



TESIS - TM 142501

OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES PEMESINAN *WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (WEDM)* BAJA PERKAKAS BUDERUS 2379 ISO-B DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY-FUZZY

Mega Diantoro
NRP 2112201201

DOSEN PEMBIMBING
Ir. BOBBY OEDY P. SOEPANGKAT, M.Sc., Ph.D
Ir. HARI SUBIYANTO, M.Sc

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



THESIS - TM 142501

**OPTIMIZATION OF MULTI RESPONSE OF WIRE ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING (WEDM) PROCESS OF BUDERUS 2379
ISO-B TOOL STEEL USING TAGUCHI-GREY-FUZZY**

Mega Diantoro
NRP 2112201201

ADVISOR

Ir. BOBBY OEDY P. SOEPANGKAT, M.Sc., Ph.D
Ir. HARI SUBIYANTO, M.Sc

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

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

**Oleh:
MEGA DIANTORO
NRP. 2112 201 201**

**Tanggal Ujian : 9 Juli 2015
Periode Wisuda : September 2015**

Disetujui oleh:

Arthy O. P. Soepangkat —

**1. Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)
NIP. 1953 0516 197803 1 001**

[Signature]

**2. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. (Pembimbing 2)
NIP. 1960 0623 198803 1 002**

[Signature]

**3. Dr.Ir. Suharto, DEA. (Penguji)
NIP. 1948 0911 198103 1 001**

[Signature]

**4. Ir. Winarto, DEA. (Penguji)
NIP. 1960 1213 198811 1 001**



Direktur Program Pascasarjana,

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

OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES PEMESINAN *WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (WEDM) BAJA PERKAKAS BUDERUS 2379 ISO-B DENGAN MENGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY-FUZZY

Nama Mahasiswa : Mega Diantoro
NRP : 2112201201
Pembimbing I : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRAK

Proses pemesinan *wire electrical discharge machining* (WEDM) telah banyak digunakan dalam dunia industri untuk proses pemotongan logam yang memiliki kekerasan tinggi serta tidak dapat diselesaikan dengan proses pemesinan konvensional. Pengaturan variabel-variabel proses WEDM yang tidak tepat dapat menyebabkan terjadinya kekerasan permukaan benda kerja yang tinggi, tingkat kepresisian yang rendah serta waktu proses pemesinan yang lama. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaturan level-level dari variabel-variabel proses WEDM yang tepat, agar dapat memenuhi karakteristik dari respon laju pengerjaan bahan, lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* secara serentak.

Suatu penelitian pada proses WEDM dilakukan pada baja perkakas Buderus 2379 ISO-B dengan menggunakan kawat elektroda *zinc coated brass wire*. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan lima variabel proses yaitu, *arc on time* (AN), *on time* (ON), *off time* (OFF), *open voltage* (OV) dan *servo voltage* (SV). Variabel proses *arc on time* memiliki dua level, yaitu sebesar 1 A dan 2 A. Variabel proses *on time* memiliki tiga level, yaitu sebesar 0,1 μ s, 0,3 μ s dan 0,5 μ s. Variabel *off time* memiliki tiga level, yaitu sebesar 15 μ s, 20 μ s dan 25 μ s. Variabel proses *open voltage* memiliki tiga level, yaitu sebesar 75 V, 85 V dan 95 V. Variabel proses *servo voltage* memiliki tiga level, yaitu sebesar 45 V, 50 V dan 55 V. Rancangan percobaan ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi dan berupa matriks ortogonal L_{18} ($2^1 \times 3^4$). Percobaan dilakukan dengan dua kali replikasi. Metode yang digunakan untuk mengoptimasikan karakteristik multi respon secara serentak adalah *grey relational analysis* (GRA) dan logika *fuzzy*.

Dari hasil penelitian ini didapatkan kombinasi variabel proses yang memberikan hasil yang maksimum untuk respon LPB serta hasil yang minimum untuk respon *kerf*, KP dan LR secara serentak yaitu (AN₁ON₁OFF₁OV₃SV₃). Kontribusi untuk masing-masing variabel proses AN, ON, OFF, OV dan SV dalam mengurangi variasi total respon secara berurutan adalah 2,23%, 76,50%, 7,27%, 4,99% dan 2,71%.

Kata kunci: kekasaran permukaan, lapisan *recast*, lebar pemotongan, Taguchi-grey-fuzzy, WEDM.

OPTIMIZATION OF MULTI-RESPONSE OF WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (WEDM) PROCESS OF BUDERUS 2379 ISO-B TOOL STEEL USING TAGUCHI-GREY-FUZZY METHOD

Nama Mahasiswa : Mega Diantoro
NRP : 2112201201
Pembimbing I : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRACT

In this study, the optimization of width of cutting (kerf), material removal rate (MRR), surface roughness (SR) and recast layer (RL) in WEDM was conducted by using Taguchi-Grey-Fuzzy logic method. The experiments has been conducted under varying arc on time, pulse on time, pulse off time, open voltage and servo voltage. An orthogonal array, signal-to-noise (S/N) ratio, grey relational analysis, grey-fuzzy reasoning grade and analysis of variance were employed to the study of the multiple performance characteristics. Experimental results have shown that machining performance characteristics in WEDM process of Buderus 2379 ISO-B tool steel can be improved effectively by using the combination of Taguchi method, grey relational analysis and fuzzy logic. “Larger-is-better” is the quality characteristic of material removal rate while the quality characteristic of width of cutting, surface roughness and recast layer is “smaller-is-better”. The result of experiments shown that pulse on time gives high contribution to reduce the total variation of the multiple responses followed by off time, open voltage, servo voltage and arc on time. The combination that gives maximum for material removal rate and minimum for width of cutting, surface roughness and recast layer could be obtained by using the values of arc on time, on time, off time, open voltage and servo voltage of 1 A, 1 μ s, 15 μ s, 95 V and 55 V.

Keywords: cutting width, material removal rate, recast layer, surface roughness, Taguchi-grey-fuzzy, WEDM

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat ALLAH SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberi kesempatan untuk dapat menyelesaikan penyusunan Tesis ini. Tesis dengan judul **“OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES PEMESINAN WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (WEDM) BAJA PERKAKAS BUDERUS 2379 ISO-B DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY-FUZZY”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan dan dorongan serta dedikasinya yang telah membantu penyusunan Tesis ini hingga selesai. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Teknik Mesin Program Pascasarjana FTI - ITS.
2. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing pertama.
3. Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen pembimbing kedua.
4. Bapak Dr.Ir. Suharto, DEA. dan Bapak Ir. Winarto, DEA. sebagai dosen penguji seminar tesis.
5. Bapak, mama dan adik-adik tercinta, yang telah banyak memberikan dukungan dan semangat serta doa restunya kepada penulis.
6. Kristina Indrayanthy tersayang, yang selalu setia mendampingi dan mendukung penulis dalam menempuh masa pendidikan.
7. Seluruh staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberi atmosfer kampus yang menyenangkan.
8. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS.
9. Teman-teman kuliah S2 Rekayasa dan Sistem Manufaktur Dika Aditya P. dan Hasriadi serta teman seperjuangan Moh. Abdul Wahid, Dian Ridlo dan AM. Mufarrih atas segala bantuan dan dukungannya.

10. Teman-teman Lab. Manufaktur Teknik Mesin-ITS.

11. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tesis ini masih banyak kekurangannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata penulis berharap semoga Tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur. Aamiin.

Surabaya, Agustus 2015

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

| | |
|-----------------------|------|
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | ii |
| KATA PENGHANTAR | iii |
| DAFTAR ISI | v |
| DAFTAR GAMBAR | viii |
| DAFTAR TABEL | ix |

| | |
|--------------------------------|----------|
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 4 |
| 1.2.1. Batasan Masalah | 4 |
| 1.2.2. Asumsi Penelitian | 5 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 5 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 6 |

| | |
|--|----------|
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | 7 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka | 7 |
| 2.2 Dasar Teori | 8 |
| 2.2.1 Prinsip Dasar Wire-EDM | 8 |
| 2.2.2 Mekanisme Pemotongan pada Wire-EDM | 10 |
| 2.2.3 Variabel Proses WEDM | 12 |
| 2.2.4 Pembilasan Geram (<i>flushing</i>) | 13 |
| 2.2.5 Jenis-jenis Kawat Elektroda | 14 |
| 2.3 Variabel Respon | 15 |
| 2.3.1 Kekasaran Permukaan | 15 |
| 2.3.2 Lebar Pemotongan (<i>kerf</i>) | 20 |
| 2.3.3 Laju Pengerjaan Bahan | 21 |
| 2.3.4 Lapisan Recast | 22 |
| 2.4 Metode Penelitian | 23 |
| 2.4.1 Metode Taguchi | 23 |
| 2.4.2 Rancangan Percobaan Taguchi | 24 |
| 2.4.3 Metode Taguchi- <i>grey-fuzzy</i> | 33 |
| 2.5 Interpretasi Hasil Percobaan | 40 |

| | |
|--|-----------|
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 45 |
| 3.1 Tahapan Penelitian | 45 |
| 3.2 Variabel-variabel Penelitian | 47 |
| 3.2.1 Variabel Proses | 47 |
| 3.2.2 Variabel Respon | 47 |
| 3.2.3 Variabel Konstan | 47 |
| 3.2.4 Variabel Gangguan | 48 |
| 3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian | 48 |
| 3.3.1 Bahan Penelitian | 48 |
| 3.3.2 Peralatan Penelitian | 48 |
| 3.4 Rancangan Percobaan | 52 |
| 3.4.1 Pengaturan Variabel pada Mesin WEDM | 52 |
| 3.4.2 Pemilihan Matriks Ortogonal | 53 |
| 3.5 Langkah-langkah Percobaan | 57 |
| 3.6 Pengambilan Data dan Pengukuran | 58 |
| 3.6.1 Pengambilan Data <i>Kerf</i> | 58 |
| 3.6.2 Pengambilan Data LPB | 59 |
| 3.6.3 Pengambilan Data KP | 59 |
| 3.6.4 Pengambilan Data Tebal LR | 60 |
| 3.7 Karakteristik Respon Optimum | 60 |
| BAB IV OPTIMASI MULTIRESPON DAN PEMBAHAN | 61 |
| 4.1 Pengambilan Data Hasil Penelitian | 61 |
| 4.2 Perhitungan Rasio S/N | 63 |
| 4.3 Normalisasi Rasio S/N | 64 |
| 4.4 Perhitungan Nilai <i>Deviation Sequence</i> | 65 |
| 4.5 Perhitungan <i>Grey Relational Coefficient</i> | 66 |
| 4.6 Fuzzyfication | 67 |
| 4.7 Penentuan <i>Fuzzy Rules</i> | 69 |
| 4.8 <i>Defuzzification</i> | 71 |
| 4.9 Hasil Optimasi | 73 |
| 4.10 Analisis Variansi dan Persen Kontribusi | 75 |
| 4.11 Pengujian Asumsi Residual | 77 |
| a. Uji Independen | 77 |
| b. Uji Identik | 77 |
| c. Uji Kenormalan | 78 |
| 4.12 Prediksi Respon Optimum | 79 |
| 4.13 Percobaan Konfirmasi | 80 |
| 4.14 Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum | 83 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.15 | Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum | 86 |
| 4.16 | Pembahasan | 89 |
| 4.16.1 | Pengaruh Variabel-variabel Proses terhadap Multirespon | 89 |
| 4.16.2 | Pengaruh Variabel-variabel Proses terhadap Individual | 89 |
| a. | Variabel proses <i>arc on time</i> (AN) | 89 |
| b. | Variabel proses <i>on time</i> (ON) | 90 |
| c. | Variabel proses <i>off time</i> (OFF) | 90 |
| d. | Variabel proses <i>open voltage</i> (OP) | 91 |
| e. | Variabel proses <i>servo voltage</i> (SV) | 91 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 93 |
| 5.1 | Kesimpulan | 93 |
| 5.2 | Saran | 94 |
| DAFTAR PUSTAKA | | |
| LAMPIRAN | | |

