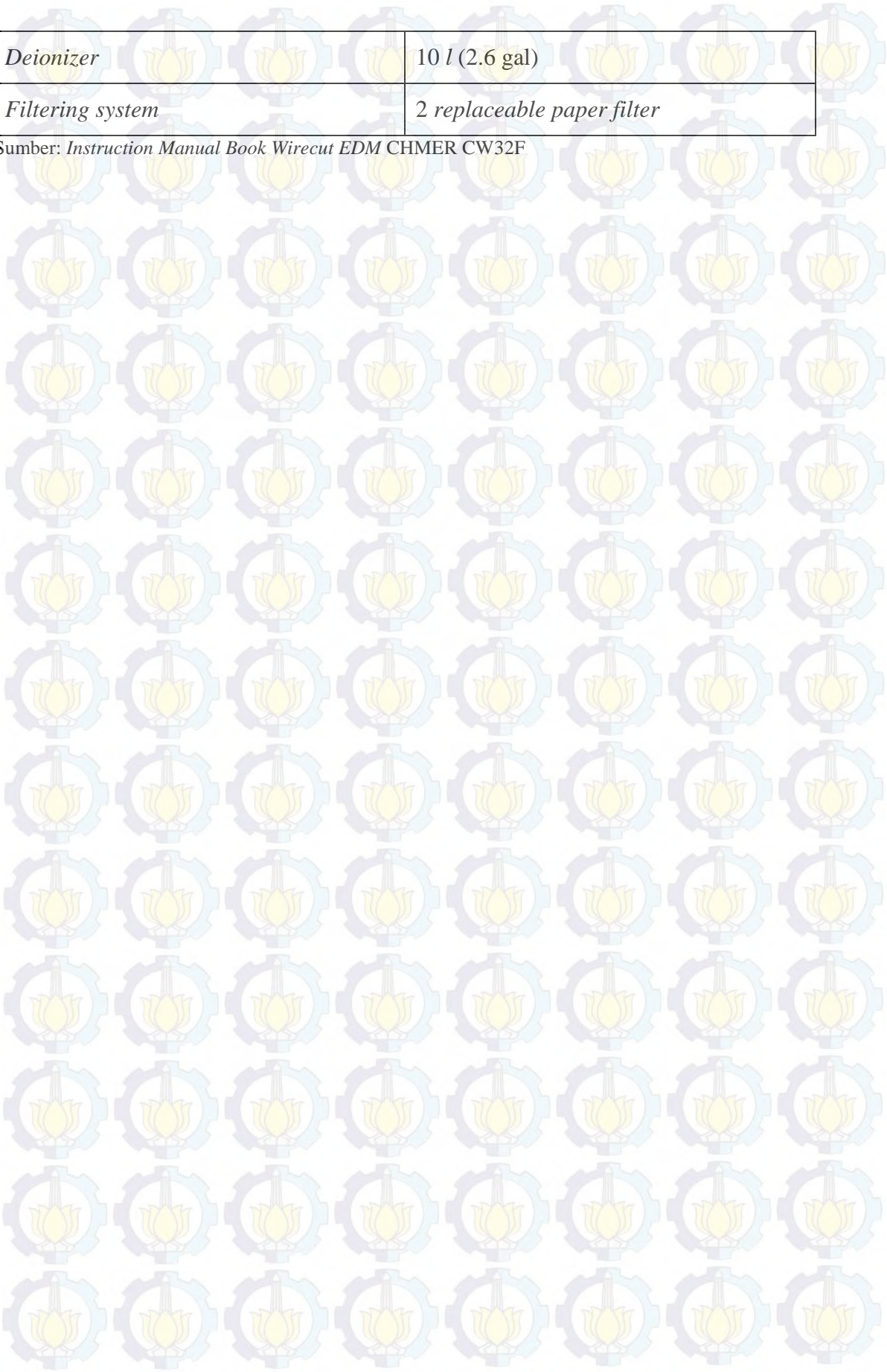
Tabel L-1.1 Spesifikasi Mesin Wire-EDM

<i>Item</i>	<i>Spesification</i>
<i>Table travel (X and Y axis)</i>	350 mm × 250 mm (13.7"×9.8")
<i>Z axis travel</i>	220 mm (6.6")
<i>Auxiliary table travel (U dan V axis)</i>	80 mm × 80 mm (3.1"×3.1")
<i>Work table size (W×D)</i>	600 mm × 400 mm (23.6"×15.7")
<i>Work tank dimensions (W×D)</i>	895 mm × 650 mm (35.2"×25.5")
<i>Maximum height of work piece</i>	220 mm (8.6") <i>submerge</i>
<i>Maximum weight of work piece</i>	450 kg (990 lb) <i>submerge</i>
<i>Distance from floor to table top</i>	965 mm (38")
<i>Taper angle</i>	20°/80 mm (3.1")
<i>Wire tension</i>	300 g to 2300 g (0.66 lb to 5.06 lb)
<i>Wire speed feed (max)</i>	250 mm/sec (9.8 in/sec)
<i>Wire diameter</i>	0.15 to 0.30 mm ( 0.006 to 0.012 in)
<i>Wire spool volume (max)</i>	6 kg (13.2 lb)
<i>Machine tool dimension (W×D×H)</i>	1650 mm × 1900 mm × 2040 mm
<i>Machine total dimension (W×D)</i>	2250 mm ×2200 mm (88.56"×86.6")
<i>Machine tool weight</i>	2800 kg

**DIELECTRIC TANK**

<i>Item</i>	<i>Spesification</i>
<i>External dimensions (W×D×H)</i>	550 mm × 2200 mm ×1770 mm
<i>Weight (empty)</i>	230 kg (506 lb)
<i>Capacity</i>	530 l (138 gal)





<i>Deionizer</i>	<i>10 l (2.6 gal)</i>
<i>Filtering system</i>	<i>2 replaceable paper filter</i>

Sumber: *Instruction Manual Book Wirecut EDM CHMER CW32F*



Lampiran 2

**INTERVAL SETING FAKTOR PADA WIRE-EDM**

Tabel L-2.1 Seting Faktor pada Mesin Wire-EDM CHMER CW32F

Simbol	Nama faktor	Interval seting
OV	<i>Open voltage</i>	0~15 (70V~145V) 0 = 70V ; 10 = 120V 1 = 75V ; 11 = 125V 2 = 80V ; 12 = 130V 3 = 85V ; 13 = 135V 4 = 90V ; 14 = 140V 5 = 95V ; 15 = 145V 6 = 100V ; 7 = 105V ; 8 = 110V ; 9 = 115V ;
LP	<i>Low power</i>	0~30 LP = 0 DC rough cutting LP = 1 DC spark alignment LP = 2 DC fine cutting LP = 20 DC moderate cutting LP = 3~9 not available LP = 10 AC rough cutting LP = 11 AC spark alignment LP = 12 AC fine cutting LP = 30 AC moderate cutting LP = 13~29 super finish cutting
ON	<i>On time</i>	1~10 1 = 0.1 $\mu$ s 2 = 0.2 $\mu$ s 3 = 0.3 $\mu$ s 4 = 0.4 $\mu$ s 5 = 0.5 $\mu$ s 6 = 0.6 $\mu$ s 7 = 0.7 $\mu$ s 8 = 0.8 $\mu$ s 9 = 0.9 $\mu$ s 10 = 1 $\mu$ s
OFF	<i>Off time</i>	7~50 7 = 7 $\mu$ s...50 = 50 $\mu$ s
AN	<i>Arc on time</i>	1~7



AFF	<i>Arc off time</i>	3~50
SV	<i>Servo voltage</i>	10V~75V
FR	<i>Feedrate override</i>	0~50
WF	<i>Wire feed</i>	0~15 (70V~145V) 0 = 0 mm/sec ; 10 = 220 mm/sec 1 = 0 mm/sec ; 11 = 250 mm/sec 2 = 5 mm/sec ; 12 = 290 mm/sec 3 = 25 mm/sec ; 13 = 300 mm/sec 4 = 60 mm/sec ; 14 = 340 mm/sec 5 = 90 mm/sec ; 15 = 350 mm/sec 6 = 110 mm/sec ; 7 = 140 mm/sec ; 8 = 170 mm/sec ; 9 = 200 mm/sec ;
WT	<i>Wire tension</i>	0~15 (weak →strong)
WL	<i>Water flow</i>	0~7
FM	<i>Feedrate mode</i>	0~1
F	<i>Feedrate</i>	0~500

Sumber: *Instruction Manual Book Wirecut EDM CHMER CW32F*



Lampiran 3

**HASIL PENGUKURAN WAKTU Pengerjaan**

Tabel L-3.1 Hasil pengukuran waktu pengerjaan

No	Replikasi 1			Replikasi 2			Replikasi 3		
	menit	detik	waktu (min)	menit	detik	waktu (min)	menit	detik	waktu (min)
1	3	0.93	3.02	3	0.25	3.00	3	0.86	3.01
2	3	27.7	3.46	3	26.81	3.45	3	27.51	3.46
3	3	50.21	3.84	3	49.91	3.83	3	49.83	3.83
4	3	9.64	3.16	3	8.51	3.14	3	8.37	3.14
5	3	24.63	3.41	3	25.01	3.42	3	24.77	3.41
6	2	53.36	2.89	2	52.57	2.88	2	53.62	2.89
7	3	7.21	3.12	3	6.85	3.11	3	6.32	3.11
8	3	3.73	3.06	3	4.38	3.07	3	3.87	3.06
9	3	22.9	3.38	3	23.73	3.40	3	23.81	3.40
10	2	28.4	2.47	2	29.74	2.50	2	28.75	2.48
11	2	42.39	2.71	2	41.82	2.70	2	41.16	2.69
12	2	27.14	2.45	2	27.2	2.45	2	26.78	2.45
13	2	24.86	2.41	2	24.7	2.41	2	24.53	2.41
14	2	12.15	2.20	2	13.33	2.22	2	11.24	2.19
15	2	32.77	2.55	2	32.66	2.54	2	32.67	2.54
16	2	21.42	2.36	2	21.96	2.37	2	21.39	2.36
17	2	25.45	2.42	2	25.94	2.43	2	26.38	2.44
18	2	32.92	2.55	2	33.35	2.56	2	33.04	2.55
19	1	57.47	1.96	1	58.31	1.97	1	56.5	1.94
20	1	54.94	1.92	1	54.89	1.91	1	54.89	1.91
21	1	54.16	1.90	1	54.1	1.90	1	53.59	1.89
22	2	28.36	2.47	2	28.7	2.48	2	28.61	2.48
23	1	59.9	2.00	1	59.58	1.99	1	59.14	1.99
24	2	9.11	2.15	2	9.2	2.15	2	9.62	2.16
25	1	55.94	1.93	1	53.14	1.89	1	54.48	1.91
26	1	56.32	1.94	1	57.82	1.96	1	55.85	1.93
27	1	57.76	1.96	1	57.04	1.95	1	57.62	1.96



Lampiran 4

**PERHITUNGAN LAJU Pengerjaan BAHAN**

Tabel L-4.1 Hasil perhitungan laju pengerjaan bahan replikasi 1.

No	b ( $\mu\text{m}$ )	b (mm)	h (mm)	b x h ( $\text{mm}^2$ )	jarak (mm)	waktu (min)	$V_c$	$MRR = V_c \times b \times h$ ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )
1	350.00	0.35	15	5.25	10	3.02	3.32	17.41
2	336.67	0.34	15	5.05	10	3.46	2.89	14.59
3	330.00	0.33	15	4.95	10	3.84	2.61	12.90
4	340.00	0.34	15	5.10	10	3.16	3.16	16.14
5	343.33	0.34	15	5.15	10	3.41	2.93	15.10
6	343.33	0.34	15	5.15	10	2.89	3.46	17.82
7	336.67	0.34	15	5.05	10	3.12	3.20	16.19
8	340.00	0.34	15	5.10	10	3.06	3.27	16.65
9	350.00	0.35	15	5.25	10	3.38	2.96	15.52
10	353.33	0.35	15	5.30	10	2.47	4.04	21.43
11	360.00	0.36	15	5.40	10	2.71	3.69	19.95
12	350.00	0.35	15	5.25	10	2.45	4.08	21.41
13	350.00	0.35	15	5.25	10	2.41	4.14	21.75
14	350.00	0.35	15	5.25	10	2.20	4.54	23.84
15	360.00	0.36	15	5.40	10	2.55	3.93	21.21
16	350.00	0.35	15	5.25	10	2.36	4.24	22.27
17	356.67	0.36	15	5.35	10	2.42	4.13	22.07
18	360.00	0.36	15	5.40	10	2.55	3.92	21.19
19	370.00	0.37	15	5.55	10	1.96	5.11	28.35
20	370.00	0.37	15	5.55	10	1.92	5.22	28.97
21	370.00	0.37	15	5.55	10	1.90	5.26	29.17
22	360.00	0.36	15	5.40	10	2.47	4.04	21.84
23	350.00	0.35	15	5.25	10	2.00	5.00	26.27
24	360.00	0.36	15	5.40	10	2.15	4.65	25.09
25	360.00	0.36	15	5.40	10	1.93	5.18	27.95
26	350.00	0.35	15	5.25	10	1.94	5.16	27.08
27	360.00	0.36	15	5.40	10	1.96	5.10	27.51



Tabel L-4.2 Hasil perhitungan laju pengerjaan bahan replikasi 2.

No	b ( $\mu\text{m}$ )	b (mm)	h (mm)	b x h ( $\text{mm}^2$ )	jarak (mm)	waktu (min)	$V_c$	$\text{MRR} = V_c \times b \times h$ ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )
1	343.33	0.34	15	5.15	10	3.00	3.33	17.14
2	326.67	0.33	15	4.90	10	3.45	2.90	14.22
3	330.00	0.33	15	4.95	10	3.83	2.61	12.92
4	336.67	0.34	15	5.05	10	3.14	3.18	16.07
5	346.67	0.35	15	5.20	10	3.42	2.93	15.22
6	333.33	0.33	15	5.00	10	2.88	3.48	17.38
7	336.67	0.34	15	5.05	10	3.11	3.21	16.22
8	346.67	0.35	15	5.20	10	3.07	3.25	16.92
9	343.33	0.34	15	5.15	10	3.40	2.95	15.17
10	350.00	0.35	15	5.25	10	2.50	4.01	21.04
11	356.67	0.36	15	5.35	10	2.70	3.71	19.84
12	346.67	0.35	15	5.20	10	2.45	4.08	21.20
13	346.67	0.35	15	5.20	10	2.41	4.15	21.56
14	356.67	0.36	15	5.35	10	2.22	4.50	24.08
15	356.67	0.36	15	5.35	10	2.54	3.93	21.03
16	343.33	0.34	15	5.15	10	2.37	4.23	21.77
17	356.67	0.36	15	5.35	10	2.43	4.11	22.00
18	350.00	0.35	15	5.25	10	2.56	3.91	20.54
19	366.67	0.37	15	5.50	10	1.97	5.07	27.89
20	370.00	0.37	15	5.55	10	1.91	5.22	28.98
21	363.33	0.36	15	5.45	10	1.90	5.26	28.66
22	360.00	0.36	15	5.40	10	2.48	4.03	21.79
23	353.33	0.35	15	5.30	10	1.99	5.02	26.59
24	356.67	0.36	15	5.35	10	2.15	4.64	24.85
25	360.00	0.36	15	5.40	10	1.89	5.30	28.64
26	366.67	0.37	15	5.50	10	1.96	5.09	28.01
27	353.33	0.35	15	5.30	10	1.95	5.13	27.17



Tabel L-4.3 Hasil perhitungan laju pengerjaan bahan replikasi 3.

No	b ( $\mu\text{m}$ )	b (mm)	h (mm)	b x h ( $\text{mm}^2$ )	jarak (mm)	waktu (min)	$V_c$	$\text{MRR} = V_c \times b \times h$ ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )
1	346.67	0.35	15	5.20	10	3.01	3.32	17.25
2	330.00	0.33	15	4.95	10	3.46	2.89	14.31
3	326.67	0.33	15	4.90	10	3.83	2.61	12.79
4	333.33	0.33	15	5.00	10	3.14	3.19	15.93
5	340.00	0.34	15	5.10	10	3.41	2.93	14.94
6	340.00	0.34	15	5.10	10	2.89	3.46	17.62
7	350.00	0.35	15	5.25	10	3.11	3.22	16.91
8	350.00	0.35	15	5.25	10	3.06	3.26	17.13
9	340.00	0.34	15	5.10	10	3.40	2.94	15.01
10	360.00	0.36	15	5.40	10	2.48	4.03	21.78
11	353.33	0.35	15	5.30	10	2.69	3.72	19.73
12	353.33	0.35	15	5.30	10	2.45	4.09	21.67
13	346.67	0.35	15	5.20	10	2.41	4.15	21.59
14	350.00	0.35	15	5.25	10	2.19	4.57	24.00
15	363.33	0.36	15	5.45	10	2.54	3.93	21.42
16	350.00	0.35	15	5.25	10	2.36	4.24	22.28
17	360.00	0.36	15	5.40	10	2.44	4.10	22.13
18	353.33	0.35	15	5.30	10	2.55	3.92	20.78
19	366.67	0.37	15	5.50	10	1.94	5.15	28.33
20	366.67	0.37	15	5.50	10	1.91	5.22	28.72
21	370.00	0.37	15	5.55	10	1.89	5.28	29.32
22	360.00	0.36	15	5.40	10	2.48	4.04	21.80
23	353.33	0.35	15	5.30	10	1.99	5.04	26.69
24	363.33	0.36	15	5.45	10	2.16	4.63	25.23
25	360.00	0.36	15	5.40	10	1.91	5.24	28.30
26	356.67	0.36	15	5.35	10	1.93	5.18	27.71
27	360.00	0.36	15	5.40	10	1.96	5.10	27.55



Lampiran 5

HASIL PENGUKURAN LEBAR PEMOTONGAN

Tabel L-5.1 Hasil pengukuran lebar pemotongan.

No	Replikasi 1				Replikasi 2				Replikasi 3			
	P1	P2	P3	Mean	P1	P2	P3	Mean	P1	P2	P3	Mean
1	350	350	350	350.00	350	340	340	343.33	340	350	350	346.67
2	330	340	340	336.67	330	330	320	326.67	340	320	330	330.00
3	330	330	330	330.00	330	330	330	330.00	330	330	320	326.67
4	340	340	340	340.00	330	340	340	336.67	330	330	340	333.33
5	340	350	340	343.33	350	350	340	346.67	340	340	340	340.00
6	350	350	330	343.33	330	330	340	333.33	340	340	340	340.00
7	340	330	340	336.67	350	320	340	336.67	350	350	350	350.00
8	340	340	340	340.00	350	350	340	346.67	350	350	350	350.00
9	350	350	350	350.00	340	340	350	343.33	340	340	340	340.00
10	360	340	360	353.33	350	350	350	350.00	360	360	360	360.00
11	360	360	360	360.00	360	360	350	356.67	360	350	350	353.33
12	350	350	350	350.00	350	350	340	346.67	360	350	350	353.33
13	350	350	350	350.00	350	340	350	346.67	350	350	340	346.67
14	350	350	350	350.00	350	360	360	356.67	350	350	350	350.00
15	360	360	360	360.00	360	360	350	356.67	360	360	370	363.33
16	340	350	360	350.00	350	340	340	343.33	350	350	350	350.00
17	370	350	350	356.67	350	360	360	356.67	360	360	360	360.00
18	360	360	360	360.00	350	350	350	350.00	350	350	360	353.33
19	370	370	370	370.00	360	370	370	366.67	370	370	360	366.67
20	370	370	370	370.00	370	370	370	370.00	360	370	370	366.67
21	370	370	370	370.00	360	360	370	363.33	370	370	370	370.00
22	360	360	360	360.00	360	360	360	360.00	360	360	360	360.00
23	350	350	350	350.00	360	350	350	353.33	360	350	350	353.33
24	350	360	370	360.00	350	350	370	356.67	360	360	370	363.33
25	360	360	360	360.00	360	360	360	360.00	360	360	360	360.00
26	350	350	350	350.00	360	370	370	366.67	360	360	350	356.67
27	360	360	360	360.00	350	350	360	353.33	360	360	360	360.00



## PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN

Tabel L-6.1 Hasil pengukuran kekasaran permukaan replikasi 1.

Mat. Stamp.	Hasil Pengujian ( $\mu\text{m}$ )				Rata-rata
	1	2	3	4	
1.1	1.58	1.57	1.60	1.56	1.58
2.1	1.63	1.65	1.62	1.63	1.63
3.1	1.98	1.99	2.11	2.01	2.02
4.1	2.04	2.05	1.84	2.08	2.00
5.1	2.07	2.10	2.13	2.12	2.11
6.1	2.20	2.17	2.17	2.18	2.18
7.1	2.24	2.19	1.94	2.12	2.12
8.1	2.09	1.99	2.26	2.10	2.11
9.1	2.34	2.24	2.13	2.28	2.25
10.1	2.48	2.67	2.63	2.87	2.66
11.1	2.03	1.77	2.09	2.04	1.98
12.1	2.49	2.27	2.36	2.16	2.32
13.1	1.67	1.94	1.53	1.61	1.69
14.1	2.37	2.17	2.22	2.12	2.22
15.1	2.47	2.27	2.07	2.17	2.25
16.1	2.63	2.41	2.45	2.47	2.49
17.1	2.29	2.10	2.10	2.09	2.15
18.1	2.85	2.59	2.34	2.47	2.56
19.1	2.64	2.47	2.14	2.28	2.38
20.1	3.02	2.90	2.84	2.70	2.87
21.1	3.07	2.92	2.82	2.75	2.89
22.1	2.68	2.90	2.39	2.29	2.57
23.1	2.46	2.89	2.34	2.32	2.50
24.1	3.00	2.89	2.73	2.85	2.87
25.1	3.06	2.97	2.72	2.70	2.86
26.1	2.50	2.56	2.29	2.31	2.42
27.1	3.21	2.90	2.58	2.68	2.84



Tabel L-6.2 Hasil pengukuran kekasaran permukaan replikasi 2.

Mat.	Stamp.	Hasil Pengujian ( $\mu\text{m}$ )				Rata-rata
		1	2	3	4	
1.2		1.76	1.74	1.52	1.50	1.63
2.2		1.95	2.01	2.00	2.11	2.02
3.2		2.12	2.25	2.09	2.31	2.19
4.2		2.10	2.16	2.23	2.14	2.16
5.2		2.41	2.17	2.22	2.00	2.20
6.2		2.35	2.41	2.14	2.17	2.27
7.2		1.79	2.04	1.86	1.76	1.86
8.2		1.97	1.73	1.75	1.83	1.82
9.2		2.37	2.58	2.38	2.03	2.34
10.2		2.16	1.98	2.21	1.94	2.07
11.2		2.15	2.55	2.08	2.06	2.21
12.2		2.17	2.35	2.17	2.02	2.18
13.2		1.85	1.91	1.64	1.75	1.79
14.2		2.08	2.22	2.32	2.45	2.27
15.2		2.76	2.88	2.18	2.12	2.49
16.2		2.75	2.97	2.23	2.05	2.50
17.2		2.14	2.01	2.15	2.03	2.08
18.2		2.17	2.37	2.12	1.86	2.13
19.2		2.60	2.58	2.27	2.17	2.41
20.2		2.86	2.97	2.51	2.43	2.69
21.2		2.80	2.64	2.21	2.14	2.45
22.2		2.92	2.83	2.51	2.68	2.74
23.2		2.52	2.30	2.26	2.33	2.35
24.2		2.91	2.72	2.67	2.52	2.71
25.2		2.88	2.86	2.59	2.55	2.72
26.2		2.97	2.81	2.47	2.55	2.70
27.2		3.04	2.94	2.84	2.86	2.92



Tabel L-6.3 Hasil pengukuran kekasaran permukaan replikasi 3.

Mat.	Stamp.	Hasil Pengujian ( $\mu\text{m}$ )				Rata-rata
		1	2	3	4	
1.2		1.58	1.62	1.71	1.55	1.62
2.2		1.74	1.69	1.68	1.75	1.72
3.2		1.82	1.85	2.13	2.01	1.95
4.2		2.60	2.14	2.31	2.15	2.30
5.2		2.28	2.19	2.02	2.10	2.15
6.2		2.28	2.34	2.23	2.22	2.27
7.2		2.09	2.07	1.72	1.95	1.96
8.2		1.95	1.90	2.04	1.89	1.95
9.2		2.38	2.26	1.87	2.07	2.15
10.2		2.32	2.57	2.38	2.49	2.44
11.2		2.13	2.20	2.11	2.15	2.15
12.2		2.37	2.21	2.10	2.11	2.20
13.2		1.84	1.87	1.64	1.57	1.73
14.2		2.24	2.18	2.29	2.36	2.27
15.2		2.71	2.64	2.13	2.27	2.44
16.2		2.77	2.52	2.18	2.34	2.45
17.2		2.14	2.29	2.12	2.17	2.18
18.2		2.48	2.50	2.31	2.46	2.44
19.2		2.57	2.61	2.30	2.25	2.43
20.2		2.98	2.94	2.65	2.75	2.83
21.2		2.74	2.83	2.42	2.55	2.64
22.2		2.67	2.94	2.40	2.37	2.60
23.2		2.54	2.49	2.39	2.41	2.46
24.2		2.88	2.97	2.81	2.80	2.87
25.2		2.78	2.92	2.58	2.62	2.73
26.2		2.55	2.75	2.44	2.36	2.53
27.2		3.17	3.29	3.63	2.84	3.23