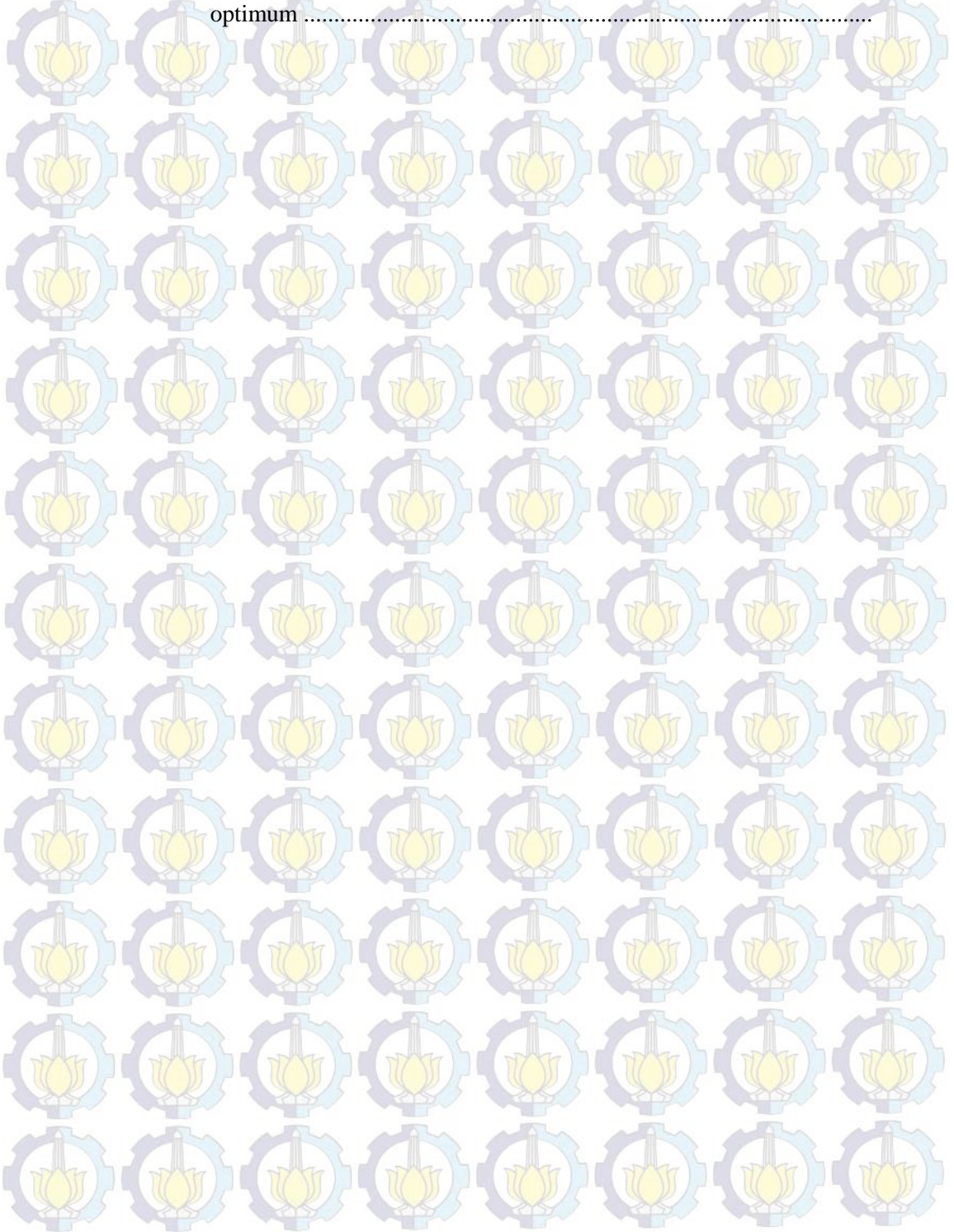
DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Skema proses pemesinan WEDM | 9 |
| Gambar 2.2 | Proses pembentukan bunga api listrik pada WEDM | 9 |
| Gambar 2.3 | Mekanisme proses pemotongan benda kerja pada WEDM | 11 |
| Gambar 2.4 | Proses <i>flushing</i> pada pemesinan WEDM | 13 |
| Gambar 2.5 | Penyimpangan rata-rata aritmatika | 15 |
| Gambar 2.6 | Parameter dalam profil permukaan | 16 |
| Gambar 2.7 | Definisi <i>Kerf</i> dan <i>Overcut</i> pada WEDM | 20 |
| Gambar 2.8 | Volume benda kerja yang terbuang pada proses WEDM | 21 |
| Gambar 2.9 | Lapisan-lapisan permukaan benda kerja pada proses WEDM..... | 22 |
| Gambar 2.10 | Pengukuran lapisan <i>recast</i> pada permukaan benda kerja pada proses WEDM | 23 |
| Gambar 2.11 | Langkah-langkah optimasi Taguchi- <i>grey-fuzzy</i> | 34 |
| Gambar 2.12 | Fungsi keanggotaan kurva segitiga..... | 38 |
| Gambar 2.13 | Fungsi keanggotaan kurva trapesium..... | 38 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir metode penelitian..... | 45 |
| Gambar 3.2 | Mesin WEDM CHMER 32GF..... | 49 |
| Gambar 3.3 | Nikon <i>measurescope</i> 20..... | 50 |
| Gambar 3.4 | <i>Scanning electron microscope</i> (SEM) Inspect s50 | 50 |
| Gambar 3.5 | Mitutoyo <i>Surftest</i> SJ-310..... | 51 |
| Gambar 3.6 | Skema proses pemotongan..... | 57 |
| Gambar 3.7 | Skema proses pengukuran <i>kerf</i> | 58 |
| Gambar 3.8 | Skema proses pengukuran KP..... | 59 |
| Gambar 3.9 | Skema proses pengukuran tebal LR..... | 60 |
| Gambar 4.1 | Fungsi keanggotaan dari masing-masing respon..... | 68 |
| Gambar 4.2 | Fungsi keanggotaan <i>grey fuzzy reasoning grade</i> | 68 |
| Gambar 4.3 | Ilustrasi <i>rules</i> | 72 |
| Gambar 4.4 | Plot nilai GFRG masing-masing level variabel proses..... | 74 |
| Gambar 4.5 | Plot ACF..... | 77 |
| Gambar 4.6 | Plot <i>residual versus observation order values</i> | 78 |
| Gambar 4.7 | Plot uji distribusi normal..... | 79 |
| Gambar 4.8 | Plot rata-rata percobaan konfirmasi dan interval keyakinan prediksi..... | 82 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran..... | 18 |
| Tabel 2.2 | Nilai Kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa pengerjaan..... | 19 |
| Tabel 2.3 | Matriks ortogonal standar untuk $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ | 27 |
| Tabel 2.4 | Tabel analisis variansi (ANOVA)..... | 29 |
| Tabel 2.5 | Penempatan rasio S/N..... | 36 |
| Tabel 2.6 | Tabel respon <i>grey fuzzy reasoning grade</i> | 40 |
| Tabel 3.1 | Spesifikasi mesin WEDM 32GF..... | 49 |
| Tabel 3.2 | Variabel-variabel konstan..... | 52 |
| Tabel 3.3 | Variabel-variabel proses dan masing-masing level | 53 |
| Tabel 3.4 | Total derajat kebebasan variabel-variabel respon | 53 |
| Tabel 3.5 | Rancangan percobaan Taguchi $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ | 54 |
| Tabel 3.6 | Urutan percobaan matriks ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ replikasi pertama..... | 55 |
| Tabel 3.7 | Urutan percobaan matriks ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ replikasi kedua..... | 56 |
| Tabel 4.1 | Data hasil percobaan..... | 62 |
| Tabel 4.2 | Data rasio S/N..... | 64 |
| Tabel 4.3 | Data normalisasi rasio S/N..... | 65 |
| Tabel 4.4 | <i>Deviation sequence</i> masing-masing respon | 66 |
| Tabel 4.5 | <i>Grey relational coefficient</i> masing-masing respon..... | 67 |
| Tabel 4.6 | <i>Fuzzy rules</i> | 69 |
| Tabel 4.7 | <i>Grey fuzzy reasoning grade</i> (GFRG)..... | 73 |
| Tabel 4.8 | Rata-rata nilai GFRG pada masing-masing level..... | 74 |
| Tabel 4.9 | Kombinasi variabel proses respon optimum..... | 75 |
| Tabel 4.10 | ANOVA dan kontribusi GFRG..... | 76 |
| Tabel 4.11 | Hasil respon percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum..... | 81 |
| Tabel 4.12 | Rasio S/N percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum..... | 81 |
| Tabel 4.13 | GRC dan GFRG percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum..... | 81 |
| Tabel 4.14 | Hasil uji kenormalan data pada kombinasi awal..... | 83 |
| Tabel 4.15 | Hasil uji kenormalan data pada kombinasi optimum..... | 83 |
| Tabel 4.16 | Hasil uji kesamaan variasi..... | 84 |
| Tabel 4.17 | Hasil uji kesamaan rata-rata..... | 85 |
| Tabel 4.18 | Pengaturan level kombinasi awal..... | 86 |

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 4.19 | Respon percobaan kondisi awal..... | 86 |
| Tabel 4.20 | Rasio S/N kombinasi awal..... | 87 |
| Tabel 4.21 | GRC dan GFRG pada kombinasi awal..... | 87 |
| Tabel 4.22 | Perbandingan GFRG kondisi awal dan kondisi optimum..... | 87 |
| Tabel 4.23 | Perbandingan respon individu pada kondisi awal dan kondisi optimum | 88 |





BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini proses pemesinan non-konvensional telah banyak digunakan dalam industri manufaktur untuk proses pemotongan logam dengan menggunakan logam yang memiliki kekerasan tinggi, serta memiliki kendala untuk diselesaikan dengan proses pemesinan konvensional. *Wire electrical discharge machining* (WEDM) adalah salah satu proses pemesinan non-konvensional yang saat ini banyak dikembangkan. WEDM memiliki kemampuan yang cukup luas dalam proses pemotongan logam sehingga aplikasi dalam industri manufaktur cukup luas, seperti industri *aerospace*, otomotif, medis dan pembuatan *die-mould*. WEDM mampu menghasilkan benda kerja dengan kualitas seperti keakuratan dimensi dan tingkat kepresisian yang tinggi, serta kekasaran permukaan benda kerja yang rendah.

WEDM adalah suatu proses pemotongan logam yang memanfaatkan energi termal yang berasal dari loncatan bunga api listrik yang disebabkan adanya perbedaan tegangan antara elektroda dengan benda kerja yang bersifat konduktif didalam cairan dielektrik. Sebagai elektroda digunakan kawat yang berbentuk silinder dengan diameter tertentu untuk memotong benda kerja. Proses WEDM tidak dipengaruhi oleh sifat mekanik benda kerja, tetapi dipengaruhi oleh titik lebur benda kerja. Loncatan bunga api listrik akan melelehkan sebagian kecil dari benda kerja, dan lelehan benda kerja tersebut akan membentuk geram yang sebagian akan terbawa keluar oleh cairan dielektrik, dan sebagian geram yang tertinggal akan mengeras dipermukaan benda kerja sebagai lapisan *recast*. Lapisan ini bersifat sangat keras dan getas, sehingga dapat menyebabkan menurunnya ketangguhan dan ketahanan suatu material (Zeilmann dkk., 2013).

Buderus 2379 ISO-B adalah suatu jenis baja perkakas yang memiliki ketahanan yang tinggi terhadap keausan dan memiliki stabilitas yang tinggi dalam pengerasan. Kekerasan baja Buderus 2379 ISO-B berkisar antara 59 HRC hingga 60 HRC setelah mengalami proses perlakuan panas. Dalam aplikasinya, baja Buderus 2379 ISO-B sering digunakan sebagai material untuk pembuatan *highly*



stressed plastic moulds untuk penekanan cetakan dengan kekerasan tinggi dan tegangan *abrasive, blanking dies* untuk *punch, shearing blades* dan *dies* dengan ketebalan hingga 6 mm, sehingga memiliki permukaan yang halus dan kepresisian yang tinggi.

Kinerja atau performansi yang penting dari WEDM pada umumnya dinyatakan oleh lebar pemotongan (*kerf*), laju pengerjaan bahan (LPB), kekasaran permukaan (KP) dan tebal lapisan *recast* (LR). *kerf* menentukan tingkat keakurasian dimensi benda kerja yang dihasilkan. LPB sangat erat kaitanya dengan laju produksi dari suatu proses pemesinan. KP merupakan karakteristik kualitas yang penting untuk hasil akhir dari proses pemesinan (Tosun dkk., 2004). Sedangkan LR berpengaruh terhadap sifat mekanis dari permukaan benda kerja.

Proses WEDM dipengaruhi oleh variabel-variabel proses yang digunakan, diantaranya adalah *pulse on time, pulse off time, open voltage, feed rate override, wire feed, servo voltage, wire tension* dan *flushing pressure*. Kumar dan Singh (2012) menyatakan bahwa nilai LPB meningkat dengan meningkatnya nilai variabel *pulse on time*, serta menurunnya nilai variabel *pulse off time* dan *open voltage*. Nilai KP menurun dengan menurunnya nilai variabel *pulse on time, open voltage* dan *wire feed*. Untuk mencapai respon yang optimum, maka penentuan variabel-variabel proses harus dirancang dengan tepat. Hal ini bertujuan agar mengurangi proses coba-coba, sehingga waktu dan biaya proses pemesinan dapat diminimalkan. Metode Taguchi adalah salah satu metode yang digunakan untuk merancang percobaan dalam sebuah penelitian. Untuk melakukan optimasi multi respon secara serentak dapat menggunakan gabungan metode Taguchi dengan metode yang lain seperti *grey relational analysis (GRA), fuzzy logic, TOPSIS, artificial neural network (ANN)*.

Penelitian yang mengangkat permasalahan tentang optimasi proses pemesinan WEDM terhadap respon KP dan *kerf* telah dilakukan. Durairaj dkk. (2013) meneliti pengaruh variabel-variabel proses seperti *gap voltage, wire feed, pulse on time* dan *pulse off time* terhadap respon KP dan *kerf*. Variabel-variabel proses tersebut masing-masing memiliki empat level. Benda kerja dan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah *stainless steel 304* dan kawat *zinc coated brass wire* dengan diameter 0.25 mm. Rancangan percobaan yang



digunakan adalah Taguchi dengan matriks ortogonal L_{16} serta *grey relational analysis* (GRA) digunakan sebagai metode optimasi multi respon. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa *gap voltage* memiliki kontribusi sebesar 6.4%, *wire feed* memiliki kontribusi sebesar 20,9%, *pulse on time* memiliki kontribusi sebesar 55.19%, *pulse off time* memiliki kontribusi sebesar 17,43% terhadap total variasi dari variabel respon yang diamati secara serentak.

Penelitian pada proses WEDM dengan variabel respon KP dan integritas permukaan benda kerja (IPBK) telah dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi (Hassan dkk., 2009). Variabel-variabel proses yang digunakan adalah *pulse on time* dan *pulse current* dengan masing-masing variabel memiliki tiga level. Rancangan percobaan yang digunakan adalah matriks ortogonal L_9 . Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah baja AISI 4140 dengan elektroda kawat kuningan berdiameter 0,1-0,33 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatnya nilai *pulse on time* dan *pulse current* berbanding lurus terhadap variabel respon KP maupun kedalaman dari *microcracks* dan *microvoids*.

Penelitian tentang optimasi multi respon tebal LR dan KP pada proses pemesinan WEDM juga telah dilakukan oleh Rupajati (2013). Bahan yang digunakan adalah baja perkakas AISI H13 dengan kekerasan mencapai 44 HRC dan menggunakan elektroda kawat kuningan berdiameter 0,25 mm. Rancangan percobaan menggunakan metode Taguchi dengan matriks ortogonal L_{18} . Metode yang digunakan untuk mengoptimasi karakteristik multi respon secara serentak adalah logika *fuzzy*. Variabel-variabel proses yang divariasikan adalah *arc on time*, *on time*, *off time*, *open voltage* dan *servo voltage*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel proses *on time* memiliki kontribusi sebesar 43,27%, *open voltage* sebesar 19,45%, *servo voltage* sebesar 15,64%, *arc on time* sebesar 11,66% dan *off time* sebesar 3,68% dalam mengurangi total variasi respon LR dan KP.

Penelitian sebelumnya juga dilakukan oleh Lusi (2013) untuk melakukan pengaturan variabel-variabel proses pada pemesinan WEDM yang bertujuan untuk mengoptimalkan LPB, *kerf* dan KP secara serentak. Bahan yang digunakan adalah baja perkakas SKD 61 dengan kekerasan mencapai 44 HRC. Kawat kuningan berdiameter 0.25 mm digunakan sebagai elektroda. Optimasi dilakukan



dengan menggunakan metode *Taguchi-Grey-Fuzzy*. Variabel-variabel proses yang divariasikan adalah *on time*, *off time*, *open voltage*, *arc on time* dan *servo voltage*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel-variabel proses yang memiliki kontribusi terbesar dalam mengurangi variasi total respon LPB, *kerf* dan KP secara serentak berturut-turut adalah *on time*, *servo voltage*, *open voltage* dan *arc on time*, yaitu sebesar 46,25%, 17,28% , 16,88% dan 1,55%.

Berdasarkan evaluasi dari penelitian-penelitian yang sudah dilakukan terdahulu, penelitian tentang optimasi pengaturan variabel-variabel pada proses pemesinan WEDM masih perlu dilakukan dengan menggunakan baja perkakas Buderus 2379 ISO-B dengan *zinc coated brass-wire* digunakan sebagai kawat elektroda dengan diameter 0.25 mm. Dengan variabel proses yang digunakan *on time*, *off time*, *arc on time*, *open voltage* dan *servo voltage* dalam menghasilkan respon LPB yang maksimum serta menghasilkan respon KP, *kerf* dan tebal LR yang minimum. Rancangan percobaan pada penelitian menggunakan matriks ortogonal L_{18} . Optimasi yang digunakan yaitu metode *Taguchi-Grey-Fuzzy*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat ditetapkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa kontribusi dari variabel-variabel proses *arc on*, *off time*, *on time*, *open voltage* dan *servo voltage* dalam mengurangi variasi total dari variabel respon *kerf*, LPB, KP dan tebal LR secara serentak pada proses pemesinan WEDM pada baja perkakas Buderus 2379 ISO-B.
2. Bagaimana pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses tersebut, sehingga dapat memaksimalkan LPB, dan meminimumkan *kerf*, KP dan tebal LR.



1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dibutuhkan agar penelitian dapat berjalan secara fokus, serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas sistem elektronika, sistem kontrol dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.
2. Tidak membahas perlakuan panas pada bahan yang digunakan.
3. Tidak membahas komponen biaya pada proses pemesinan.
4. Bahan yang digunakan adalah baja perkakas Buderus 2379 ISO-B.
5. Cairan yang digunakan adalah *aqua destilata*.
6. Jenis kawat elektroda yang digunakan adalah *zinc-coated brass wire*.
7. Bahan telah mengalami proses perlakuan panas sebelum dilakukan proses pemesinan.

1.2.2 Asumsi Penelitian

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

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

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besar kontribusi dari variabel *arc on*, *off time*, *on time*, *open voltage* dan *servo voltage* dalam mengurangi variasi dari respon *kerf*, LPB, KP dan LR secara serentak pada proses pemesinan WEDM.



2. Menentukan pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses tersebut sehingga dapat memaksimalkan LPB, dan meminimumkan *kerf*, KP dan tebal LR.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah *database* tentang pengaturan variabel-variabel pada proses pemesinan WEDM untuk mengoptimasi *kerf*, LPB, KP serta tebal LR.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi *kerf*, LPB, KP serta tebal LR.
3. Dapat digunakan sebagai masukan dalam pengaturan mesin WEDM bagi operator agar mampu menghasilkan *output* produk dengan permukaan hasil pemotongan yang halus dan ketelitian yang tinggi.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada saat ini proses pemesinan non-konvensional telah banyak digunakan dalam industri manufaktur untuk proses pemotongan logam dengan menggunakan logam yang memiliki kekerasan tinggi, serta memiliki kendala untuk diselesaikan dengan proses pemesinan konvensional. *Wire electrical discharge machining* (WEDM) adalah salah satu proses pemesinan non-konvensional yang saat ini banyak dikembangkan.