## ANALISA VARIANSI POSISI PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN



Gambar L-6.1 Posisi pengukuran kekasaran permukaan

### 1. Pengukuran kekasaran permukaan aritmatika ( $R_a$ )

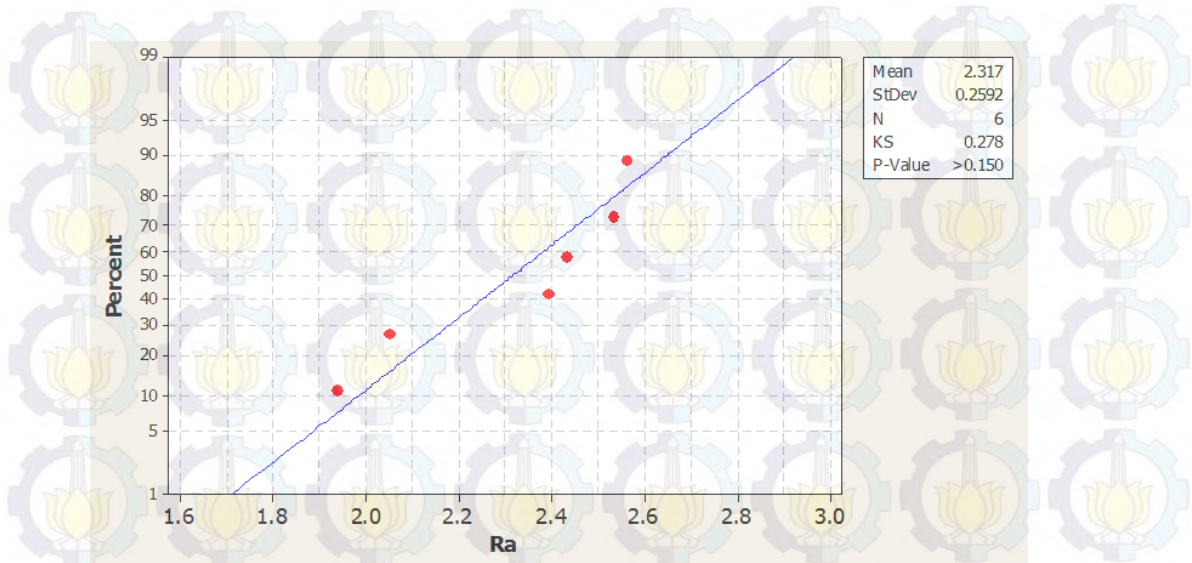
Nilai residual dari respon kekasaran permukaan aritmatika untuk masing-masing posisi pengukuran ditunjukkan pada tabel berikut:

Posisi pengukuran	Kekasaran permukaan ( $R_s$ )
Posisi 1	2.05
Posisi 1	2.56
Posisi 1	2.39
Posisi 2	2.43
Posisi 2	2.53
Posisi 2	1.94

### 2. Pengujian residual berdistribusi secara normal

Plot grafik untuk pengujian residual berdistribusi normal dengan menggunakan tes *Kolmogorov-Smirnov* ditunjukkan oleh gambar berikut:





Gambar L-6.1 Plot Probabilitas hasil pengukuran kekasaran permukaan ( $R_a$ ).

### 3. Analisa variansi

Hasil perhitungan analisa variansi adalah sebagai berikut:

#### One-way ANOVA: Ra versus Posisi pengukuran

Source	DF	SS	MS	F	P
Posisi pengukuran	1	0.0017	0.0017	0.02	0.895
Error	4	0.3343	0.0836		
Total	5	0.3359			

S = 0.2891    R-Sq = 0.50%    R-Sq(adj) = 0.00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev					
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----	
Posisi 1	3	2.3333	0.2597	(------*-----)	
Posisi 2	3	2.3000	0.3158	(------*-----)	
				2.00	2.25    2.50    2.75

Pooled StDev = 0.2891

Nilai *p-value* yang lebih besar dari 0,05 membuat hipotesis awal gagal ditolak sehingga dapat disimpulkan bahwa pengujian kekasaran permukaan pada posisi 1 dan posisi 2 adalah sama.



Lampiran 7

**HASIL PENGUKURAN TEBAL LAPISAN RECAST**

Tabel L-7.1 Hasil pengukuran tebal lapisan *recast* replikasi 1.

No	Replikasi 1									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Mean (µm)
1	1.55	1.55	1.24	1.93	1.28	2.25	1.88	2.82	2.19	1.85
2	1.25	0.95	1.26	2.53	1.9	2.22	1.18	0.89	0.89	1.45
3	1.56	4.37	3.12	3.09	3.09	4.63	1.75	2.8	3.5	3.10
4	3.23	2.26	3.23	2.42	2.17	2.17	1.37	2.05	3.02	2.44
5	1.92	3.2	3.52	2.43	3.65	3.65	2.37	3.26	3.55	3.06
6	4.26	5.57	4.59	3.47	4.1	5.99	4.52	4.52	5.17	4.69
7	4.23	6.35	4.23	4.14	4.45	4.14	2.46	2.11	4.22	4.04
8	3.17	3.8	2.58	3.67	4.28	3.67	2.06	3.09	3.09	3.27
9	4.12	5.7	3.43	4.28	3.97	3.06	3.23	4.52	4.2	4.06
10	4.56	3.59	4.56	3.29	5.69	4.79	7.17	6.86	5.61	5.12
11	2.89	2.57	3.86	1.65	1.65	1.98	1.31	1.97	2.29	2.24
12	3.02	3.02	3.36	1.55	4.34	3.41	2.38	3.06	4.08	3.14
13	9.66	13.04	14.49	9.99	14.05	14.99	13.15	14.95	15.24	13.28
14	18.49	11.65	10.39	10.89	8.99	10.62	15	12.55	16.39	12.77
15	9.53	8.27	9.53	8.83	9.5	7.82	8.79	7.81	8.14	8.69
16	5.81	3.97	2.14	2.76	3.38	3.07	4.7	3.76	5.02	3.85
17	4.39	5.37	4.88	6.45	5.73	5.01	6.98	6.48	7.98	5.92
18	13.78	13	6.76	6	7.44	11.53	11.4	7.01	9.94	9.65
19	2.51	3.91	4.18	2.84	2.84	2.52	1.92	2.16	2.4	2.81
20	0	0	0	1.67	1.19	0	0	0	2.24	0.57
21	0	3.55	1.77	2.46	2.7	2.46	1.72	1.97	3.93	2.28
22	7.92	9.35	8.4	10.35	7.35	7.9	7.76	6.61	6.9	8.06
23	7.75	5.68	7.49	7.03	6.53	9.04	4.72	9.44	7.45	7.24
24	12.72	11.54	11.78	9.87	11.69	11.43	9.48	11.79	11.1	11.27
25	7.44	6.24	7.92	5.99	6.54	7.9	6.52	7.73	9.42	7.30
26	6.79	7.76	4.85	7.94	7.94	9.33	8.64	9.81	9.34	8.04
27	6.3	9.19	6.83	4.96	5.79	7.44	6.18	9.27	6.46	6.94



Tabel L-7.2 Hasil pengukuran tebal lapisan *recast* replikasi 2.

No	Replikasi 2									Mean ( $\mu\text{m}$ )
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
1	0.95	1.59	2.23	1.6	1.6	1.92	1.83	0	0.92	1.40
2	0.61	0.54	0.52	0.61	1.53	0.92	0.35	1.73	1.04	0.87
3	2.5	2.81	2.18	2.6	2.6	3.24	3.47	3.15	2.84	2.82
4	2.26	2.58	2.58	3.17	3.8	3.48	2.57	3.21	3.86	3.06
5	2.23	2.55	4.45	3.7	3.4	4.32	5.41	4.14	2.23	3.60
6	3.93	4.54	4.84	3.93	4.23	3.93	3.43	5.93	3.43	4.24
7	3.18	3.71	3.01	2.22	3.8	2.85	3.1	2.55	3.41	3.09
8	2.58	2.53	2.22	1.98	2.98	2.32	2.3	2.63	2.3	2.43
9	4.14	6.05	4.77	3.84	3.52	4.16	3.93	3.93	5.24	4.40
10	4.1	4.44	6.42	4.97	4.34	4.34	4.96	4.96	4.63	4.80
11	2.25	3.21	5.78	2.76	3.69	3.38	2.99	3.99	3.99	3.56
12	2.75	4.58	3.36	2.82	2.19	3.74	3.43	3.43	3.43	3.30
13	12.28	9.97	13.04	18.33	11.53	12.71	10.73	14.09	12.08	12.75
14	11.7	10.55	11.02	12.48	11.96	11.7	17.72	12.22	18.64	13.11
15	9.95	8.61	8.61	7.81	7.89	9.35	8.7	9.34	9.99	8.92
16	5.17	3.88	7.43	7.83	5.22	4.89	4.43	4.75	4.43	5.34
17	4.16	7.39	7.16	8.19	8.62	8.93	7	11.83	7.73	7.89
18	6.48	9.71	10.46	8.22	10.1	10.1	9.3	13.02	8.56	9.55
19	2.07	2.66	2.36	2.79	1.95	2.79	2.57	3.14	3.43	2.64
20	0	0	0	0	1.69	0	0	0	3.14	0.54
21	0	0	3.63	0	2.7	0	0	3.9	0	1.14
22	6.67	6.67	5.68	6.25	7.81	6.88	6.21	6.98	6.73	6.65
23	8.93	7.48	8.68	5.3	7.96	5.01	6.63	6.63	7.37	7.11
24	9.36	12.36	8.35	9.85	11.37	9.1	9.93	8.63	10.07	9.89
25	6.79	10.45	8.62	7.97	6.52	9.17	5.96	7.25	9.58	8.03
26	12.57	8.48	8.77	10.36	9.3	9.3	7.72	8.65	9.57	9.41
27	5.26	8.77	5.85	6.58	6.9	4.93	8.38	7.73	6.44	6.76



Tabel L-7.3 Hasil pengukuran tebal lapisan *recast* replikasi 3.

No	Replikasi 3									Mean (µm)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
1	2.19	1.25	0	0.63	1.58	3.17	1.84	1.84	0.92	1.49
2	1.29	0.68	0.97	0.91	1.82	1.52	0.66	1.98	1.98	1.31
3	2.36	3.37	1.69	1.84	3.69	1.84	2.17	5.28	2.17	2.71
4	2.63	2.96	2.3	4.3	4.1	2.84	2.17	3.1	2.17	2.95
5	2.12	4.23	4.84	3.09	3.7	3.02	3.57	5.19	4.54	3.81
6	4.9	4.2	4.55	3.76	3.45	3.45	4.51	3.31	3.61	3.97
7	3.76	2.51	3.45	3.09	4.32	5.87	3.95	5.17	3.65	3.97
8	2.17	1.86	2.48	3.52	3.52	2.56	2.1	2.39	2.39	2.55
9	3.52	3.84	3.2	5.61	3.43	4.37	3.18	3.82	2.86	3.76
10	4.54	5.44	5.75	6.02	7.6	5.7	6.83	4.03	5.28	5.69
11	2.76	3.69	3.07	3.4	2.47	4.01	2.43	2.43	2.77	3.00
12	3.52	2.88	3.52	3.66	2.66	1.99	3.93	3.58	2.86	3.18
13	13.87	14.74	15.03	13.84	13.59	14.81	12.8	13.74	12.49	13.88
14	12.8	13.07	12.26	18.41	15.34	13.81	14.09	13.42	14.42	14.18
15	8.18	10.81	8.77	9.44	10.47	9.76	9.47	8.5	11.9	9.70
16	4.73	5.67	5.04	4.77	3.18	5.41	4.39	5.96	6.27	5.05
17	6.77	12.38	7.71	9.55	6.93	11.46	10.36	8.36	7.15	8.96
18	11.48	8.76	13	8.61	10.64	9.83	8.2	12.94	9.15	10.29
19	3.28	2.77	2.77	1.65	2.21	2.21	2.59	3.37	2.85	2.63
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
21	0	0	0	0	0	0	2.07	3.11	4.14	1.04
22	6.68	6.68	5.4	6.25	7.81	6.56	5.37	6.86	7.46	6.56
23	7.52	6.31	8.74	6.5	6.25	8.99	8.88	7.58	8.35	7.68
24	11.18	10.16	12.45	9.24	10.3	11.62	7.75	9.3	13.44	10.60
25	7.44	8.55	8.55	7.77	5.08	6.28	7.81	9.21	8.37	7.67
26	7.72	6.8	8.34	9.53	7.9	9.8	10.61	7.8	10.3	8.76
27	5.76	6.1	7.79	6.49	8.95	7.41	7.13	6.37	4.58	6.73



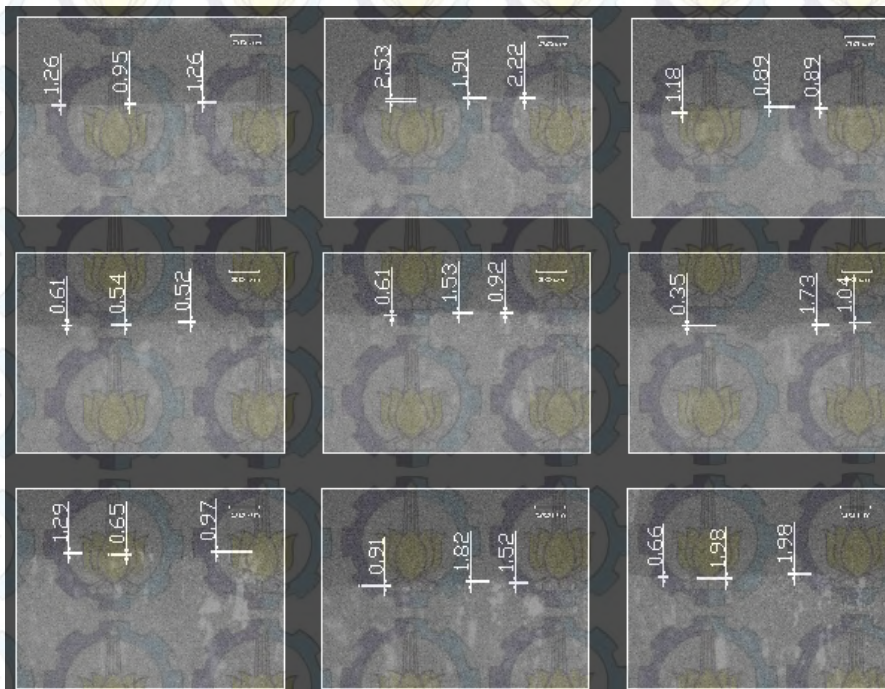
Lampiran 8

FOTO TEBAL LAPISAN RECAST

Eksperimen 1

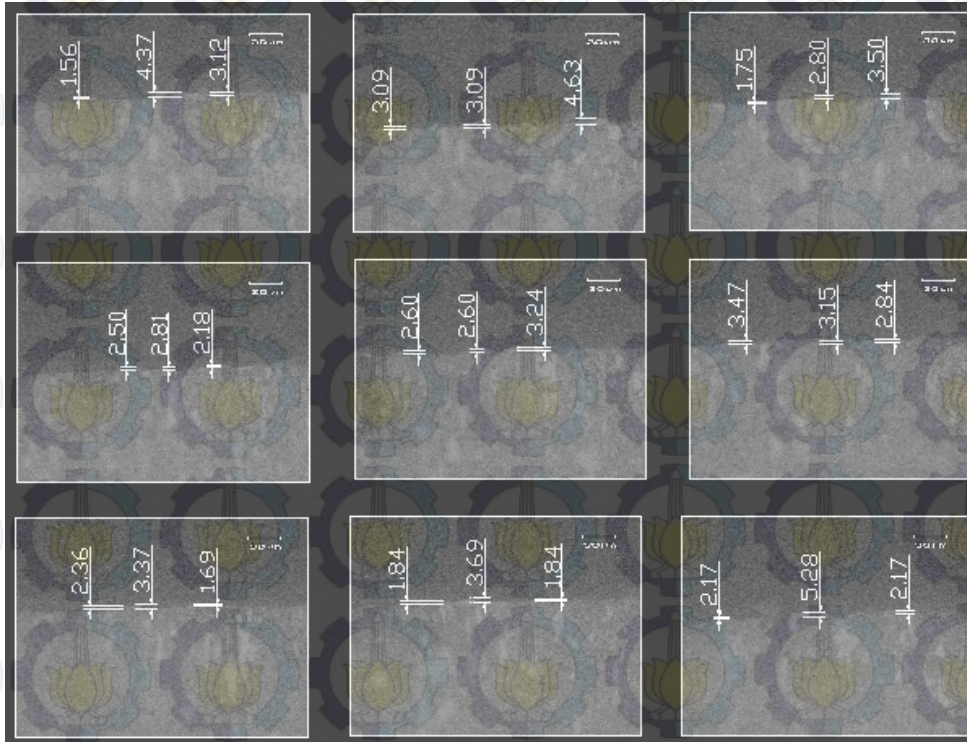


Eksperimen 2

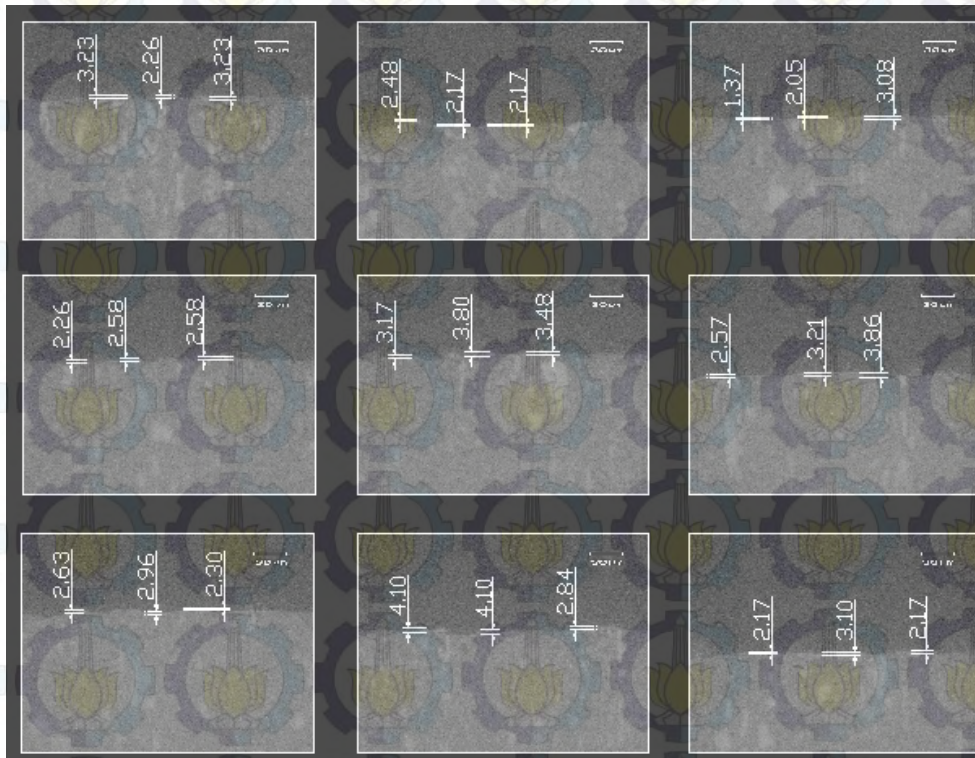




### Ekspirimen 3



### Ekspirimen 4

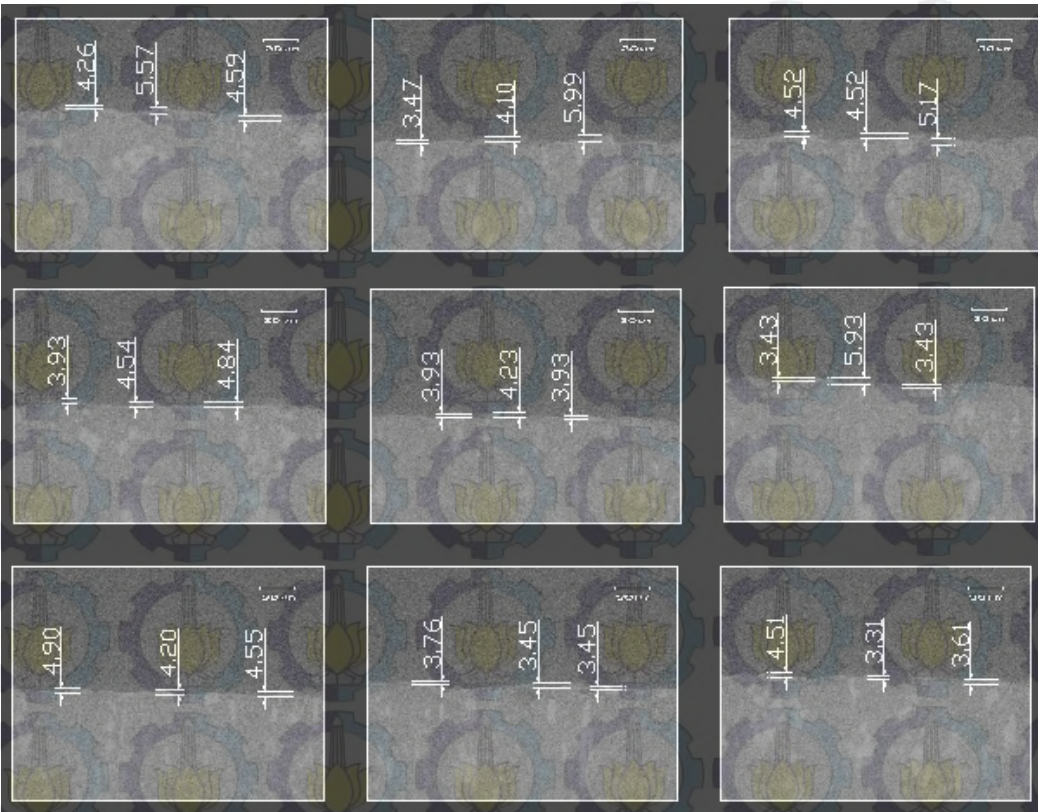




Eksperimen 5



Eksperimen 6





### Eksperimen 7



### Eksperimen 8

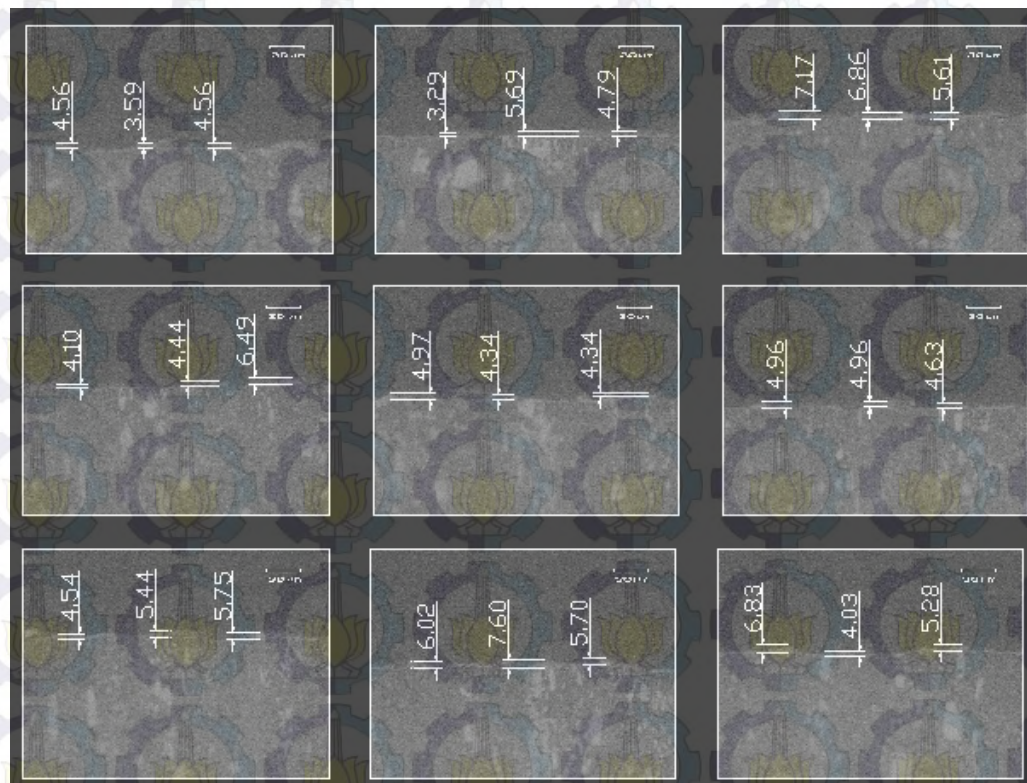




Ekspерimen 9



Ekspерimen 10





### Ekspimen 11



### Ekspimen 12





Ekspерimen 13



Ekspерimen 14





Ekspirimen 15