Durairaj dkk. (2013) meneliti pengaruh variabel-variabel proses seperti *gap voltage*, *wire feed*, *pulse on time*, dan *pulse off time* terhadap respon KP dan *kerf*. Variabel-variabel proses tersebut masing-masing memiliki empat level. Benda kerja dan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah *stainless steel* 304 dan kawat kuningan dengan diameter 0.25 mm. Rancangan percobaan yang digunakan adalah Taguchi dengan matriks ortogonal L_{16} serta *grey relational analysis* (GRA) digunakan sebagai metode optimasi multi respon. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa *gap voltage* memiliki kontribusi sebesar 6.4%, *wire feed* memiliki kontribusi sebesar 20,9%, *pulse on time* memiliki kontribusi sebesar 55.19%, *pulse off time* memiliki kontribusi sebesar 17,43% terhadap total variasi dari respon yang diamati secara serentak.

Hassan dkk. (2009) melakukan penelitian pada proses WEDM dengan meneliti respon KP dan integritas permukaan benda kerja dengan menggunakan metode Taguchi. Variabel-variabel proses yang digunakan adalah *pulse on time* dan *pulse current* dengan masing-masing variabel memiliki tiga level. Rancangan percobaan yang digunakan adalah matriks ortogonal L_9 . Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah baja AISI 4140 dengan elektroda kawat kuningan berdiameter 0,1-0,33 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatnya nilai *pulse on time* dan *pulse current* berbanding lurus terhadap variabel respon KP maupun kedalaman dari *microcracks* dan *microvoids*.

Penelitian tentang optimasi multi respon tebal LR dan KP pada proses pemesinan WEDM juga telah dilakukan oleh Rupajati (2013). Bahan yang



digunakan adalah baja perkakas AISI H13 dengan kekerasan mencapai 44 HRC dan menggunakan elektroda kawat kuningan berdiameter 0,25 mm. Rancangan percobaan menggunakan metode Taguchi dengan matriks ortogonal L_{18} . Metode yang digunakan untuk mengoptimasi karakteristik multi respon secara serentak adalah logika *fuzzy*. Variabel-variabel proses yang divariasikan adalah *arc on time*, *on time*, *off time*, *open voltage* dan *servo voltage*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel proses *on time* memiliki kontribusi sebesar 43,27%, *open voltage* sebesar 19,45%, *servo voltage* sebesar 15,64%, *arc on time* sebesar 11,66% dan *off time* sebesar 3,68% dalam mengurangi total variasi respon LR dan KP.

Penelitian sebelumnya juga dilakukan oleh Lusi (2013) untuk melakukan pengaturan variabel-variabel proses pada pemesinan WEDM yang bertujuan untuk mengoptimalkan LPB, *kerf* dan KP secara serentak. Bahan yang digunakan adalah baja perkakas SKD 61 dengan kekerasan mencapai 44 HRC. Kawat kuningan berdiameter 0.25 mm digunakan sebagai elektroda. Optimasi dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi-Grey-Fuzzy. Variabel-variabel proses yang divariasikan adalah *on time*, *off time*, *open voltage*, *arc on time* dan *servo voltage*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel-variabel proses yang memiliki kontribusi dalam mengurangi variasi total respon LPB, *kerf* dan KP secara serentak berturut-turut adalah *on time*, *servo voltage*, *open voltage* dan *arc on time*, yaitu sebesar 46,25%, 17,28% , 16,88% dan 1,55%.

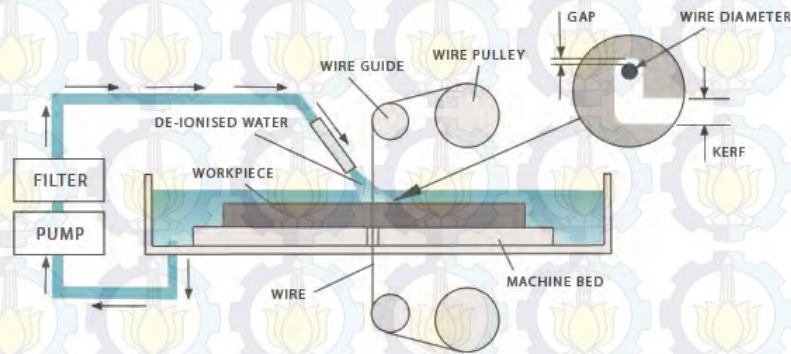
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Prinsip Dasar Wire-EDM

Proses pemesinan *wire electrical discharge machining* (WEDM) adalah proses pemesinan yang memanfaatkan energi termal yang berasal dari loncatan bunga api listrik yang timbul akibat adanya perbedaan potensial antara benda kerja dengan elektroda. Proses WEDM menggunakan elektroda berupa kawat dengan diameter tertentu. Pada umumnya, kawat elektroda dihubungkan pada kutub negatif dan benda kerja dihubungkan dengan kutub positif. Loncatan bunga api listrik akan meloncat dari kawat elektrodra dengan kutub negatif menuju benda kerja dengan kutub positif. Loncatan bunga api listrik akan terjadi secara

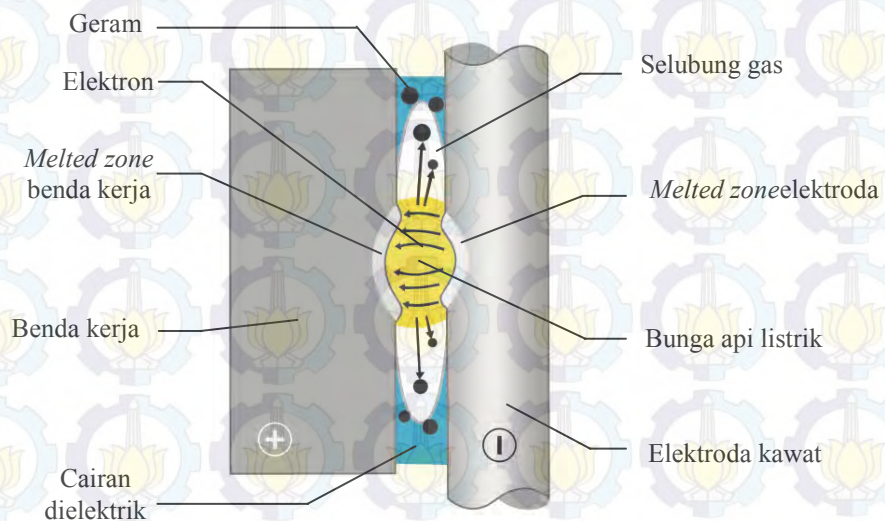


periodik terhadap waktu. Prinsip dasar proses WEDM ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Nourbakhsh, 2012).



Gambar 2.1 Skema proses pemesinan WEDM (Nourbakhsh, 2012)

Pembentukan bunga api listrik pada proses WEDM diawali dengan pengisian beda potensial antara elektroda dan benda kerja. Pada kondisi ini arus *background* yang mengalir, yang berfungsi untuk mengisi beda potensial yang terjadi diantara benda kerja dan elektroda menyebabkan terjadinya medan listrik. Hal tersebut akan menyebabkan munculnya pergerakan ion positif dan elektron menuju kutub yang berlawanan. Dengan demikian terbentuklah saluran ion yang bersifat konduktif. Proses pembentukan bunga api listrik pada proses WEDM ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Kunieda dkk., 2005).



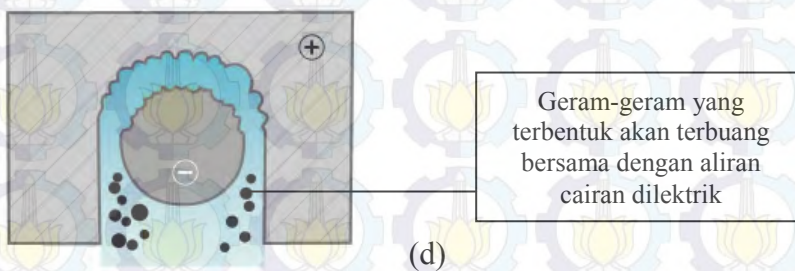
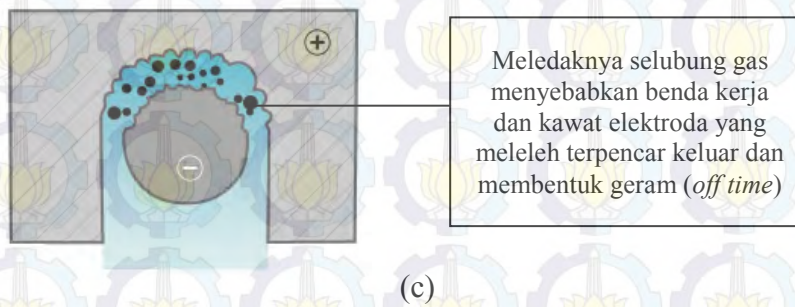
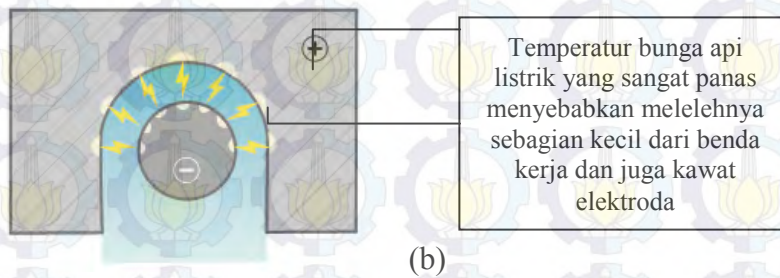
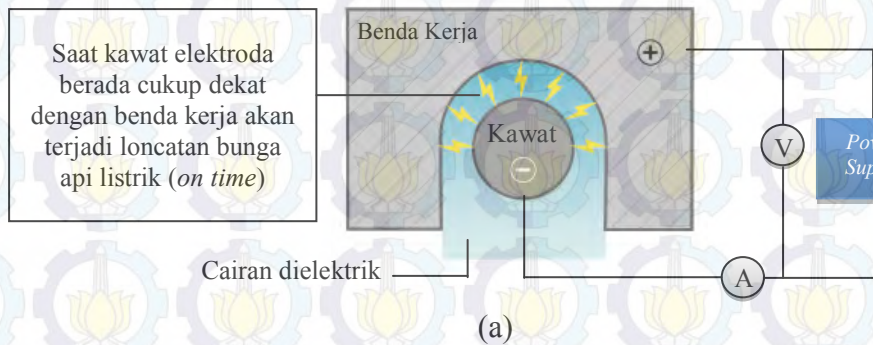
Gambar 2.2 Proses pembentukan bunga api listrik pada WEDM (Kunieda dkk., 2005)



2.2.2 Mekanisme Pemotongan pada WEDM

Pada proses pemesinan WEDM, setiap loncatan bunga api listrik yang memiliki energi tinggi akan menumbuk benda kerja (Bagiasna, 1979). Hal tersebut akan menyebabkan terjadinya perubahan energi listrik menjadi energi panas sehingga permukaan benda kerja maupun elektroda akan mengalami kenaikan suhu sekitar 8.000-12.000 °C. Suhu tersebut akan menyebabkan benda kerja dan elektroda meleleh dan mengakibatkan terjadinya penguapan. Hal tersebut akan menimbulkan gelembung udara yang akan terus mengembang sesuai dengan kenaikan suhu yang terjadi. Loncatan bunga api listrik akan berhenti sesaat memasuki *off time*. Pada saat *off time* terjadi penurunan temperatur secara mendadak pada benda kerja dan elektroda. Sebagai akibatnya, gelembung gas akan meledak dan terpecah keluar sehingga meninggalkan kawah-kawah halus pada permukaan benda kerja. Cairan dielektrik menyebabkan lelehan pada benda kerja dan elektroda akan membeku dengan cepat. Hasil pembekuan itulah yang akan dibawa keluar oleh cairan dielektrik berupa geram dan sebagian akan tertinggal dipermukaan benda kerja membentuk lapisan *recast*.

Secara sederhana urutan mengenai mekanisme proses pemotongan benda kerja pada WEDM diilustrasikan oleh Gambar 2.3 (Sommer dan Sommer, 2005).



Gambar 2.3 Mekanisme proses pemotongan benda kerja pada WEDM:
a) Proses loncatan bunga api listrik dari kawat elektroda ke benda kerja pada saat *on time*, b) Proses pelelehan benda kerja dan kawat elektroda akibat temperatur bunga api listrik, c) Proses terbentuknya geram pada saat *off time*, d) Proses pembuangan geram oleh cairan dielektrik (Sommer dan Sommer, 2005).



2.2.3 Variabel Proses WEDM

Deskripsi data pemotongan dapat dilihat pada Lampiran 1. Variabel proses atau variabel-variabel pada pemesinan WEDM menurut *instruction manual book wirecut EDM CHMER CW32GF* adalah sebagai berikut:

1. *On time* (ON) dan *Off time* (OFF)

On time adalah waktu timbul tegangan listrik pada celah benda kerja dan kawat elektroda, sehingga terjadi loncatan bunga api listrik, sedangkan *off time* adalah jeda waktu antara loncatan bunga api listrik. Pada saat *off time* tidak terjadi loncatan bunga api listrik sehingga memungkinkan pembilasan geram oleh cairan dielektrik.

2. *Open voltage* (OV)

Open voltage adalah variabel yang mengatur besarnya tegangan antara benda kerja dan kawat elektroda selama proses pemesinan.

3. *Servo voltage* (SV)

Servo voltage adalah tegangan yang digunakan untuk menghindari hubungan singkat yang mungkin terjadi dengan mengatur jarak antara kawat elektroda dan benda kerja. Semakin kecil SV semakin cepat proses pemotongan tetapi *gap* akan semakin kecil yang menyebabkan *short circuit*. Dengan kata lain SV berfungsi untuk menjaga seberapa besar *gap* agak tidak terjadi *short circuit*.

4. *Feed rate override* (FO)

Feedrate override adalah variabel yang digunakan untuk menyesuaikan kecepatan pemakanan benda kerja.

5. *Wire tension* (WT)

Wire tension adalah variabel yang digunakan untuk mengatur tegangan kawat elektroda.

6. *Wire feed* (WF)

Wire Feed adalah variabel yang digunakan untuk mengatur kecepatan pemakanan kawat elektroda.

7. *Water flow* (WF)

Water flow adalah variabel yang digunakan untuk menentukan tekanan *flushing* dari *upper* dan *lower nozzle*.



8. *Arc on time* (AN)

Arc on time adalah variabel yang digunakan untuk mengatur besarnya arus tambahan.

9. *Arc off time* (AFF)

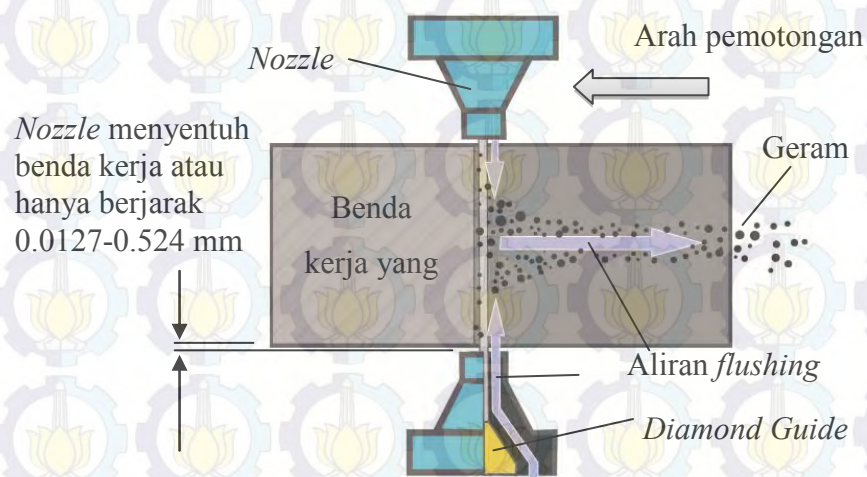
Arc off time adalah variabel yang digunakan untuk mengatur frekuensi arus tambahan.

10. *Low power* (LP)

Low power adalah variabel yang digunakan untuk jenis sumber energi pemotongan (AC atau DC) dan besarnya energi tersebut.

2.2.4 Pembilasan Geram (*Flushing*)

Flushing adalah pembuangan geram yang terdapat dicelah antara benda kerja dengan elektroda dengan mengalirkan aliran dielektrik yang mengalir dari dua buah *nozzle* yang berada di bagian atas dan bawa benda kerja (Bagiasna, 1987). Pembilasan yang tidak sempurna akan menyebabkan penimbunan geram. Penimbunan geram akan menyebabkan loncatan bunga api listrik menjadi tidak teratur sehingga merusak benda kerja dan elektroda, selain itu akan menyebabkan kawat elektroda putus. Proses *flushing* pada pemesian WEDM ditunjukkan pada Gambar 2.4 (Portt, 1922).