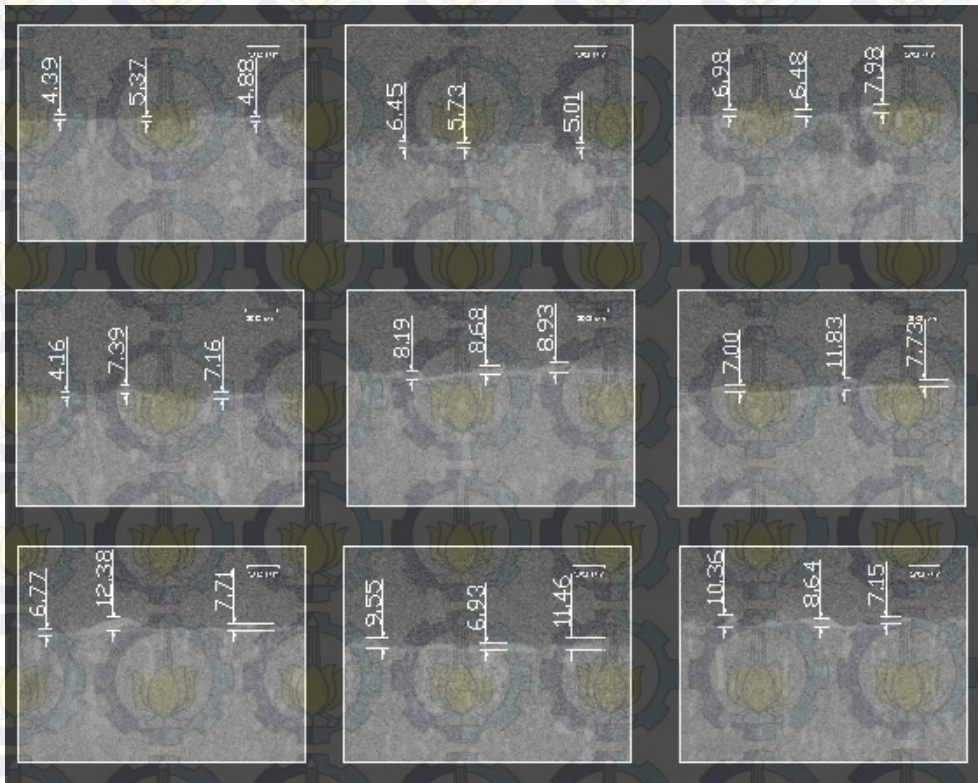


Ekspirimen 16





Ekspirimen 17

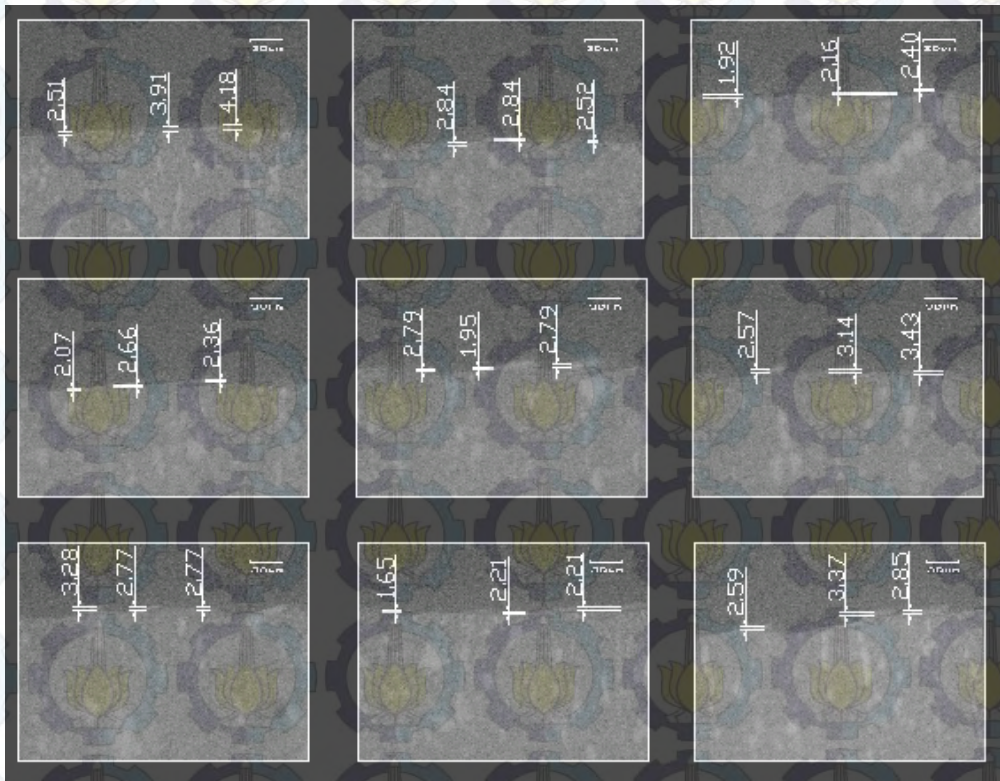


Ekspirimen 18





Ekspерimen 19



Ekspерimen 20





Ekspерimen 21



Ekspерimen 22





Ekspirimen 23

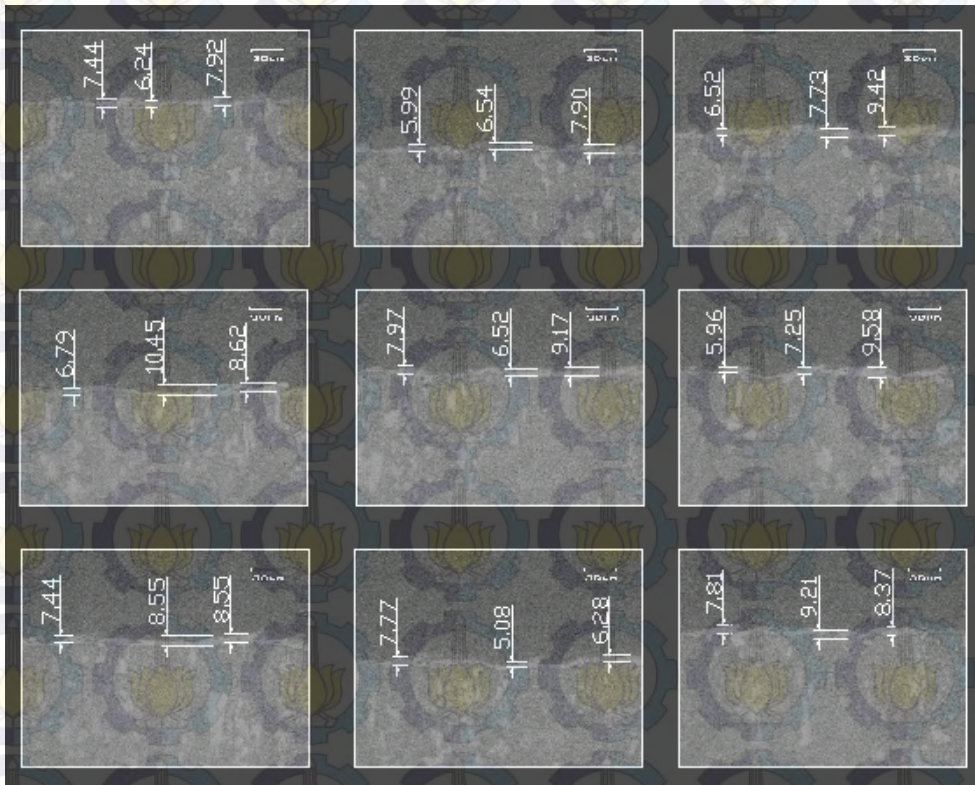


Ekspirimen 24

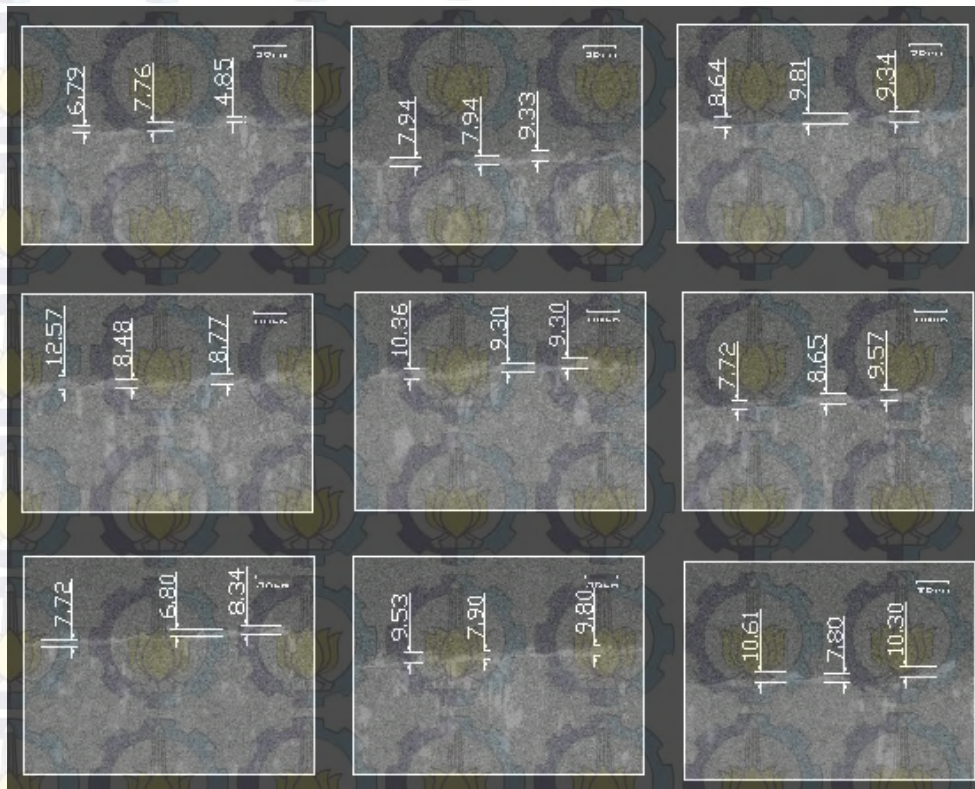




Ekspерimen 25

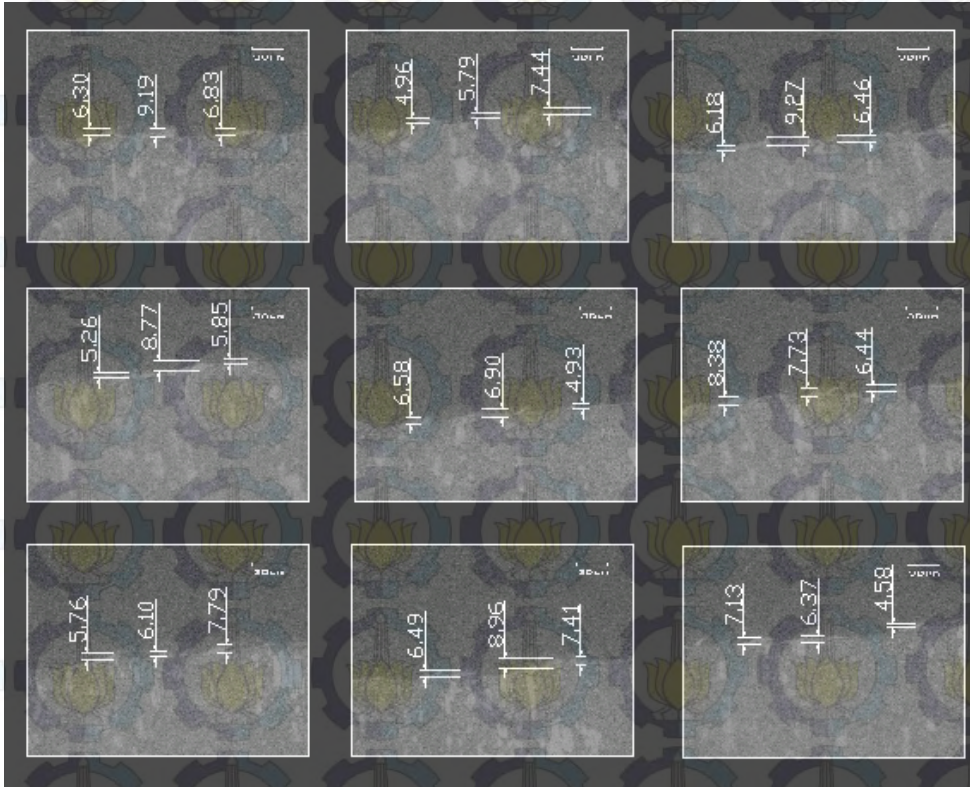


Ekspерimen 26





# Eksperimen 27





## HASIL EKSPERIMEN KONFIRMASI

Tabel L-9.1 Hasil eksperimen konfirmasi dengan lima replikasi.