Gambar 2.4 Proses *flushing* pada pemesian WEDM (Portt, 1922)



2.2.5 Jenis-jenis Kawat Elektroda

Terdapat beberapa jenis elektroda yang dapat digunakan pada proses WEDM. Kawat yang ideal harus memiliki karakteristik seperti konduktivitas listrik yang baik dan kekuatan tarik yang tinggi. Jenis-jenis kawat elektroda yang biasa digunakan adalah (Guitrau, 1997):

1. Elektroda kawat tembaga

Elektroda kawat tembaga merupakan kawat yang digunakan pertama kali pada proses WEDM. Kawat elektroda ini memiliki beberapa kekurangan, yaitu memiliki kekuatan tarik yang rendah dan sangat mudah menyerap panas pada proses pemotongan sehingga kawat ini sangat mudah putus.

2. Elektroda kawat kuningan

Elektroda kawat kuningan merupakan paduan dari tembaga (Cu) dan seng (Zn). Pada umumnya, kawat ini memiliki presentase Zn yang tinggi sehingga baik untuk proses pemesinan WEDM. Kelebihan dari elektroda kawat kuningan ini adalah mempunyai kekuatan tarik yang tinggi dibandingkan dengan kekuatan tarik elektroda kawat tembaga.

3. Elektroda kawat berpelapis

Banyak kawat elektroda khusus yang digunakan untuk mengerjakan benda kerja dengan karakteristik tertentu, diantaranya:

- a. *Zinc coated brass wire*

Zinc coated brass wire adalah kawat yang terbuat dari kuningan dan dilapisi oleh seng (Zn). Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan dengan kecepatan pemotongan yang tinggi dan benda kerja yang tebal.

- b. *Zinc coated copper wire*

Zinc coated copper wire adalah kawat yang terbuat dari tembaga (Cu) dan dilapisi oleh seng (Zn) Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan berbagai jenis material, termasuk karbida.

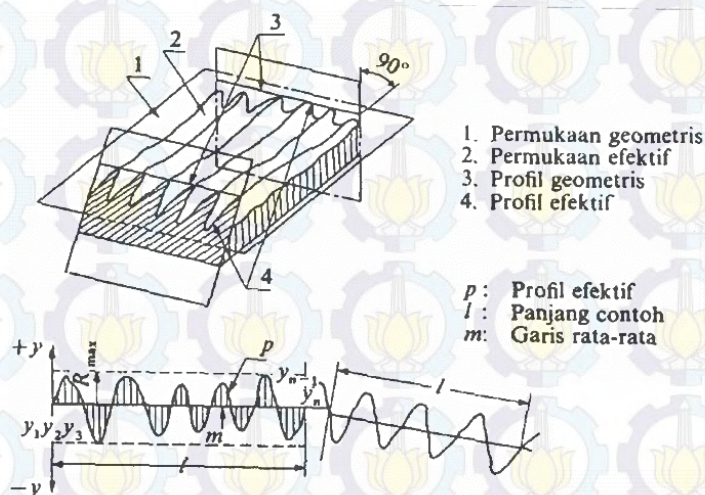


2.3 Variabel Respon

2.3.1 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan salah satu karakteristik kualitas yang sangat penting dalam bidang manufaktur dan dalam perancangan komponen mesin (Rochim, 2001). Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidak aturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Konfigurasi permukaan yang dihasilkan dari proses WEDM adalah konfigurasi permukaan yang bentuknya berupa kawah-kawah kecil pada suatu permukaan. Besar kecilnya kawah yang dihasilkan pada proses WEDM tergantung pada energi listrik yang terkandung pada setiap loncatan bunga api listrik. Penyimpangan rata-rata arimatika (R_a) merupakan jumlah rata-rata puncak tertinggi dan terendah dari setiap gelombang yang diukur pada panjang tertentu.

Penyimpangan rata-rata arimatika (R_a) sebagai harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya (Juhana dan Suratman, 2000). 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 (Rochim, 2001).



Gambar 2.5 Penyimpangan rata-rata arimatika (Rochim, 2001)



Harga R_a ditentukan dari nilai-nilai ordinat (y_1, y_2, \dots, y_n) yang dijumlahkan dan didapatkan nilai rata-ratanya. Secara umum, R_a dirumuskan sebagai berikut:

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

Harga R_a tersebut dapat didekati oleh persamaan:

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

Atau

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

Dengan:

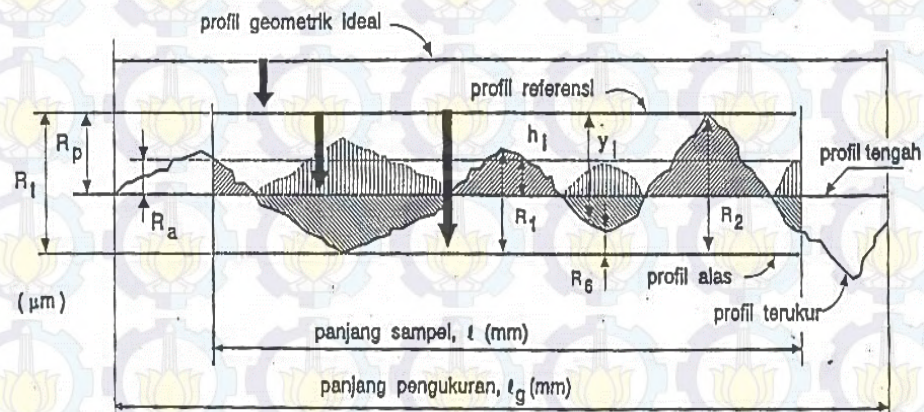
R_a = Nilai kekasaran aritmatika

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

Posisi R_a dan bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Rochim, 2001)



Gambar 2.6 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)



Keterangan dari Gambar 2.6 adalah sebagai berikut (Rochim, 2001):

1. Profil geometris ideal (*Geometrically ideal profile*)

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

2. Profil referensi (*Reference profile*)

Profil ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis karakteristik dari suatu permukaan. Bentuk profil ini sama dengan bentuk profil geometris ideal, tetapi tepat menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur pada panjang sampel yang diambil dalam pengukuran.

3. Profil terukur (*Measured profile*)

Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan yang diperoleh melalui proses pengukuran. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan produk pemesinan.

4. Profil dasar (*Root profile*)

Profil dasar adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah hingga tepat pada titik paling rendah pada profil terukur.

5. Profil tengah (*Centre profile*)

Profil tengah adalah profil yang berada di tengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagian atas profil tengah sampai pada profil terukur sama dengan jumlah luas bagian bawah profil tengah sampai pada profil terukur. Profil tengah ini sebenarnya merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah dengan arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal sampai pada batas tertentu yang membagi luas penampang permukaan menjadi dua bagian yang sama yaitu atas dan bawah.

Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO (*International Organization for Standardization*) menjadi 12 tingkat kekasaran. Angka kekasaran permukaan ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan satuan harga kekasaran



permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga R_a atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO. 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

| Tingkat kekasaran ISO Number | Nilai kekasaran R_a (μm) | Panjang sampel (mm) | Keterangan |
|---------------------------------|--|------------------------|--------------|
| N1 | 0.025 | 0.08 | Sangat halus |
| N2 | 0.05 | | |
| N3 | 0.1 | 0.25 | Halus |
| N4 | 0.2 | | |
| N5 | 0.4 | | |
| N6 | 0.8 | 0.8 | Normal |
| N7 | 1.6 | | |
| N8 | 3.2 | | |
| N9 | 6.3 | 2.5 | Kasar |
| N10 | 12.5 | | |
| N11 | 25 | 0.8 | Sangat kasar |
| N12 | 50 | | |

Sumber: Rochim, 2001

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai dengan beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.2 (en.wikipedia.org/wiki/surface_finish).



Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa pengerjaan

| | Ra μm | 50 | 25 | 12.5 | 6.3 | 3.2 | 1.6 | .8 | .4 | .2 | .1 | .05 | .025 | .012 |
|-----------------------|-------------------|------|------|------|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|------|------|
| | Ra μin | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 | .5 |
| METAL CUTTING | | | | | | | | | | | | | | |
| sawing | | | | | | | | | | | | | | |
| planing, shapping | | | | | | | | | | | | | | |
| drilling | | | | | | | | | | | | | | |
| milling | | | | | | | | | | | | | | |
| boring, turning | | | | | | | | | | | | | | |
| broaching | | | | | | | | | | | | | | |
| reaming | | | | | | | | | | | | | | |
| ABRASIVE | | | | | | | | | | | | | | |
| grinding | | | | | | | | | | | | | | |
| barrel finishing | | | | | | | | | | | | | | |
| honing | | | | | | | | | | | | | | |
| electro-polishing | | | | | | | | | | | | | | |
| electrolytic grinding | | | | | | | | | | | | | | |
| polishing | | | | | | | | | | | | | | |
| lapping | | | | | | | | | | | | | | |
| superfinishing | | | | | | | | | | | | | | |
| CASTING | | | | | | | | | | | | | | |
| sand casting | | | | | | | | | | | | | | |
| perm mold casting | | | | | | | | | | | | | | |
| investment casting | | | | | | | | | | | | | | |
| die casting | | | | | | | | | | | | | | |
| FORMING | | | | | | | | | | | | | | |
| hot rolling | | | | | | | | | | | | | | |
| forging | | | | | | | | | | | | | | |
| extruding | | | | | | | | | | | | | | |
| cold rolling, drawing | | | | | | | | | | | | | | |
| roller burnishing | | | | | | | | | | | | | | |
| OTHER | | | | | | | | | | | | | | |
| flame cutting | | | | | | | | | | | | | | |
| chemical milling | | | | | | | | | | | | | | |
| electron beam cutting | | | | | | | | | | | | | | |
| laser cutting | | | | | | | | | | | | | | |
| EDM | | | | | | | | | | | | | | |

common
 less frequent

Sumber: en.wikipedia.or/wiki/surface_finish

Keterangan:

Kasar = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan kasar.

Normal = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan normal.

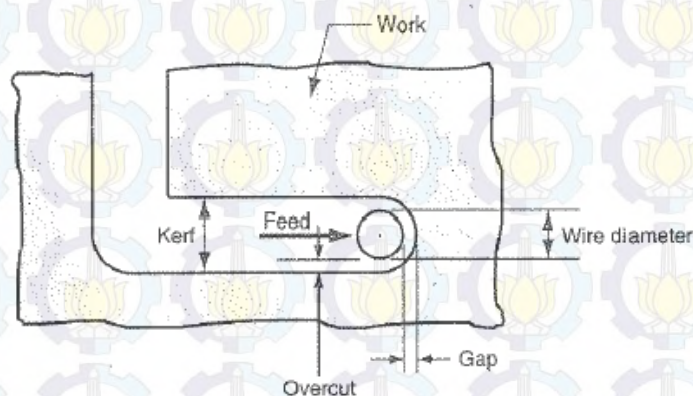
Halus = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan khusus.



Penggunaan parameter R_a merupakan variabel respon yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi kekasaran permukaan (Rochim, 2001). Penggunaan parameter R_a sebenarnya tidak mempunyai dasar yang kuat untuk mengidentifikasi ketidak teraturan 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.

2.3.2 Lebar Pemotongan (*Kerf*)

Benda kerja dan elektroda kawat dialirkan rangkaian listrik dengan masing-masing kutub, yaitu kutub positif untuk benda kerja dan kutub negatif untuk elektroda kawat 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 pada daerah pemotongan. Uraian tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.7 berikut (Othman, 2008):



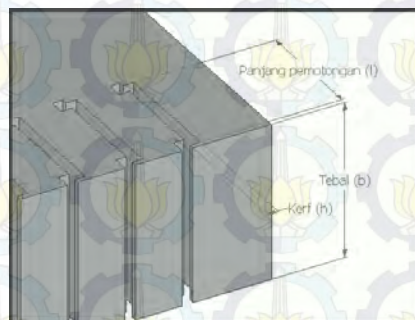
Gambar 2.7 Definisi *kerf* dan *overcut* pada WEDM (Othman, 2008)



Kerf yang dihasilkan dari proses pemotongan tersebut sangat penting pada proses pemesinan WEDM. Celah *gap* diatur oleh sistem kontrol *servo* dengan sensor lebar celah *gap* sebagai pengendali. *Kerf* yang dihasilkan lebih besar dari diameter elektroda kawat yang digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Ukuran kelebihan pemotongan berkisar antara 0,020-0,050 mm dan umumnya adalah sebesar 0,03 mm (Groover, 2002).

2.3.3 Laju Pengerjaan Bahan

Laju pengerjaan bahan adalah banyaknya volume benda kerja yang terbang setiap satuan waktu. Variabel-variabel proses yang mempengaruhi laju pengerjaan bahan adalah frekuensi loncatan bunga api listrik, besarnya arus dan besar tegangan listrik tiap loncatan bunga api listrik, bahan elektroda, bahan benda kerja dan kondisi *flushing* cairan dielektrik (Krar dan Check, 1997). LPB dalam proses WEDM secara umum dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Tosun dkk., 2004):



Gambar 2.8 Volume benda kerja yang terbang pada proses WEDM

Perhitungan LPB secara sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.8, yaitu dengan membagi volume benda kerja yang terbang ($b \times h \times l$) dengan waktu yang dibutuhkan selama proses pemotongan.

$$LPB = \frac{b \times h \times l}{t} \text{ (mm}^3\text{/min)} \quad (2.4)$$

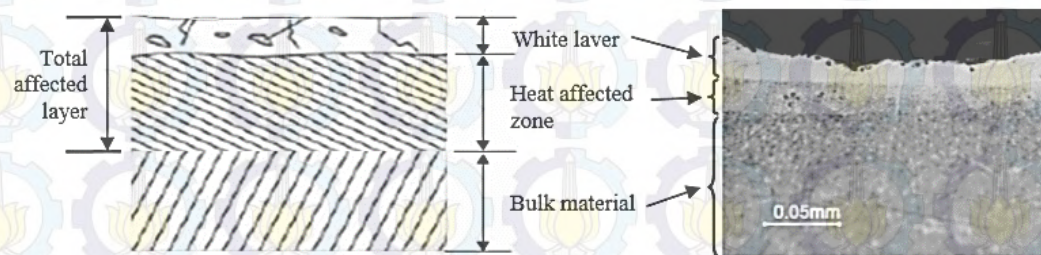
Dengan:

- b = Tebal benda kerja (mm)
- h = Lebar pemotongan (mm)
- l = Panjang pemotongan (mm)
- t = Waktu pemotongan (min)



2.3.4 Lapisan *Recast*

Lapisan *recast* adalah lapisan putih pada permukaan benda kerja yang terbentuk dari lelehan benda kerja yang disebabkan oleh loncatan bunga api listrik, yang kemudian membeku dan membentuk lapisan baru pada permukaan benda kerja. Lapisan *recast* tidak mungkin dihilangkan dalam proses pemesinan WEDM sehingga pengaturan variabel-variabel yang ada hanya dapat meminimalkan ketebalan lapisan *recast* yang terbentuk. Benda kerja yang mengalami proses pemesinan dengan WEDM memiliki kekerasan permukaan yang tidak lagi homogen. Hal ini terjadi karena pada benda kerja terbentuk tiga lapisan baru dengan karakteristik yang berbeda-beda. Ketiga lapisan ini adalah *white layer* atau lapisan *recast*, *heat affected zone* (HAZ) dan *bulk material* atau material induk. Ketiga lapisan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Zeilmann dkk., 2013).