Seting faktor	Laju pengerjaan bahan (m <sup>3</sup> /min)	Lebar pemotongan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)	Tebal lapisan <i>recast</i> (μm)
Kombinasi awal	17.93	353	2.05	9.12
	18.06	360	2.56	8.72
	17.76	353	2.39	8.64
	17.98	350	2.43	9.35
	16.93	357	2.53	9.27
Kombinasi optimum	16.76	340	2.19	1.97
	16.60	340	1.76	2.74
	16.57	340	1.89	2.55
	16.24	337	1.92	3.01
	16.22	330	1.87	2.97

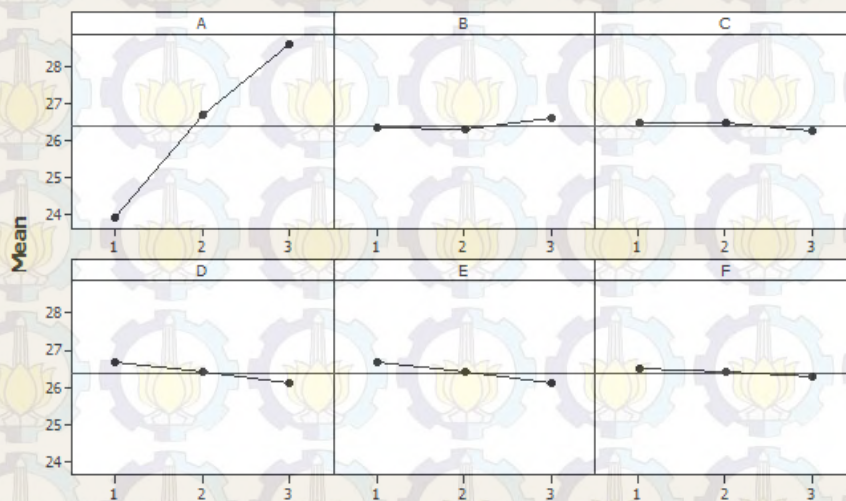


Lampiran 10

**Analisa respon individu laju pengerjaan bahan**

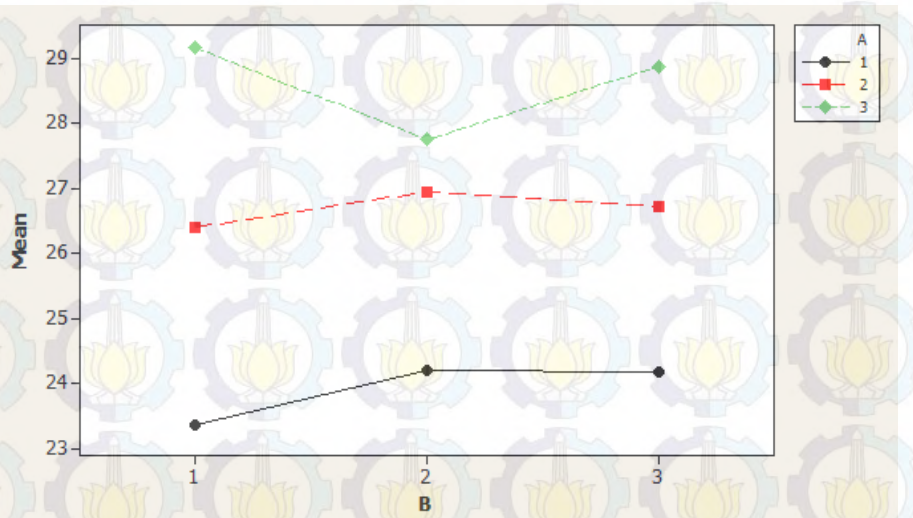
Tabel L-10.3 Rasio S/N respon laju pengerjaan bahan.

A	B	AXB(1)	AXB(2)	C	AXC(1)	AXC(2)	BXC(1)	D	E	BXC(2)	F	R 1	R 2	R 3	Rasio S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17.41	17.14	17.25	24.7443
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	14.59	14.22	14.31	23.1490
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	12.90	12.92	12.79	22.1916
1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	16.14	16.07	15.93	24.1065
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	15.10	15.22	14.94	23.5717
1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	17.82	17.38	17.62	24.9143
1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	16.19	16.22	16.91	24.3106
1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	16.65	16.92	17.13	24.5574
1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	15.52	15.17	15.01	23.6545
2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	21.43	21.04	21.78	26.6119
2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	19.95	19.84	19.73	25.9507
2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	21.41	21.20	21.67	26.6165
2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	21.75	21.56	21.59	26.7015
2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	23.84	24.08	24.00	27.5936
2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	21.21	21.03	21.42	26.5334
2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	22.27	21.77	22.28	26.8889
2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	22.07	22.00	22.13	26.8745
2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	21.19	20.54	20.78	26.3741
3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	28.35	27.89	28.33	29.0008
3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	28.97	28.98	28.72	29.2156
3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	29.17	28.66	29.32	29.2612
3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	21.84	21.79	21.80	26.7731
3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	26.27	26.59	26.69	28.4705
3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	25.09	24.85	25.23	27.9777
3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	27.95	28.64	28.30	29.0328
3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	27.08	28.01	27.71	28.8153
3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	27.51	27.17	27.55	28.7577

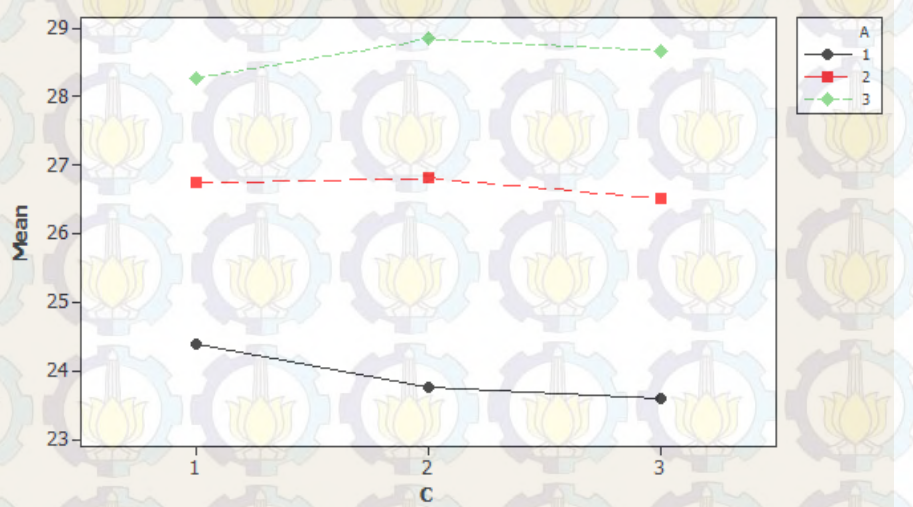




Gambar L10.1 Plot efek faktor utama terhadap rata-rata rasio S/N

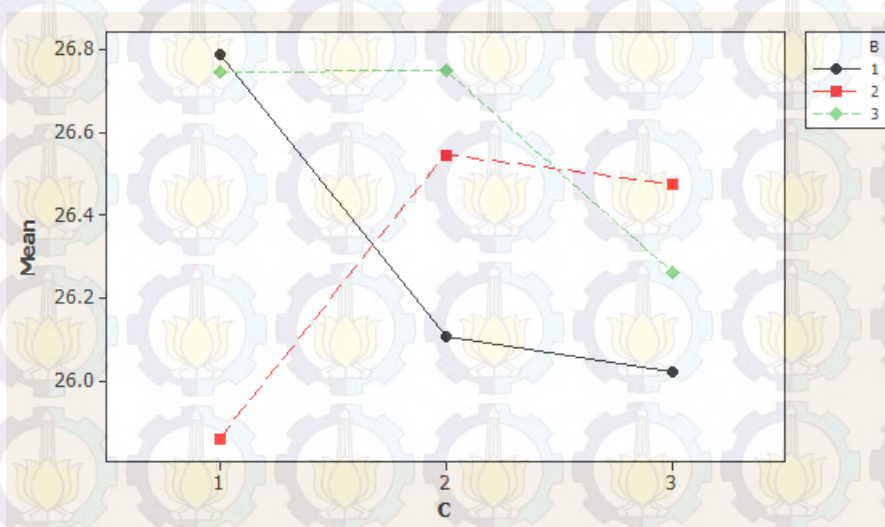


Gambar L10.2 Plot interaksi faktor A dengan faktor B terhadap rata-rata rasio S/N



Gambar L10.3 Plot interaksi faktor A dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N





Gambar L10.4 Plot interaksi faktor B dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N

Tabel 10.2 Analisis variansi laju pengerjaan bahan

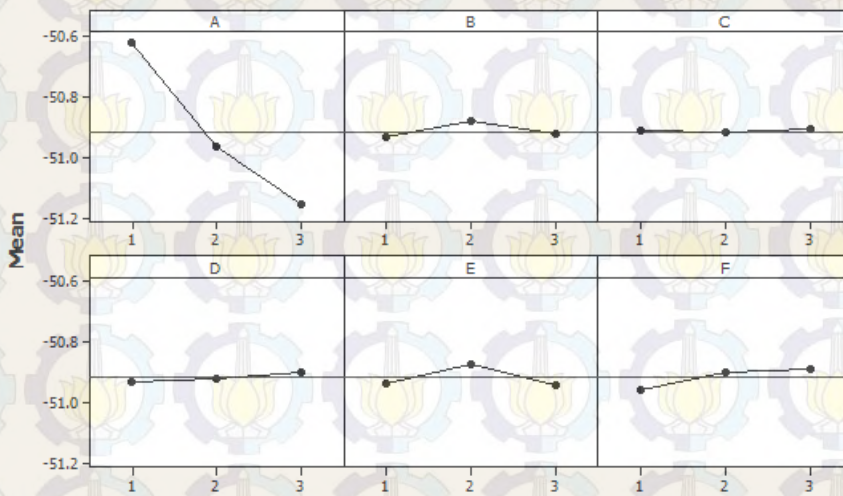
Sumber variasi	db	SS	MS	F <sub>hitung</sub>	: %
A	2	99.6120	49.8060	211.8117	88.37
A X B	4	4.6960	1.1740	9.9854	3.77
B X C	2	1.6130	0.8065	3.4298	1.02
D	2	1.4870	0.7435	3.1619	0.91
E	2	1.4940	0.7470	3.1768	0.91
Error	14	3.2920	0.2351		5.03
Total	26	112.1950			100.00



### Analisa respon individu lebar pemotongan

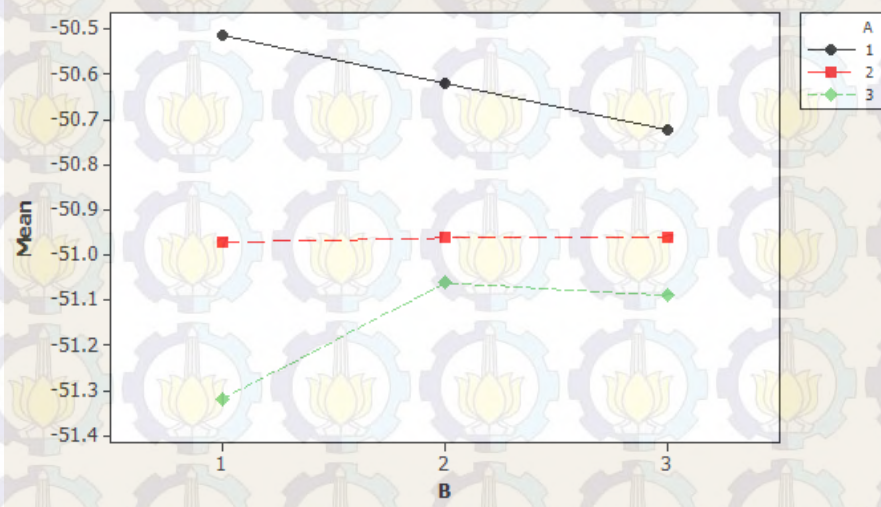
Tabel L-11.1 Rasio S/N respon lebar pemotongan.

A	B	AXB(1)	AXB(2)	C	AXC(1)	AXC(2)	BXC(1)	D	E	BXC(2)	F	R 1	R 2	R 3	Rasio S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	350.00	343.33	346.67	-50.7985
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	336.67	326.67	330.00	-50.4002
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	330.00	330.00	326.67	-50.3411
1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	340.00	336.67	333.33	-50.5443
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	343.33	346.67	340.00	-50.7146
1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	343.33	333.33	340.00	-50.6018
1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	336.67	336.67	350.00	-50.6594
1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	340.00	346.67	350.00	-50.7710
1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	350.00	343.33	340.00	-50.7430
2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	353.33	350.00	360.00	-50.9916
2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	360.00	356.67	353.33	-51.0455
2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	350.00	346.67	353.33	-50.8816
2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	350.00	346.67	346.67	-50.8261
2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	350.00	356.67	350.00	-50.9367
2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	360.00	356.67	363.33	-51.1263
2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	350.00	343.33	350.00	-50.8264
2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	356.67	356.67	360.00	-51.0724
2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	360.00	350.00	353.33	-50.9916
3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	370.00	366.67	366.67	-51.3118
3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	370.00	370.00	366.67	-51.3380
3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	370.00	363.33	370.00	-51.3120
3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	360.00	360.00	360.00	-51.1261
3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	350.00	353.33	353.33	-50.9364
3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	360.00	356.67	363.33	-51.1263
3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	360.00	360.00	360.00	-51.1261
3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	350.00	366.67	356.67	-51.0739
3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	360.00	353.33	360.00	-51.0726