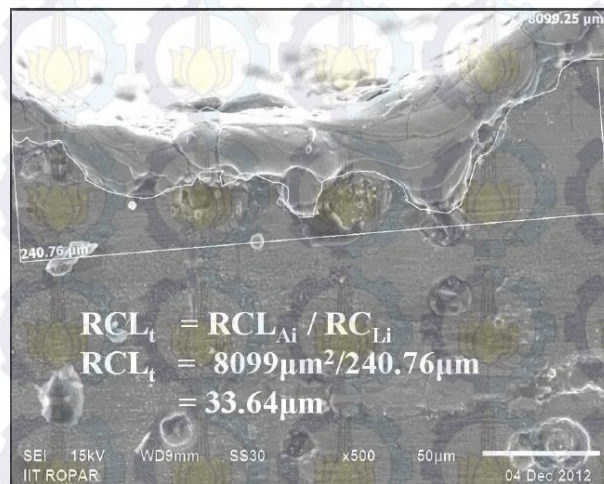


Gambar 2.9 Lapisan-lapisan permukaan benda kerja pada proses WEDM (Zeilmann dkk., 2013)

Lapisan *recast* dan HAZ telah mengalami perubahan sifat mekanis karena pengaruh panas selama proses pemesinan berlangsung. Lapisan *recast* bersifat sangat keras dan getas. Sifat getas pada lapisan ini sangat rentan mengandung *microcrack* dan dapat menurunkan ketangguhan dan ketahanan leleh suatu material. Variabel-variabel proses yang digunakan untuk meminimalkan tebal lapisan *recast* juga mempengaruhi kedalaman lapisan HAZ yang terbentuk. Kedalaman HAZ dan lapisan *recast* dipengaruhi oleh arus, jenis *power supply* dan jumlah *skim cutting* (Sommer dan Sommer, 2005). Jenis *power supply* yang dapat meminimalkan tebal lapisan *recast* dan kedalaman HAZ adalah DC *power supply*. Walaupun variabel-variabel proses yang digunakan untuk meminimalkan



ketebalan lapisan *recast* juga mempengaruhi kedalaman HAZ, pada umumnya proses optimasi hanya dilakukan pada ketebalan lapisan *recast*. Tebal lapisan *recast* dalam proses WEDM secara umum dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Kumar, 2014):



Gambar 2.10 Pengukuran tebal lapisan *recast* pada permukaan benda kerja pada proses WEDM (Kumar, 2014)

$$RCL_t = RCL_{Ai} / RC_{Li} \quad (2.5)$$

Dengan:

RCL_t = Tebal rata-rata lapisan *recast* (μm)

RCL_{Ai} = Luasan area *recast* (μm^2)

RC_{Li} = Panjang total lapisan *recast* (μm)

2.4 Metode Penelitian

2.4.1 Metode Taguchi

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



Metode Taguchi memperkenalkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu 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 variabel proses dan banyak level.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap variabel yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian. Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua variabel proses atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu. Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, variabel proses dan level variabelnya dibuat bervariasi kemudian hasil dari kombinasi pengujian tertentu diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan variabel-variabel yang berpengaruh dan tindakan yang dapat membuat perbaikan lebih lanjut.

2.4.2 Rancangan Percobaan Taguchi

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

1. Tahap Perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan penelitian yang



memberikan informasi positif atau negatif. Informasi positif terjadi apabila hasil penelitian memberikan indikasi tentang variabel dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk. Informasi negatif terjadi apabila hasil eksperimen gagal memberikan indikasi tentang variabel-variabel yang mempengaruhi respon. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:

(a) Perumusan masalah

Masalah harus dirumuskan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam penelitian yang akan dilakukan.

(b) Penentuan tujuan penelitian

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

(c) Penentuan variabel respon

Variabel respon memiliki nilai yang tergantung pada variabel-variabel yang lain sehingga disebut juga sebagai variabel bebas.

(d) Pengidentifikasian variabel proses

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

(e) Pemisahan variabel kontrol dan variabel gangguan

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

(f) Penentuan jumlah dan nilai level variabel

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 variabel yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{Jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.6)$$

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

$$v_{fl} = \text{Jumlah level variabel} - 1 \quad (2.7)$$

(h) Pemilihan matriks ortogonal

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

Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a (b^c) \quad (2.8)$$

Dengan:

L = Rancangan bujur sangkar latin

a = Banyaknya eksperimen

b = Banyaknya level variabel

c = Banyaknya variabel

Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ adalah salah satu matriks ortogonal standar dengan beberapa level gabungan. Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ ditunjukkan pada Tabel 2.3. Kolom pertama terdiri dari dua level, dan ketujuh kolom yang lainnya terdiri dari tiga level (Soejanto, 2009).



Tabel 2.3 Matriks ortogonal standar untuk $L_{18} (2^1 \times 3^7)$

| No. Percobaan | Kolom variabel | | | | | | | |
|---------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |

2. Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan terdiri dari dua hal, yaitu penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen (Soejanto, 2009).

a. Jumlah replikasi

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

b. Randomisasi

Pengaruh variabel-variabel lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan selalu ada dalam sebuah eksperimen. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan variabel-variabel tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Randomisasi dilakukan bertujuan untuk menyebarkan pengaruh dari variabel-variabel yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen serta memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu



perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama. Selain itu, randomisasi juga bertujuan 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, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil eksperimen.

a. Analisis variansi (ANOVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik (Soejanto, 2009). Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi variabel. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua variabel atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANOVA 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} |
|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Variabel A | ν_A | SS_A | MS_A | F_A |
| Variabel B | ν_B | SS_B | MS_B | F_B |
| Error | ν_{error} | SS_{error} | MS_{error} | |
| Total | ν_T | SST | | |



Dengan:

$$\begin{aligned} \nu_T &= \text{Derajat bebas total.} \\ &= N-1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \nu_A &= \text{Derajat bebas variabel A.} \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \nu_B &= \text{Derajat bebas variabel B.} \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \nu_{\text{error}} &= \text{Derajat bebas error.} \\ &= \nu_T - \nu_A - \nu_B - \nu_{AB} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{Jumlah keseluruhan.} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{Variabel koreksi.} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{Jumlah kuadrat total.} \\ &= \sum_{i=1}^N Y_i - CF \\ &= \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{Jumlah kuadrat variabel A.} \\ &= \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} SS_B &= \text{Jumlah kuadrat variabel B.} \\ &= \left[\sum_{i=1}^{k_B} \left(\frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} SS_E &= \text{Jumlah kuadrat error.} \\ &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} MS_A &= \text{Kuadrat tengah variabel A.} \\ &= \frac{SS_A}{\nu_A} \end{aligned} \quad (2.19)$$



$$\begin{aligned} MS_B &= \text{Kuadrat tengah variabel B.} \\ &= \frac{SS_B}{v_B} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} MS_E &= \text{Kuadrat tengah error.} \\ &= \frac{SS_E}{v_E} \end{aligned} \quad (2.21)$$

k_A = Jumlah level variabel A

k_B = Jumlah level variabel B

N = Jumlah total percobaan

n_{Ai} = Jumlah total pengamatan variabel A

n_{Bj} = Jumlah total pengamatan variabel B

b. Uji distribusi F

Uji distribusi F digunakan dengan tujuan untuk menunjukkan bukti adanya perbedaan pengaruh masing-masing variabel dalam eksperimen (Soejanto, 2009). Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing variabel dan variansi *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena variabel-variabel yang tidak dapat dikendalikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk variabel yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

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

H_1 : Sedikitnya ada satu pasangan μ yang tidak sama

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

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.22)$$

maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

Untuk level variabel A sebagai berikut:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

H_1 : paling sedikit ada satu τ tidak sama dengan 0



Untuk level variabel B sebagai berikut:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \text{Paling sedikit ada satu } \beta \text{ tidak sama dengan } 0$$

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya pengaruh variabel A dan variabel B terhadap respon sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya pengaruh variabel A dan variabel B terhadap respon. Kegagalan menolak atau penolakan H_0 didasarkan pada nilai F_{hitung} yang dirumuskan (Soejanto, 2009):

$$\text{Untuk level variabel A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.23)$$

$$\text{Untuk level variabel B} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.24)$$

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

$$\text{Untuk level variabel A} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.25)$$

$$\text{Untuk level variabel B} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.26)$$

Bila menggunakan perangkat komputasi statistik, kegagalan menolak H_0 dilakukan jika p -value lebih besar daripada α (level signifikansi). Penolakan terhadap H_0 dilakukan apabila nilai F_{hitung} lebih besar dari dua (Park, 1996).

c. Analisis pemeriksaan asumsi residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ (Montgomery, 2009). Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), mempunyai mean nol dan varians yang konstan σ^2 (identik), serta berdistribusi normal atau $\varepsilon_i \sim IIDN(0, \sigma^2)$. Oleh karena itu, dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak.



1. Pengujian independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan plot ACF (*Auto Correlation Function*). Residual bersifat independen jika nilai korelasi berada dalam interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$.

2. Pengujian identik

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

3. Pengujian distribusi normal

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

H_0 : Residual berdistribusi normal.

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal.

Gagal menolak H_0 apabila $P_{value} > \alpha$.

d. Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih variabel-variabel 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 (Lin dan Lin, 2002):



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:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.27)$$

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:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.28)$$

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:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.29)$$

2.4.3 Metode Taguchi-Grey-Fuzzy

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

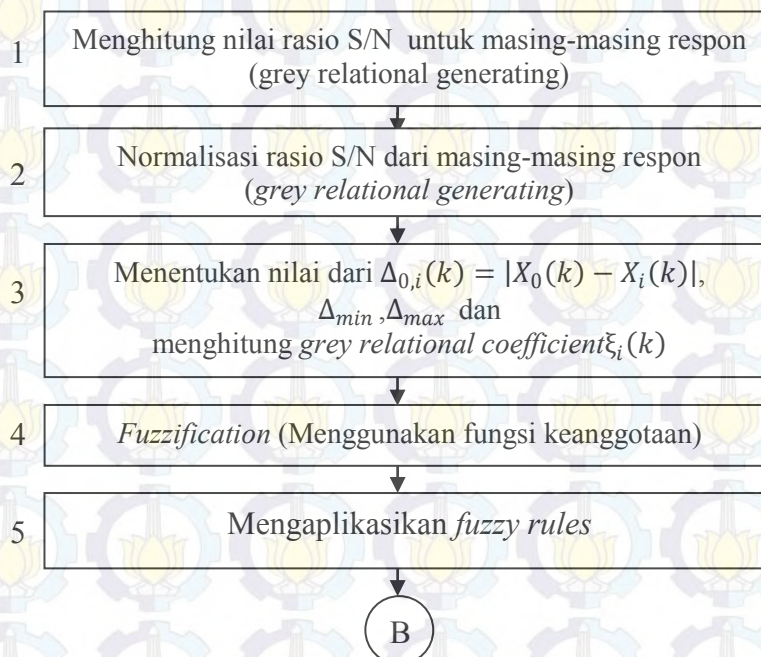
Metode GRA diawali dengan teori *grey system* yang dibuat oleh Dr. Julong Deng pada tahun 1982, yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar



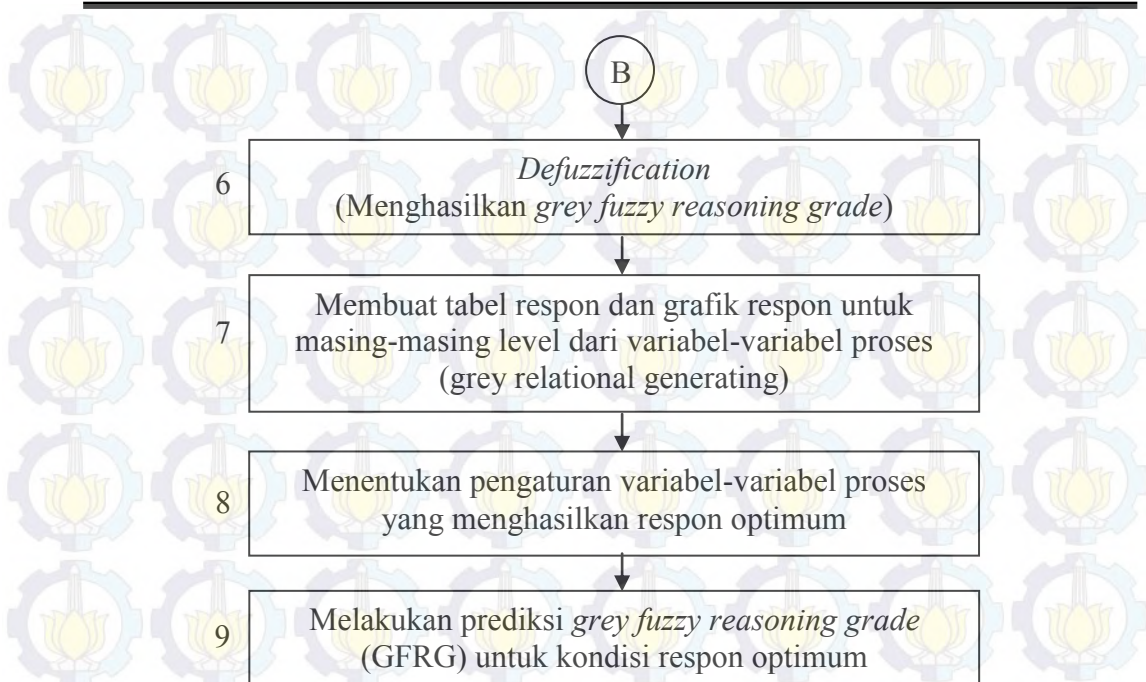
dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan. GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey relational analysis*.

Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon. Logika *fuzzy* pertama kali diformulasikan oleh Dr. Zadeh pada tahun 1965. Metode ini diformulasikan dalam upaya mencari nilai tengah antara nol dan satu. Dr. Zadeh melakukan modifikasi pada teori himpunan, dimana setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang selalu bernilai kontinyu antara nol sampai satu. Himpunan ini disebut sebagai himpunan kabur (*fuzzy set*). Logika *fuzzy* mempunyai kemampuan untuk memproses variabel respon yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara pasti, misalnya tinggi, lambat dan bising. Ketidak jelasan dalam menggambarkan suatu variabel respon dapat secara alami dimodelkan dengan menggunakan logika *fuzzy* (Dhavamani dan Alwarsamy, 2011).

Dalam logika *fuzzy*, variabel respon yang bersifat kabur direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai tegas (*crisp*) dan derajat keanggotaan (*membership function*). Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode Taguchi-*Grey-Fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.11 Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa alami.



Gambar 2.11 Langkah-langkah optimasi Taguchi-*grey-fuzzy*



Gambar 2.11 Langkah-langkah optimasi Taguchi-*grey-fuzzy* (lanjutan)

Rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

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

Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik dari masing-masing respon sesuai dengan persamaan 2.27 sampai dengan persamaan 2.29

2. Normalisasi data untuk masing-masing respon

Pada penelitian ini, normalisasi dilakukan pada rasio S/N di mana rasio S/N memiliki karakteristik semakin besar semakin baik. Nilai S/N rasio dinormalkan menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Tabel 2.5 menunjukkan penempatan nilai respon untuk proses normalisasi.

Tabel 2.5 Penempatan rasio S/N

| | | | | |
|-------------|----------|----------|-----|----------|
| Kombinasi 1 | $X_1(1)$ | $X_1(2)$ | ... | $X_1(k)$ |
| Kombinasi 2 | $X_2(1)$ | $X_2(2)$ | ... | $X_2(k)$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Kombinasi i | $X_i(1)$ | $X_i(2)$ | ... | $X_i(k)$ |

Cara yang digunakan untuk proses normalisasi sesuai dengan karakteristik variabel respon yang meliputi semakin besar semakin baik (*larger the better*), semakin kecil semakin baik (*smaller the better*) dan tertuju pada



nilai tertentu (*nominal the best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” (Huang dan Liao, 2003) adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.30)$$

Proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin kecil semakin baik” menggunakan persamaan sebagai berikut (Huang dan Liao, 2003):

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.31)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “tertuju pada nilai tertentu” adalah (Huang dan Liao, 2003):

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - X_{ob}(k)} \quad (2.32)$$

dengan:

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

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

$$X_{ob}(k) = \text{Nilai target dari } X_i(k)$$

1. Menentukan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$

Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya satu dengan data yang telah dinormalisasi. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \quad (2.33)$$

2. Menentukan *grey relational coefficient* $\xi_i(k)$

Grey relational coefficient menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. *Grey relational coefficient* (GRC) akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang



digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (2.34)$$

Dengan:

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

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

ζ = *Distinguish coefficient*.

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

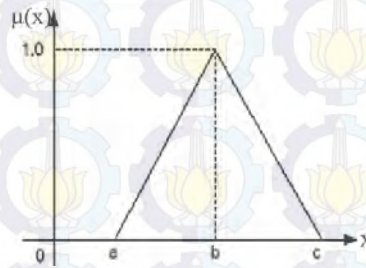
3. Tahap *fuzzification*

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

Fungsi keanggotaan kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis linear, yaitu fungsi linier naik dan fungsi linier turun. Fungsi keanggotaan kurva segitiga adalah sebagai berikut (Ratnawati, 2011):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases} \quad (2.35)$$

Fungsi keanggotaan kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.12.

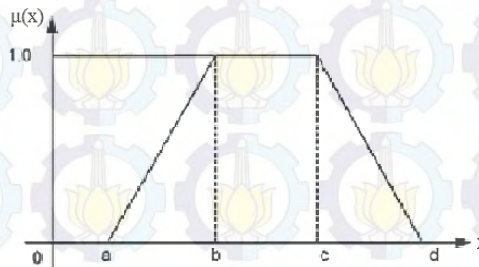


Gambar 2.12 Fungsi keanggotaan kurva segitiga

Fungsi keanggotaan kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan sama, yaitu bernilai satu. Fungsi keanggotaan kurva trapesium adalah sebagai berikut (Ratnawati, 2011):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{c-d}; & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.36)$$

Bentuk fungsi keanggotaan kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.13 (Ratnawati, 2011):



Gambar 2.13 Fungsi keanggotaan kurva trapezium

4. Mengaplikasikan *fuzzy rules*

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



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

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

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

Derajat keragaman dari keanggotaan dari himpunan *fuzzy* akan dihitung berdasarkan nilai dari x_1 , x_2 , hingga x_k , dan, sedangkan A , B hingga Y adalah himpunan *fuzzy* yang ditetapkan berdasarkan fungsi keanggotaan. Sebuah *output fuzzy* multi respon dihasilkan dengan menggunakan operasi *max-min inference* dan *fuzzy rule*. Apabila x_1 , x_2 , hingga x_3 adalah GRC, maka fungsi keanggotaan dari y yang merupakan *output* multi respon dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$\mu_{Z_0}(y) = ((\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \wedge \mu_{C_1}(x_3) \wedge \mu_{Z_1}(x_3)) \vee \dots \vee ((\mu_{A_k}(x_1) \wedge \mu_{B_k}(x_2) \wedge \mu_{C_k}(x_3) \wedge \mu_{Z_n}(x_3))) \quad (2.37)$$

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

5. Defuzzification

Defuzzification merupakan pengubahan nilai *fuzzy* menjadi *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG) dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Metode yang paling sering digunakan pada proses *defuzzification* adalah metode *centroid*. Pada metode ini, *defuzzification* yang dilakukan dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah *fuzzy*. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$Z^* = \frac{\int_z^n z \mu(z) dz}{\int_z^n \mu(z) dz} \quad (2.38)$$

atau dapat dirumuskan (Kusumadewi dan Purnomo, 2010) sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.39)$$



Dengan:

z^* = Nilai GFRG

z_j = Nilai domain ke-j

$\mu(z_j)$ = Derajat keanggotaan

6. Menentukan kombinasi variabel proses untuk respon optimum

Semakin besar nilai GFRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi variabel-variabel tersebut. Penentuan kombinasi variabel terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GFRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tabel respon *grey fuzzy reasoning grade*

| | Level 1 | Level 2 | Level j |
|------------|----------|---------|----------|
| Variabel 1 | Y_{11} | - | Y_{1j} |
| Variabel 2 | Y_{21} | - | Y_{2j} |
| - | | | |
| Variabel i | Y_{i1} | - | Y_{ij} |
| Max-Min | Q_1 | | Q_j |

Y_{ij} adalah rata-rata nilai GFRG yang dikelompokkan berdasarkan variabel i dan level j. Grafik respon dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level dari variabel yang menghasilkan respon yang optimal.

7. Memprediksi nilai GFRG hasil optimasi

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

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (2.40)$$

Dengan:

γ_m = Nilai rata-rata dari keseluruhan GFRG

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

q = Jumlah variabel proses yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.5 Interpretasi Hasil Percobaan

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



1. Persen Kontribusi

Persen kontribusi merupakan porsi masing-masing variabel proses dan/atau interaksi variabel proses yang signifikan terhadap total variansi yang diamati. Persen kontribusi merupakan fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing variabel proses yang signifikan. Persen kontribusi menunjukkan kekuatan relatif dari suatu variabel untuk mereduksi variasi. Persen kontribusi dihitung untuk variabel proses, interaksi variabel proses dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari 15%, maka berarti tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari 15% mengindikasikan ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu variabel proses dirumuskan dengan menggunakan persamaan (Ross, 2008):

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (2.41)$$

dengan:

$$SS'_A = SS_A - df_A \cdot MS_E \quad (2.42)$$

SS_A = Jumlah kuadrat dari variabel proses A

SS_T = Jumlah kuadrat total

df_A = Derajat kebebasan dari variabel proses A

MS_E = Rata-rata kuadrat dari *error*

2. Interval Keyakinan

(a) Interval keyakinan untuk kondisi optimum prediksi

Untuk menghitung interval keyakinan untuk kondisi optimum prediksi menggunakan rumus (Ross, 2008):

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.43)$$

$$\hat{\mu} - CI_p \leq \mu \leq \hat{\mu} + CI_p \quad (2.44)$$

Dengan:

$$n_{eff} = \text{Banyaknya pengamatan efektif} \quad (2.45)$$



$$n_{eff} = \frac{\text{Total percobaan}}{1 + \text{Jumlah derajat kebebasan variabel untuk menduga rata-rata}}$$

$\hat{\mu}$ = Rata-rata GFRG prediksi pada kondisi optimum

(b) Interval keyakinan untuk memprediksi percobaan konfirmasi

Untuk menghitung interval keyakinan untuk memprediksi percobaan konfirmasi menggunakan rumus (Ross, 2008):

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.46)$$

Dengan:

r = Jumlah sampel dalam percobaan konfirmasi.

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

3. Percobaan Konfirmasi

Pada penelitian tentang optimasi proses langkah terakhir yang harus dilakukan adalah percobaan konfirmasi. Percobaan ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level variabel proses hasil optimasi. Tujuan dari percobaan konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisa. Percobaan konfirmasi dilakukan untuk mencocokkan hasil respon prediksi dengan hasil respon secara aktual (Ross, 2008). Selain itu, percobaan konfirmasi dilakukan untuk membandingkan respon pada kondisi awal dengan respon setelah dilakukan proses optimasi. Langkah-langkah dalam percobaan konfirmasi dapat diuraikan sebagai berikut:

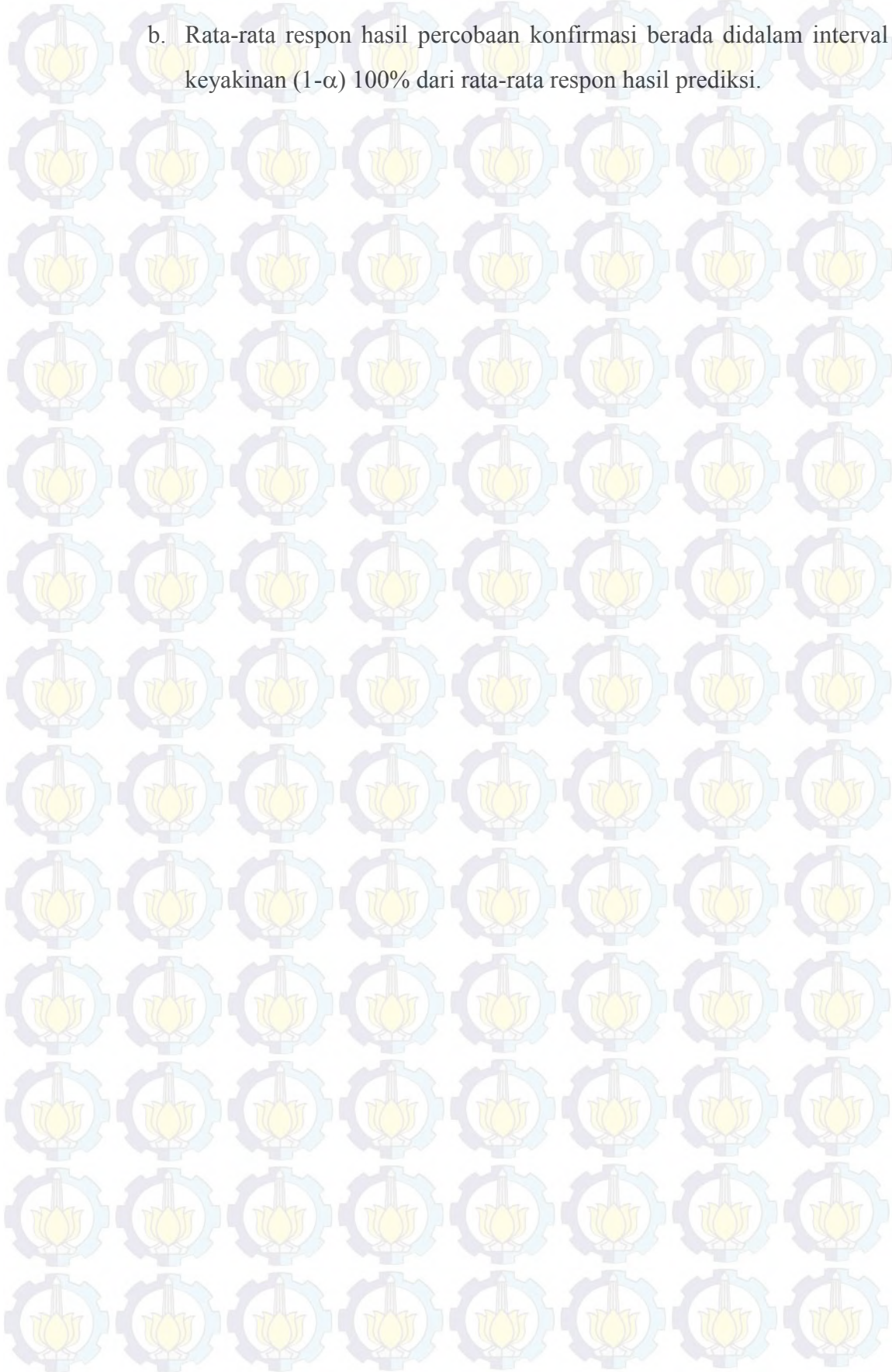
- Menentukan kombinasi variabel-variabel proses dan level-levelnya untuk menghasilkan respon optimum.
- Melakukan percobaan berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.

Percobaan konfirmasi dinyatakan berhasil bila:

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



b. Rata-rata respon hasil percobaan konfirmasi berada didalam interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% dari rata-rata respon hasil prediksi.





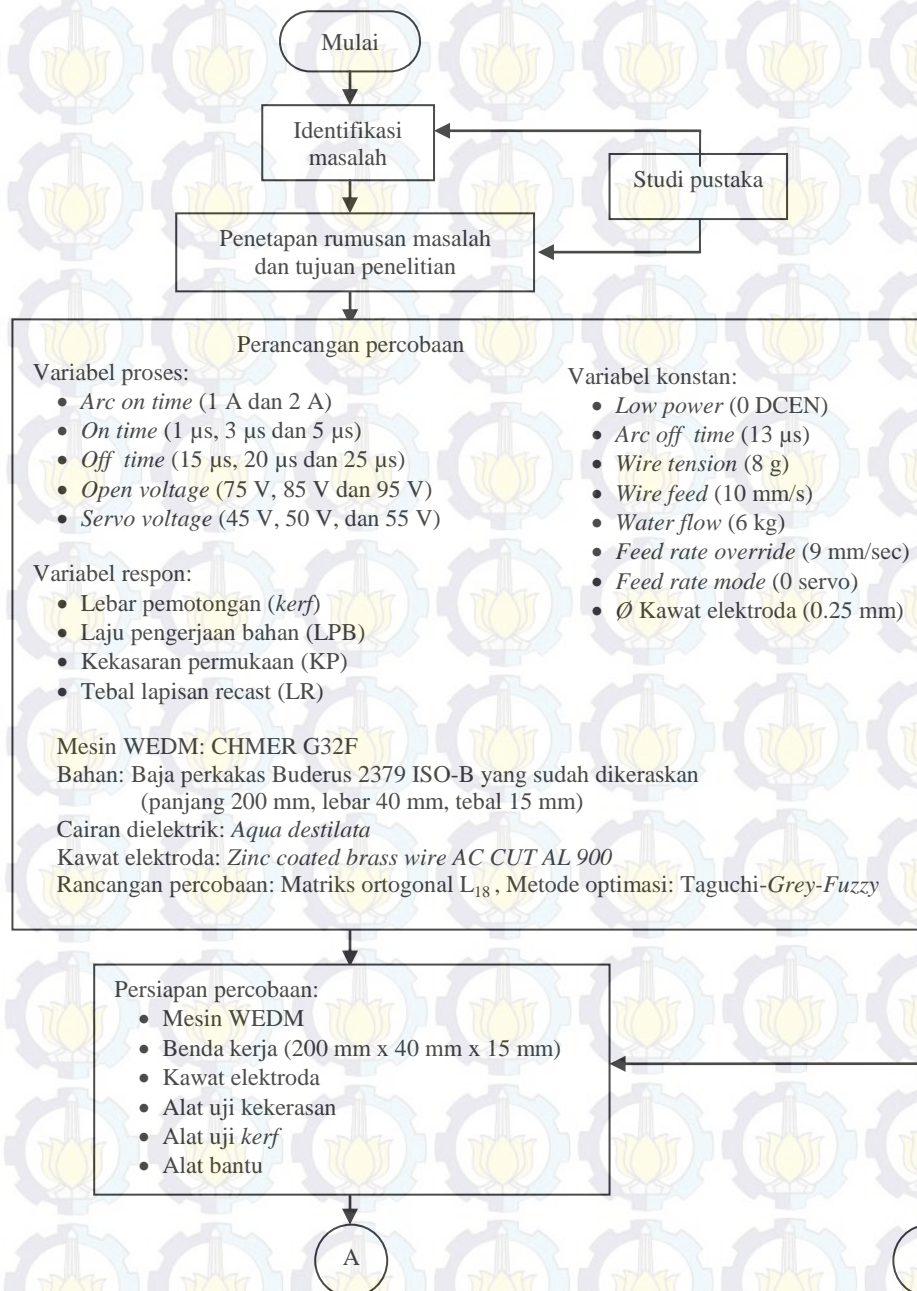
[Halaman ini sengaja dikosongkan]



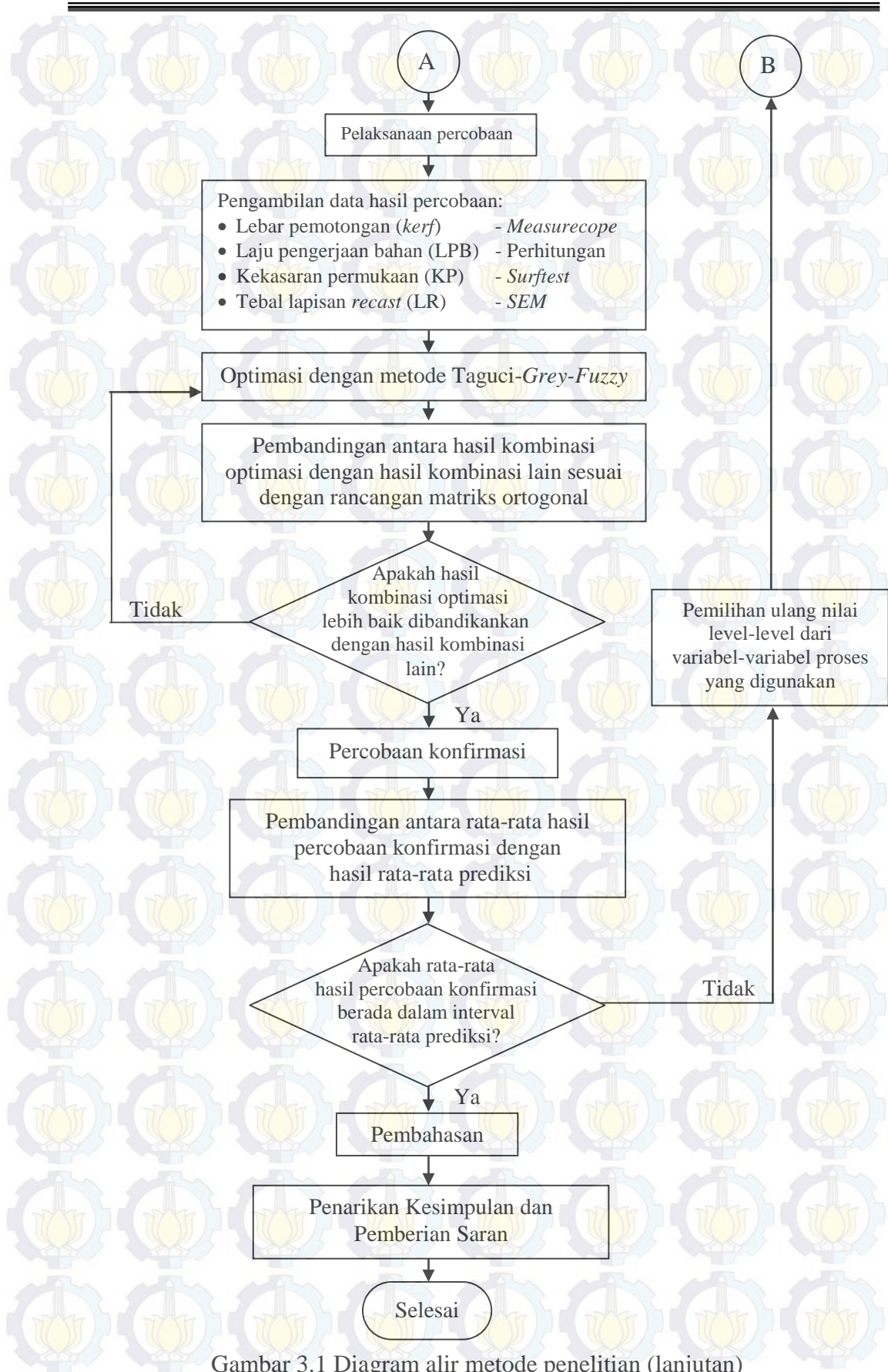
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan agar penelitian lebih fokus dan terarah pada tujuan penelitian. Tahapan yang dilakukan pada penelitian ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.1 sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian (lanjutan)