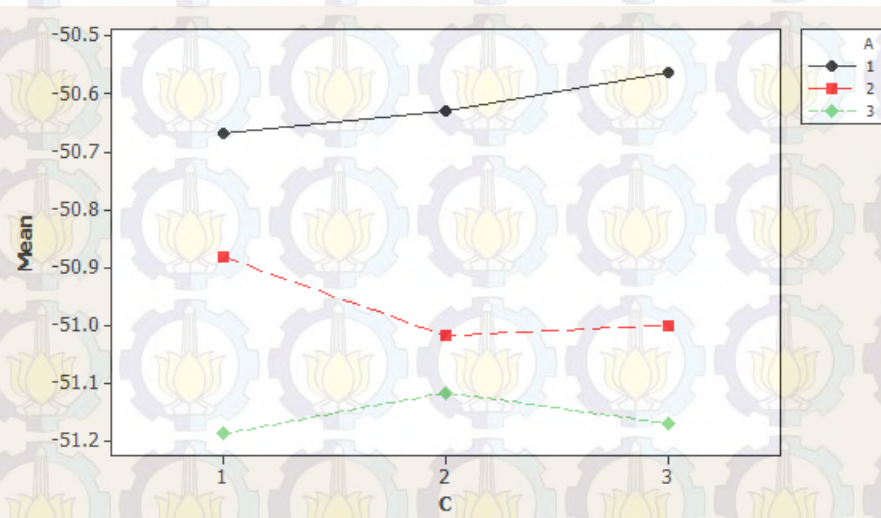


Gambar L11.1 Plot efek faktor utama terhadap rata-rata rasio S/N



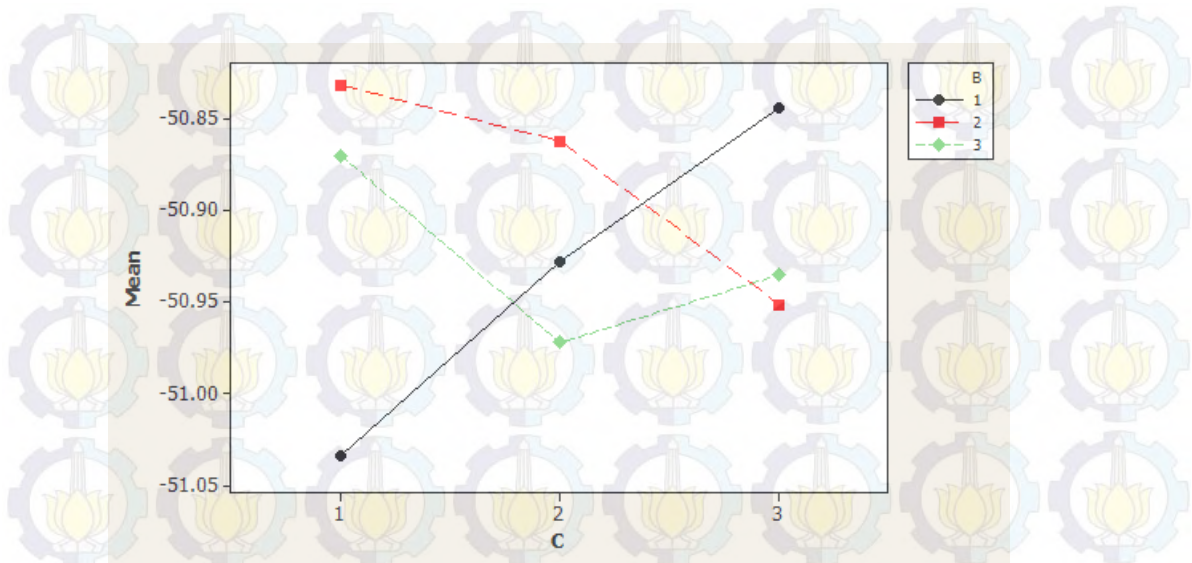


Gambar L11.2 Plot interaksi faktor A dengan faktor B terhadap rata-rata rasio S/N



Gambar L11.3 Plot interaksi faktor A dengan faktor c terhadap rata-rata rasio S/N





Gambar L11.4 Plot interaksi faktor B dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N

Tabel 11.2 Analisis variansi laju lebar pemotongan

Sumber variasi	db	SS	MS	F <sub>hitung</sub>	: %
A	2	1.3427	0.6713	60.8526	73.65
A X B	4	0.2296	0.0574	10.4055	11.57
A X C	2	0.0518	0.0259	2.3490	1.66
B X C	2	0.0756	0.0378	3.4250	2.98
WF	2	0.0551	0.0275	2.4968	1.84
Error	14	0.1545	0.0110		8.29
Total	26	1.7931			100.00

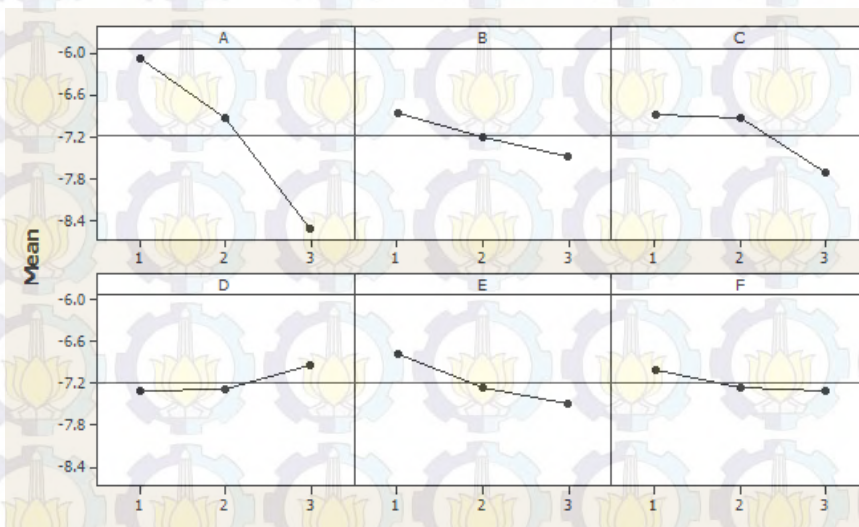


Lampiran 12

**Analisa respon individu kekasaran permukaan**

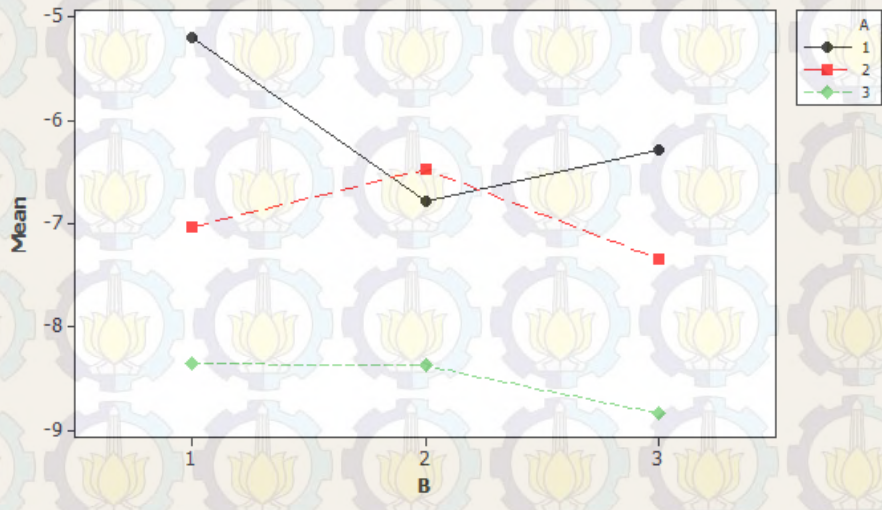
Tabel L-12.1 Rasio S/N respon kekasaran permukaan

A	B	AXB(1)	AXB(2)	C	AXC(1)	AXC(2)	BXC(1)	D	E	BXC(2)	F	R 1	R 2	R 3	Rasio S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.58	1.63	1.62	-4.2038
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1.63	2.02	1.72	-5.0860
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2.02	2.19	1.95	-6.2702
1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	2.00	2.16	2.30	-6.6760
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	2.11	2.20	2.15	-6.6536
1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2.18	2.27	2.27	-7.0000
1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2.12	1.86	1.96	-5.9497
1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	2.11	1.82	1.95	-5.8537
1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	2.25	2.34	2.15	-7.0266
2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	2.66	2.07	2.44	-7.6187
2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1.98	2.21	2.15	-6.5083
2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2.32	2.18	2.20	-6.9760
2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	1.69	1.79	1.73	-4.7884
2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	2.22	2.27	2.27	-7.0505
2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	2.25	2.49	2.44	-7.5731
2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	2.49	2.50	2.45	-7.8922
2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2.15	2.08	2.18	-6.5929
2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	2.56	2.13	2.44	-7.5447
3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2.38	2.41	2.43	-7.6286
3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	2.87	2.69	2.83	-8.9333
3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	2.89	2.45	2.64	-8.5096
3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	2.57	2.74	2.60	-8.4081
3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2.50	2.35	2.46	-7.7418
3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	2.87	2.71	2.87	-8.9850
3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	2.86	2.72	2.73	-8.8495
3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	2.42	2.70	2.53	-8.1287
3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2.84	2.92	3.23	-9.5513

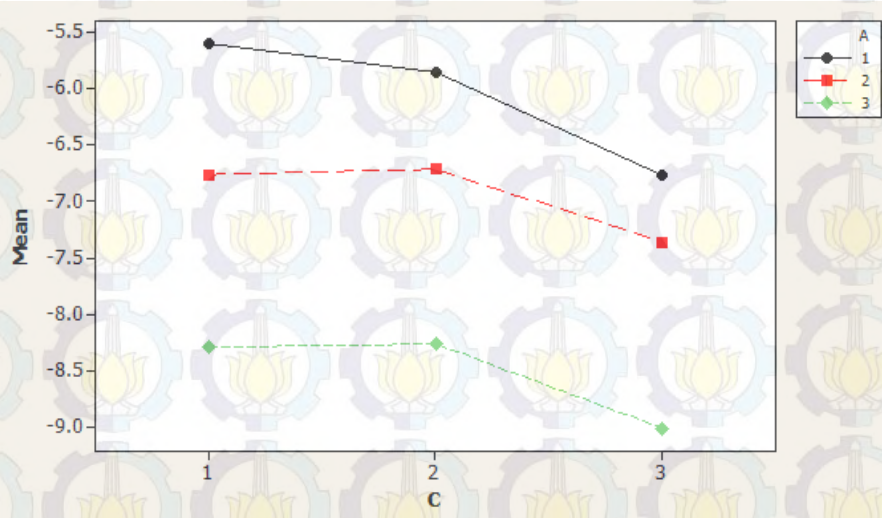




Gambar L12.1 Plot efek faktor utama terhadap rata-rata rasio S/N

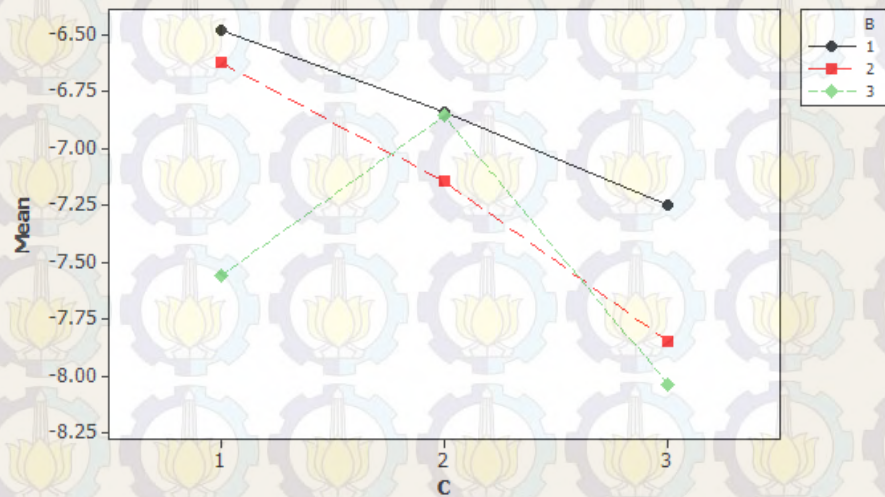


Gambar L12.2 Plot interaksi faktor A dengan faktor B terhadap rata-rata rasio S/N



Gambar L12.3 Plot interaksi faktor A dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N





Gambar L12.4 Plot interaksi faktor B dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N

Tabel 12.2 Analisis variansi laju kekasaran permukaan

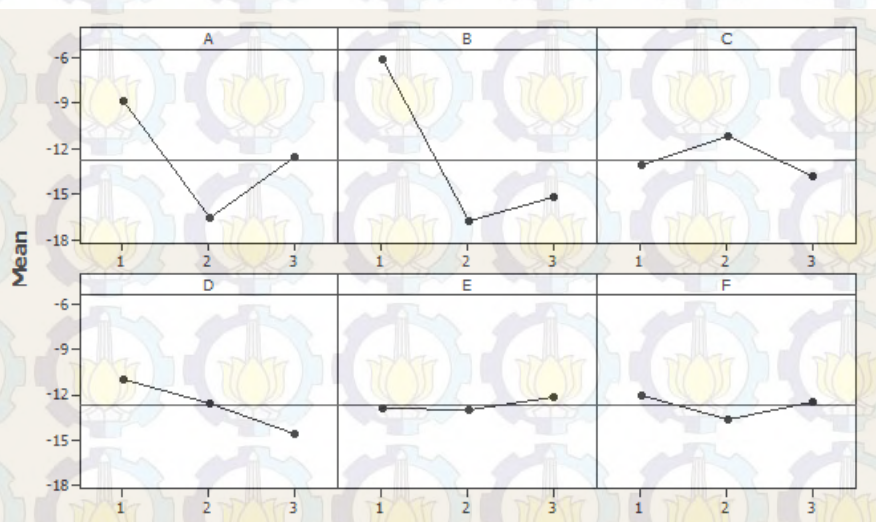
Sumber variasi	db	SS	MS	$F_{hitung}$	%
A	2	27.8565	13.9283	63.3308	60.38
B	2	1.8362	0.9181	4.1745	3.08
A X B	4	3.9008	0.9752	8.8683	7.62
C	2	3.8552	1.9276	8.7647	7.52
E	2	2.5521	1.2761	5.8021	4.65
Error	14	3.0790	0.2199		16.75
Total	26	45.4088			100.00