3.2 Variabel-variabel Penelitian

Pada penelitian ini data yang digunakan merupakan data primer yang didapat dari hasil percobaan pendahuluan. Variabel-variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Variabel Proses

Variabel proses juga disebut sebagai variabel kontrol yang merupakan variabel yang dapat dikendalikan. Nilai dari variabel kontrol dapat ditentukan berdasarkan tujuan dari penelitian yang dilakukan dan pertimbangan yang lain. Variabel-variabel proses yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. *On time* (ON)
- b. *Off time* (OFF)
- c. *Open voltage* (OV)
- d. *Arc on time* (AN)
- e. *Servo voltage* (SV)

3.2.2 Variabel Respon

Variabel respon merupakan respon yang akan diamati dalam penelitian yang dilakukan adalah:

- a. Laju pengerjaan bahan (LPB)
- b. Lebar pemotongan (*kerf*)
- c. Kekasaran permukaan (KP)
- d. Tebal lapisan *recast* (LR)

3.2.3 Variabel Konstan

Variabel konstan merupakan variabel yang tidak diteliti dalam penelitian. Besarnya nilai variabel ini dijaga konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi variabel respon. Variabel-variabel yang menjadi variabel konstan pada penelitian ini adalah:

- a. *Lower power* (LP)
- b. *Arc off time* (AFF)
- c. *Feed rate override* (FR)
- d. *Wire feed* (WF)



- e. *Wire tension* (WT)
- f. *Water flow* (WF)
- g. *Fede rate mode* (FM)
- h. *Feed rate* (F)

3.2.4 Variabel Gangguan

Variabel gangguan atau *noise factor* adalah faktor yang memiliki pengaruh terhadap respon, tetapi sangat sulit untuk dikendalikan. Variabel-variabel yang mungkin menjadi *noise* dalam penelitian ini adalah temperature cairan dielektrik, konsentrasi geram dalam cairan dielektrik dan kondisi permukaan kawat. Variabel-variabel ini tidak dimasukkan kedalam rancangan percobaan, sehingga pengambilan data dilakukan dengan replikasi untuk mengatasi pengaruh *noise factor* pada hasil penelitian.

3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

3.3.1 Bahan Penelitian

1. Benda kerja

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja perkakas Buderus 2379 ISO-B yang telah mengalami perlakuan panas dengan kekerasan mencapai 60 HRC. Sertifikat test untuk material yang diuji ditunjukkan pada Lampiran 2. Benda kerja memiliki dimensi dengan panjang sebesar 200 mm, lebar 40 mm, dan tebal 15 mm.

2. Kawat elektroda

Kawat elektroda yang digunakan adalah kawat jenis *zinc coated brass wire AC CUT VS 900*, yaitu kawat berbahan kuningan yang dilapisi *zinc* dengan diameter 0,25 mm.

3.3.2 Peralatan Penelitian

1. Mesin WEDM

Mesin WEDM yang digunakan pada penelitian ini adalah CHMER tipe 32GF seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, sedangkan



spesifikasi mesin tersebut bisa dilihat pada Lampiran 3 dan pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi mesin WEDM 32GF

| Model | 32GF Flusing | Satuan |
|--------------------------------|-----------------|--------|
| Sumbu X, Y | 360 x 250 | mm |
| Lintasan U,V,Z | 60 x 60 x 220 | mm |
| Ukuran maksimal benda kerja | 725 x 560 x 215 | mm |
| Berat maksimal benda kerja | 300 | kg |
| Kecepatan makan maksimal X,Y | 800 | mm/min |
| Rentang diameter kawat | Ø 0.15- Ø 0.30 | mm |
| Kecepatan makan kawat maksimal | 300 | mm/s |



2. Peralatan ukur

a. Measurescope

Pengukuran *kerf* pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Nikon *measurescope* 20 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Alat ini memiliki kecermatan hingga 0,001 mm. Panjang yang dapat diukur dengan menggunakan alat ini adalah ± 20 mm.



Gambar 3.3 Nikon *measurescope* 20

b. *Scanning electron microscope* (SEM)

Pengukuran tebal LR pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan SEM Inspect s50 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Alat ini memiliki perbesaran sampai 150.000 kali dengan resolusi kedalaman 3-100 nanometer.



Gambar 3.4 *Scanning electron microscope* (SEM) Inspect s50



c. *Surface roughness tester*

Pengukuran kekasaran permukaan benda kerja pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *Surftest* SJ-310 yang memiliki kecermatan hingga $0,01 \mu\text{m}$. Gambar 3.5 menunjukkan alat ukur Mitutoyo *Surftest* SJ-310.



Gambar 3.5 Mitutoyo *Surftest* SJ-310

3. Peralatan bantu yang terdiri dari:

- Gerinda dan kertas gosok

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

- Mistar insut

Alat ini digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja, dan mempunyai kecermatan hingga $0,05 \text{ mm}$.

- Meja rata

Meja rata digunakan untuk meletakkan benda kerja pada saat melakukan pengukuran kekasaran permukaan.

- *Stopwatch*

Alat ini digunakan untuk mengukur waktu pemotongan benda kerja pada saat melakukan percobaan.



3.4 Rancangan Percobaan

3.4.1. Pengaturan Variabel pada Mesin WEDM

Pengaturan variabel-variabel pada mesin WEDM dilakukan dengan mengacu pada buku *wire cut cutting data manual*. Nilai dari variabel-variabel yang digunakan adalah untuk kawat elektroda dengan diameter 0,25 mm dan ketebalan benda kerja 15 mm, serta untuk kondisi pemotongan kasar. Pengaturan nilai variabel-variabel konstan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel-variabel konstan

| No | Variabel konstan | Nilai | Satuan |
|----|--------------------------------|-------|---------|
| 1 | <i>Low power AC (LP)</i> | 0 | DCEN |
| 2 | <i>Arc off time (AFF)</i> | 13 | μ s |
| 3 | <i>Feed rate override (FR)</i> | 9 | mm/min |
| 4 | <i>Wire tension (WT)</i> | 8 | g |
| 5 | <i>Wire feed (WF)</i> | 10 | mm/s |
| 6 | <i>Water flow (WL)</i> | 6 | kg |
| 7 | <i>Feed rate mode (FM)</i> | 0 | servo |
| 8 | \varnothing Kawat elektroda | 0.25 | mm |

Penentuan level-level dari variabel-variabel proses dilakukan dengan beberapa pertimbangan, antara lain:

- Nilai masing-masing level mengacu pada buku *wire cut cutting data manual* dan penelitian-penelitian sebelumnya.
- Nilai pada level tersebut masih dapat digunakan pada proses pemotongan dan tidak terjadi *short circuit*. Hal ini bisa ditempuh dengan cara melakukan percobaan pendahuluan.

Oleh karena itu dilakukan percobaan pendahuluan dan masing-masing level dari variabel-variabel proses yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.



Tabel 3.3 Variabel-variabel proses dan masing-masing level

| No | Variabel proses | Satuan | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|----|---------------------------|--------|---------|---------|---------|
| 1 | <i>Arc on time</i> (AN) | A | 1 | 2 | - |
| 2 | <i>On time</i> (ON) | μs | 1 | 3 | 5 |
| 3 | <i>Off time</i> (OFF) | μs | 15 | 20 | 25 |
| 4 | <i>Open voltage</i> (OV) | V | 1 | 3 | 5 |
| 5 | <i>Servo voltage</i> (SV) | V | 45 | 50 | 55 |

3.4.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang akan digunakan dalam penelitian harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan variabel-variabel proses yang telah ditetapkan. Pada percobaan ini tantar variabel-variabel proses tidak dimasukkan kedalam rancangan percobaan. Derajat kebebasan dari variabel-variabel proses tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6 dan disajikan pada Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Total derajat kebebasan variabel-variabel respon

| No | Variabel proses | Jumlah Level (k) | df = (k-1) |
|--------------|---------------------------|------------------|------------|
| 1 | <i>Arc on time</i> (AN) | 2 | 1 |
| 2 | <i>Ontime</i> (ON) | 3 | 2 |
| 3 | <i>Off time</i> (OFF) | 3 | 2 |
| 4 | <i>Open voltage</i> (OV) | 3 | 2 |
| 5 | <i>Servo voltage</i> (SV) | 3 | 2 |
| Total | | | 9 |

Tabel 3.4 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan adalah sembilan, sedangkan jika dilihat dari jumlah levelnya rancangan diatas termasuk *mixed level*. Maka matriks ortogonal yang sesuai untuk percobaan dengan menggunakan persamaan 2.8 dengan derajat kebebasan sembilan dan memiliki satu variabel dengan dua level dan empat variabel dengan tiga level adalah $L_{18} (2^1 \times 3^4)$. Rancangan percobaan Taguchi matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^4)$ ditunjukkan pada Tabel 3.5:

Tabel 3.5 Rancangan percobaan Taguchi $L_{18} (2^1 \times 3^4)$

| Kombinasi | Variabel | | | | |
|-----------|----------|----|-----|----|----|
| | AN | ON | OFF | OV | SV |
| 1 | 1 | 1 | 15 | 1 | 45 |
| 2 | 1 | 1 | 20 | 3 | 50 |
| 3 | 1 | 1 | 25 | 5 | 55 |
| 4 | 1 | 3 | 15 | 1 | 50 |
| 5 | 1 | 3 | 20 | 3 | 55 |
| 6 | 1 | 3 | 25 | 5 | 45 |
| 7 | 1 | 5 | 15 | 3 | 45 |
| 8 | 1 | 5 | 20 | 5 | 50 |
| 9 | 1 | 5 | 25 | 1 | 55 |
| 10 | 2 | 1 | 15 | 5 | 55 |
| 11 | 2 | 1 | 20 | 1 | 45 |
| 12 | 2 | 1 | 25 | 3 | 50 |
| 13 | 2 | 3 | 15 | 3 | 55 |
| 14 | 2 | 3 | 20 | 5 | 45 |
| 15 | 2 | 3 | 25 | 1 | 50 |
| 16 | 2 | 5 | 15 | 5 | 50 |
| 17 | 2 | 5 | 20 | 1 | 55 |
| 18 | 2 | 5 | 25 | 3 | 45 |

Pengambilan data dilakukan secara acak dengan kombinasi variabel-variabel yang mengacu pada rancangan percobaan yang sesuai dengan matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^4)$ pada Tabel 3.5. Pengacakan rancangan penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bilangan random dan replikasi kombinasi variabel pada percobaan dilakukan sebanyak dua kali untuk mengatasi kesalahan-kesalahan akibat faktor *noise*. Tabel 3.6 menunjukkan urutan percobaan yang sesuai dengan kombinasi matriks ortogonal L_{18} .



Tabel 3.6 Urutan percobaan matriks ortogonal L_{18} ($2^1 \times 3^4$) replikasi pertama

| Urutan | Kombinasi | Variabel | | | | |
|--------|-----------|----------|----|-----|----|----|
| | | AN | ON | OFF | OV | SV |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 1 | 45 |
| 2 | 8 | 1 | 5 | 20 | 5 | 50 |
| 3 | 4 | 1 | 3 | 15 | 1 | 50 |
| 4 | 13 | 2 | 3 | 15 | 3 | 55 |
| 5 | 3 | 1 | 1 | 25 | 5 | 55 |
| 6 | 14 | 2 | 3 | 20 | 5 | 45 |
| 7 | 15 | 2 | 3 | 25 | 1 | 50 |
| 8 | 9 | 1 | 5 | 25 | 1 | 55 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 20 | 3 | 50 |
| 10 | 17 | 2 | 5 | 20 | 1 | 55 |
| 11 | 5 | 1 | 3 | 20 | 3 | 55 |
| 12 | 18 | 2 | 5 | 25 | 3 | 45 |
| 13 | 16 | 2 | 5 | 15 | 5 | 50 |
| 14 | 12 | 2 | 1 | 25 | 3 | 50 |
| 15 | 10 | 2 | 1 | 15 | 5 | 55 |
| 16 | 7 | 1 | 5 | 15 | 3 | 45 |
| 17 | 6 | 1 | 3 | 25 | 5 | 45 |
| 18 | 11 | 2 | 1 | 20 | 1 | 45 |

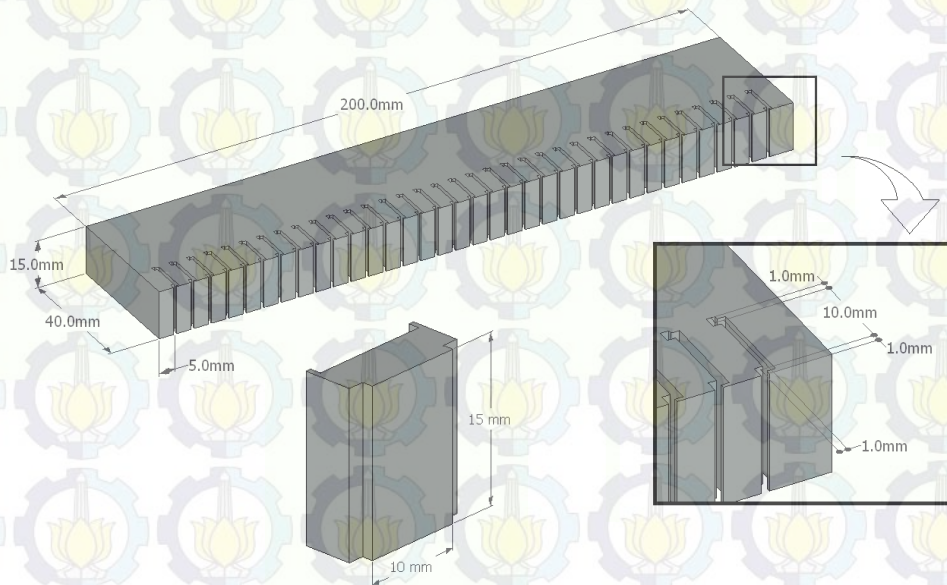
Setelah dilakukan pengacakan untuk percobaan pertama, dilakukan replikasi untuk menghindari *factor noise*, tabel replikasi kedua ditunjukkan pada Tabel 3.7.