### Analisa respon individu tebal lapisan *recast*

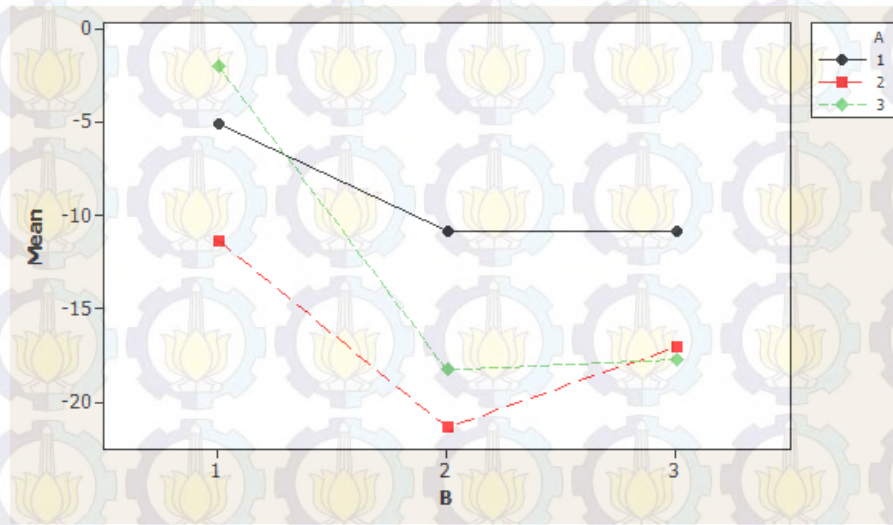
Tabel L-13.1 Rasio S/N respon tebal lapisan *recast*.

A	B	AXB(1)	AXB(2)	C	AXC(1)	AXC(2)	BXC(1)	D	E	BXC(2)	F	R 1	R 2	R 3	Rasio S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.85	1.40	1.49	-4.0568
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1.45	0.87	1.31	-1.8485
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3.10	2.82	2.71	-9.1963
1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	2.44	3.06	2.95	-9.0292
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	3.06	3.60	3.81	-10.8966
1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	4.69	4.24	3.97	-12.6913
1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	4.04	3.09	3.97	-11.4252
1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3.27	2.43	2.55	-8.8635
1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	4.06	4.40	3.76	-12.2121
2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	5.12	4.80	5.69	-14.3461
2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	2.24	3.56	3.00	-9.4965
2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3.14	3.30	3.18	-10.1202
2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	13.28	12.75	13.88	-22.4854
2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	12.77	13.11	14.18	-22.5215
2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	8.69	8.92	9.70	-19.1931
2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	3.85	5.34	5.05	-13.6007
2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	5.92	7.89	8.96	-17.7239
2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	9.65	9.55	10.29	-19.8562
3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2.81	2.64	2.63	-8.6121
3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	0.57	0.54	0.00	6.9242
3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	2.28	1.14	1.04	-4.0272
3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	8.06	6.65	6.56	-17.0560
3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	7.24	7.11	7.68	-17.3214
3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	11.27	9.89	10.60	-20.5080
3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	7.30	8.03	7.67	-17.7017
3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	8.04	9.41	8.76	-18.8458
3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	6.94	6.76	6.73	-16.6623

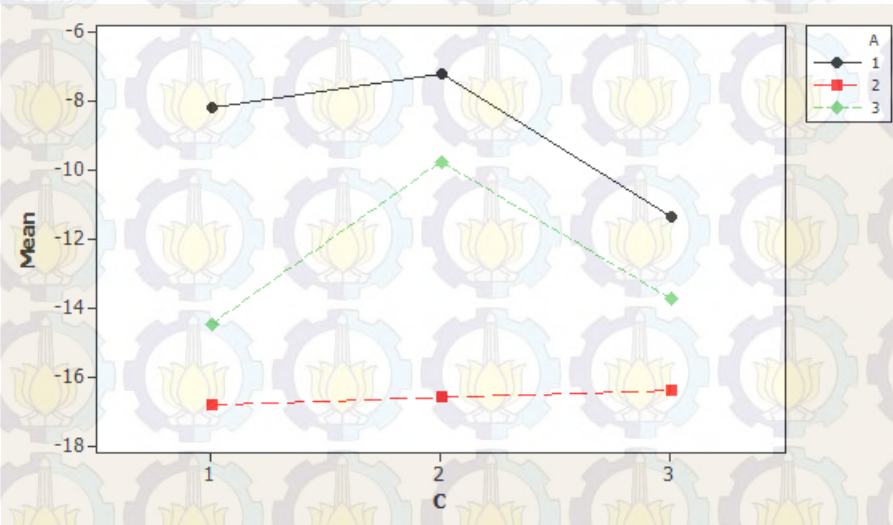




Gambar L13.1 Plot efek faktor utama terhadap rata-rata rasio S/N

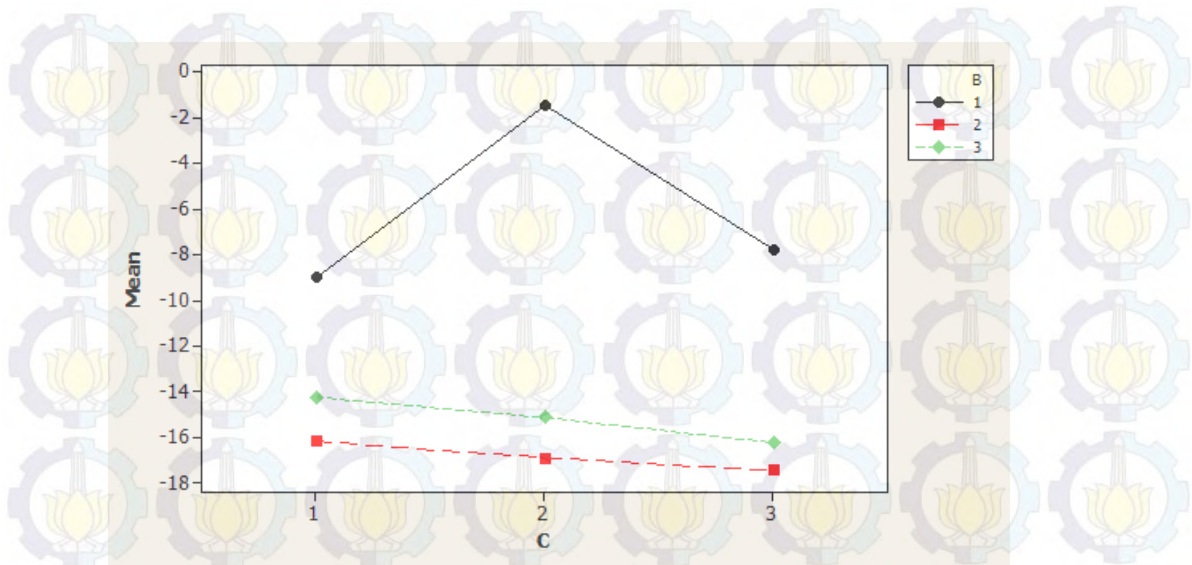


Gambar L13.2 Plot interaksi faktor A dengan faktor B terhadap rata-rata rasio S/N



Gambar L13.3 Plot interaksi faktor A dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N





Gambar L13.4 Plot interaksi faktor B dengan faktor C terhadap rata-rata rasio S/N

Tabel 13.2 Analisis variansi laju tebal lapisan *recast*

Sumber variasi	db	SS	MS	F <sub>hitung</sub>	<%
A	2	265.5200	132.7600	17.0768	20.39
B	2	605.7700	302.8850	38.9598	48.14
A X B	2	110.6300	55.3150	7.1151	7.75
C	2	34.1400	17.0700	2.1957	1.52
D	2	59.5000	29.7500	3.8267	3.58
B X C	2	41.7200	20.8600	2.6832	2.13
Error	14	108.8400	7.7743		16.49
Total	26	1226.1200			100.00



## DAFTAR PUSTAKA

Bagiasna, K., 1979, *Proses-proses Nonkonvensional*, Departemen Teknik Mesin ITB, Bandung.

Fong, T. Y. and Chen, C. F., 2007, Multi-objective optimisation on high-speed electrical discharge machining process using Taguchi fuzzy-based approach, *Journal of Materials and design*, Vol. 28, pp. 1159-1168.

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.

Gupta, A., Singh, H. and Aggrawal A., 2011, Taguchi-Fuzzy Multi Output Optimization (MOO) in High Speed CNC Turning of AISI P-20 Tool Steel, *Journal Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 6822-6828.

Guu, Y.H., Hocheng, H., Chou, C.Y., and Deng, C.S., 2003, "Effect of Electrical Discharge Machining on Surface Characteristics and Machining Damage of AISI D2 Tool Steel," *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. A358, pp. 37-43.

Himawan, A., 2008, *Optimasi Waktu Pengerjaan, Cutting Width, dan Kekasaran Permukaan Benda kerja pada Wire-Electrical Discharge Machining*, Tugas Akhir yang Tidak Dipublikasikan, Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Juhana, O. dan Suratman, M., 2000, *Menggambar Teknik Mesin dengan Standar ISO*, Pustaka Grafika, Bandung.

Kusumadewi S. dan Purnomo H., 2010, *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan, Edisi kedua*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Lu, H. S., Chen, J. Y. And Chung, Ch. T., 2008, The Optimal Cutting Parameter design of Rough Cutting Process in Side Milling, *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, Vol. 29, pp. 183-186.

Mahapatra, S. S. and Patnaik, A., 2007, Optimization of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process Parameters Using Taguchi Method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp. 911-925.

Montgomery, D. C., 1991, *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Othman, F., 2008, *EDM Wirecut of Titanium Alloy (Ti-6Al4V) Using Brass Coated Wire Electrode*, MasterThesis, Universiti Teknologi Malaysia, Johor.



Pandey, P. C. and Shan, H. S., 1980, *Modern Machining Processes*, Tata Mc Graw Hill Publishing Company Limited, New Delhi.

Park, S. H., 1996, *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Thomson Press, New Delhi.

Puri, Y.M. and Deshpande, N.V., 2004, Simultaneous Optimization of Multiple Quality Characteristics of WEDM Based on Fuzzy Logic and Taghuchi Technique, *Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, pp. 14.18.1-14.18.12.

Qibtiyah, E., 2008, *Optimasi Waktu Pengerjaan dan Tebal Lapisan Recast Permukaan Benda Kerja pada Wire-Electrical Discharge Machining*, Tugas Akhir yang Tidak Dipublikasikan, Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Rochim, T., 2001, *Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Soejanto, I., 2009, *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Sommer, C. and Somer, S., 2005, *Complete EDM Handbook*, Advanced Publishing Inc., Houston.

Vaani, T. and Hameedullah, M., 2005. Optimization Control Parameter In Electric Discharge Machining Of Hardened Steel With Copper Electroplated Aluminium Electrode. *Proceeding of the International Conference on Recent Advance in Mechanical & Material Engineering*. Malaysia.

Yan, M. T. and Lai, Y. P., 2007, Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 47, pp. 1686-1694.



## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 04 Desember 1970. Pendidikan yang dimiliki penulis diawali pada tingkat Sekolah Dasar yang ditamatkan pada tahun 1984 di SDN Rangkah 1 Surabaya. Kemudian Sekolah Lanjutan Tingkat Pertama dapat diselesaikan pada tahun 1987 di SMP Kepanjen Satu Surabaya dan Sekolah Lanjutan Tingkat Atas diselesaikan pada tahun 1990 pada jurusan A1 di SMAN 7 Surabaya. Kemudian penulis melanjutkan studi program Diploma 3 di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya ITS yang diselesaikan pada tahun 1993. Pada tahun 1999 menulis melanjutkan studi program Strata 1 di jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang, gelar Sarjana Teknik diraih pada tahun 2002. Penulis adalah staf pengajar di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya ITS mulai 2005 sampai sekarang. Atas berkat rahmat Allah SWT, pada tahun 2009 penulis dapat melanjutkan ke program magister di bidang studi Sistem Manufaktur pada jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya. Gelar Magister Teknik diraih pada tahun dengan menyelesaikan thesis yang berjudul “Optimasi Kekasaran Permukaan, Tebal Lapisan *Recast*, Lebar Pemotongan dan Laju Pengerjaan Bahan pada *Wire-EDM* menggunakan metode Taguchi dan Logika *Fuzzy*”. Penulis berharap penelitian yang dilakukan didalam tesis ini dapat bermanfaat dan berguna bagi masyarakat luas