Tabel 3.7 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^4)$ replikasi kedua

| Urutan | Kombinasi | Variabel | | | | |
|--------|-----------|----------|----|-----|----|----|
| | | AN | ON | OFF | OV | SV |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 1 | 45 |
| 2 | 12 | 2 | 1 | 25 | 3 | 50 |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 20 | 3 | 50 |
| 4 | 14 | 2 | 3 | 20 | 5 | 45 |
| 5 | 16 | 2 | 5 | 15 | 5 | 50 |
| 6 | 18 | 2 | 5 | 25 | 3 | 45 |
| 7 | 17 | 2 | 5 | 20 | 1 | 55 |
| 8 | 15 | 2 | 3 | 25 | 1 | 50 |
| 9 | 7 | 1 | 5 | 15 | 3 | 45 |
| 10 | 8 | 1 | 5 | 20 | 5 | 50 |
| 11 | 5 | 1 | 3 | 20 | 3 | 55 |
| 12 | 11 | 2 | 1 | 20 | 1 | 45 |
| 13 | 6 | 1 | 3 | 25 | 5 | 45 |
| 14 | 13 | 2 | 3 | 15 | 3 | 55 |
| 15 | 10 | 2 | 1 | 15 | 5 | 55 |
| 16 | 9 | 1 | 5 | 25 | 1 | 55 |
| 17 | 4 | 1 | 3 | 15 | 1 | 50 |
| 18 | 3 | 1 | 1 | 25 | 5 | 55 |

Pemotongan bahan dilakukan sepanjang 10 mm untuk masing-masing kombinasi dan dicatat waktu untuk setiap pemotongan pada masing-masing kombinasi. Setelah semua proses pemotongan dilakukan, kemudian dilakukan pengukuran untuk *kerf* yang terjadi selama proses pemesinan menggunakan *measurecope*. Benda kerja kemudian dipotong secara memanjang untuk mendapatkan 18 spesimen dan selanjutnya dilakukan pengukuran KP dengan menggunakan alat Mitutoyo *Surftest* SJ-310. Pengukuran tebal *recast* dilakukan setelah proses *etching* terlebih dahulu, agar area *recast* terlihat jelas. Skema proses pemotongan benda kerja ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema proses pemotongan

3.5 Langkah-langkah Percobaan

Langkah-langkah percobaan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membersihkan seluruh permukaan benda dari kotoran-kotoran yang bersifat isolator agar tidak mengganggu proses pemotongan.
2. Memasang benda kerja ke meja mesin WEDM kemudian diatur kelurusannya dengan menggunakan dial *indicator*.
3. Mengatur titik referensi pemesinan pada benda kerja yang sesuai dengan panduan program CNC yang telah dibuat.
4. Memasang kawat elektroda *zinc coated brass wire* dengan diameter 0,25 mm pada mesin WEDM.
5. Mengatur variabel-variabel pada mesin WEDM sesuai dengan rancangan percobaan yang telah ditetapkan pada penelitian pendahuluan.
6. Melakukan proses pemotongan berdasarkan urutan percobaan yang telah ditentukan pada Table 3.6 dan 3.7.
7. Mencatat waktu yang dibutuhkan pada setiap proses pemotongan untuk masing-masing percobaan.

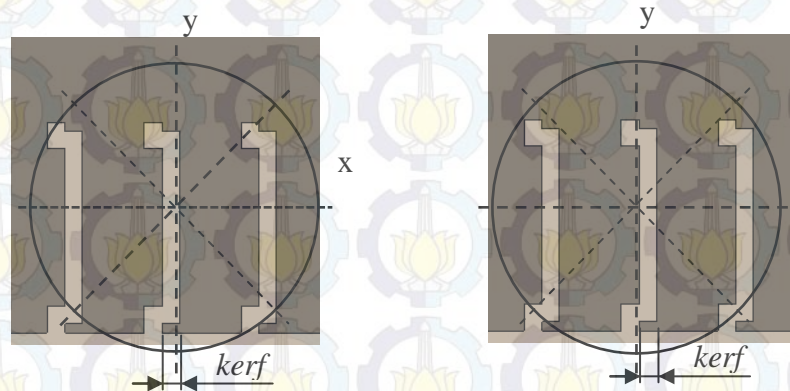


8. Melepas dan membersihkan benda kerja dari sisa cairan dielektrik yang dapat menyebabkan karat setelah proses pemotongan selesai.
9. Mengukur *kerf* dan panjang pemotongan dengan menggunakan *measurescope* untuk menghitung LPB dengan menggunakan rumus 2.5.
10. Mengukur KP dengan menggunakan *surface roughness tester*.
11. Mengambil gambar tebal LR yang terbentuk pada permukaan benda kerja dengan foto SEM. Selanjutnya perhitungan tebal LR dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Auto CAD*.

3.6 Pengambilan data dan Pengukuran

3.6.1. Pengambilan Data Lebar Pemotongan (*Kerf*)

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 *kerf* ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Skema proses pengukuran *kerf*

Pengukuran dilakukan dengan menempatkan salah satu sisi celah pemotongan sejajar dan tepat berimpit pada salah satu sumbu referensi (sumbu-x atau sumbu-y). Kemudian skala poros pengatur pergeseran meja diposisikan ke nol. Selanjutnya benda kerja digeser hingga sisi celah yang lain berimpit dengan sumbu referensi. Lebar pemotongan diperoleh dengan menghitung nilai pengukuran yang didapatkan dari posisi pertama dan kedua. Nilai pengukuran pada masing-masing posisi ditunjukkan oleh skala poros



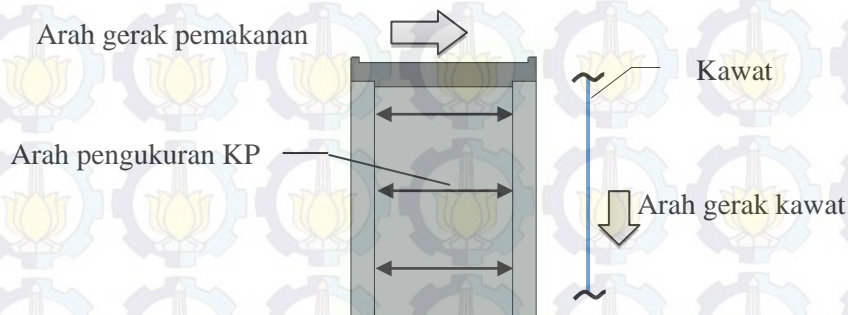
pengatur pergeseran yang terdapat pada *measurescope*. Untuk mendapatkan hasil yang baik pengukuran *kerf* dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan pada setiap *kerf*-nya kemudian hasilnya di rata-rata.

3.6.2 Pengambilan Data Laju Pengerjaan Bahan (LPB)

Penghitungan LPB dapat menggunakan persamaan 2.5. Panjang pemotongan aktual diukur dengan langkah yang sama seperti pada proses pengukuran *kerf*, yaitu dengan menggunakan *measurescope*. Panjang pemotongan aktual perlu diukur dengan menggunakan *measurescope* karena nilai panjang pemotongan aktual belum tentu sama dengan program CNC yang dibuat. Hal ini disebabkan karena pengaruh besar kecilnya energi saat proses pemotongan yang dapat menyebabkan penjang pemotongan aktual lebih besar daripada panjang pemotongan yang ada pada program CNC. Pengukuran panjang pemotongan dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan kemudian hasilnya di rata-rata.

3.6.3 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan (KP)

Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika (R_a) yang dinyatakan dalam μm . Untuk mendapatkan hasil KP yang baik, pengukuran KP dilakukan sebanyak tiga kali di daerah permukaan yang berbeda dan kemudian hasilnya di rata-rata. Arah pengukuran KP dilakukan secara tegak lurus dengan arah pemotongan. Tabel 2.1 merekomendasikan panjang sampel untuk pengukuran KP untuk tingkat kekasaran normal adalah sebesar 0,8 mm. Skema proses pengukuran KP ditunjukkan pada Gambar 3.8

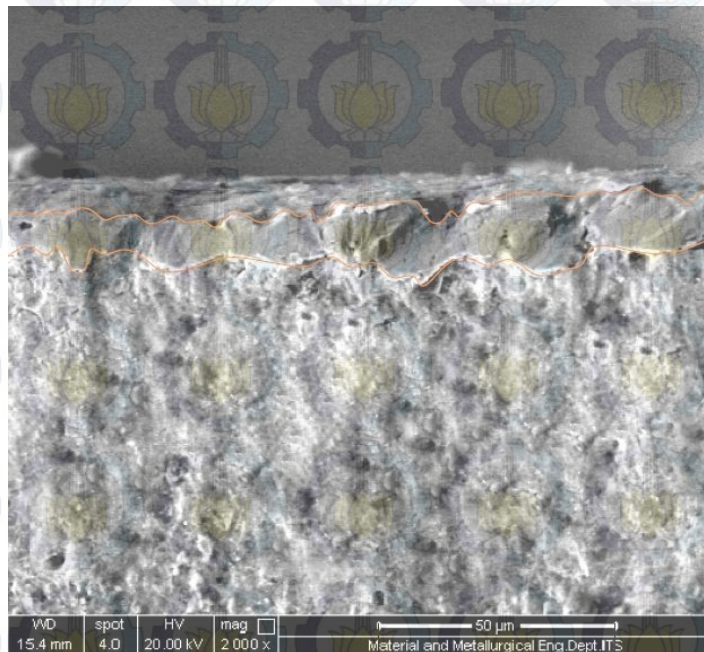


Gambar 3.8 Skema proses pengukuran KP



3.6.4 Pengambilan Data Tebal Lapisan *Recast* (LR)

Dalam melakukan pengukuran tebal LR pada benda kerja hasil pemotongan, dilakukan pengamatan lapisan *recast* dengan menggunakan alat SEM, dengan pembesaran 1000-2000 kali. Pengukuran tebal LR dilakukan pada setiap foto SEM dengan menggunakan bantuan perangkat lunak AutoCAD, yaitu dengan cara mengukur luasan lapisan *recast* kemudian dibagi dengan panjang dari lapisan *recast*, sehingga didapat tebal rata-rata lapisan *recast*.



Gambar 3.9 Proses pengukuran tebal LR

3.1 Karakteristik Respon Optimum

Karakteristik respon optimum yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik dan semakin besar semakin baik. Karakteristik semakin besar semakin baik berlaku untuk respon LPB. Karakteristik semakin kecil semakin baik berlaku untuk respon *kerf*, KP dan tebal LR. Nilai LPB yang paling diharapkan adalah yang paling maksimum, sedangkan *kerf*, KP, dan tebal LR yang paling minimum adalah yang paling diharapkan. Untuk perhitungan rasio S/N masing-masing variabel respon dilakukan dengan menggunakan perangkat komputasi statistik.



BAB 4

OPTIMASI MULTIRESPON DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengambilan Data Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan variabel-variabel yang terdapat pada mesin WEDM CHMER CW32GF yang diduga memiliki pengaruh terhadap respon lebar pemotongan (*kerf*), laju pengerjaan bahan (LPB), kekasaran permukaan (KP) dan tebal lapisan *recast* (LR). Lima variabel tersebut adalah *arc on time* (AN), *on time* (ON), *off time* (OFF), *open voltage* (OV) dan *servo voltage* (SV). Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^4)$ dengan replikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi *noise* yang terjadi selama proses pemesinan. Proses pemotongan dilakukan secara acak sesuai dengan kombinasi variabel-variabel yang telah dibuat.

Pengambilan data dilakukan dengan urutan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Pengukuran lebar pemotongan (*kerf*)

Proses pengukuran *kerf* dilakukan dengan melihat jarak hasil pemotongan antar benda kerja dengan menggunakan alat *measurescope*. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali untuk masing-masing kombinasi pada setiap replikasi dan data dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat di Lampiran 4.

b. Perhitungan laju pengerjaan bahan

Laju pengerjaan bahan dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4 dengan mencatat waktu proses pemotongan dan melakukan pengukuran panjang aktual yang dihasilkan pada proses pemotongan pada masing-masing benda kerja. Pengukuran panjang dilakukan sebanyak tiga kali untuk masing-masing replikasi dan dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat di Lampiran 5.

c. Pengukuran kekasaran permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat Mitutoyo *Surftest* SJ-310. Proses pengukuran dilakukan dengan arah tegak lurus terhadap arah pemotongan. Pengukuran dilakukan



sebanyak tiga kali untuk masing-masing kombinasi pada setiap replikasi dan dirata-ratakan. Data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 6.

d. Pengukuran tebal lapisan *recast*

Untuk melakukan proses pengukuran tebal lapisan *recast*, dilakukan pengamatan lapisan *recast* pada benda kerja hasil pemotongan dengan menggunakan alat *scanning electron microscope* (SEM) Inspect s50. Pengamatan dilakukan dengan pembesaran 1000-2000 μm . Pengamatan dapat dilihat pada Lampiran 7. Setelah dilakukan pengamatan, dilakukan pengukuran dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Auto CAD. Perhitungan lapisan *recast* dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.5. Dari pengukuran tersebut didapatkan data rata-rata tebal lapisan *recast* pada masing-masing benda kerja hasil pemotongan. Data dapat dilihat pada Lampiran 8.

Hasil percobaan secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan selanjutnya data diolah sesuai dengan langkah-langkah optimasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.

Tabel 4.1 Data hasil percobaan

| Komb. | Kerf (mm) | | LPB (mm^3/min) | | KP (μm) | | LR (μm) | |
|-------|-----------|-------|----------------------------------|--------|----------------------|-------|----------------------|--------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1 | 0.296 | 0.313 | 7.543 | 8.081 | 1.209 | 1.211 | 10.623 | 10.728 |
| 2 | 0.313 | 0.325 | 8.341 | 8.841 | 1.562 | 1.949 | 10.554 | 10.425 |
| 3 | 0.316 | 0.325 | 7.675 | 7.933 | 1.333 | 1.327 | 10.421 | 9.793 |
| 4 | 0.339 | 0.336 | 12.685 | 13.665 | 1.893 | 1.997 | 11.555 | 11.465 |
| 5 | 0.345 | 0.341 | 12.269 | 12.481 | 1.996 | 2.030 | 11.932 | 11.620 |
| 6 | 0.351 | 0.343 | 11.129 | 12.126 | 1.773 | 2.102 | 11.733 | 11.466 |
| 7 | 0.345 | 0.352 | 19.433 | 17.728 | 2.374 | 2.666 | 13.386 | 12.368 |
| 8 | 0.351 | 0.341 | 18.616 | 17.099 | 2.473 | 2.343 | 13.472 | 13.049 |
| 9 | 0.348 | 0.354 | 17.632 | 18.693 | 2.378 | 2.411 | 13.521 | 13.386 |
| 10 | 0.320 | 0.327 | 8.156 | 7.946 | 1.041 | 1.100 | 10.834 | 11.102 |
| 11 | 0.323 | 0.336 | 8.532 | 8.661 | 1.152 | 1.256 | 11.331 | 11.207 |
| 12 | 0.336 | 0.342 | 8.184 | 8.716 | 1.215 | 1.344 | 11.364 | 11.362 |
| 13 | 0.348 | 0.346 | 13.513 | 13.565 | 1.972 | 1.907 | 11.975 | 11.786 |



Tabel 4.1 Data hasil percobaan (lanjutan)

| Komb. | Kerf (mm) | | LPB (mm ³ /min) | | KP (μm) | | LR (μm) | |
|-------|-----------|-------|----------------------------|--------|---------|-------|---------|--------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 14 | 0.348 | 0.346 | 13.167 | 14.960 | 1.987 | 1.704 | 12.320 | 12.092 |
| 15 | 0.347 | 0.344 | 12.274 | 12.189 | 2.034 | 1.969 | 12.447 | 12.189 |
| 16 | 0.368 | 0.350 | 19.494 | 20.631 | 2.381 | 2.332 | 13.897 | 15.622 |
| 17 | 0.374 | 0.358 | 20.835 | 20.526 | 2.563 | 2.472 | 14.349 | 14.101 |
| 18 | 0.385 | 0.399 | 18.469 | 19.395 | 2.850 | 2.722 | 17.174 | 13.754 |

Sumber: Hasil pengukuran

4.2. Perhitungan Rasio S/N

Rasio S/N merupakan rancangan untuk melakukan transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Nilai rasio S/N dihitung tergantung dari jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon. Respon LPB memiliki karakteristik semakin besar semakin baik, dan rasio S/N dihitung dengan menggunakan persamaan 2.29. Rasio S/N *kerf*, KP dan LR dihitung dengan menggunakan persamaan 2.27 karena memiliki karakteristik kualitas respon semakin kecil semakin baik.

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

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

$$S/N = -10 \log \left[\frac{(1/7.54^2) + (1/8.081^2)}{2} \right]$$

$$S/N = -10 \log 0,01644$$

$$S/N = 17,8398$$

Sesuai dengan rumus perhitungan rasio S/N untuk setiap karakteristik kualitas pada masing-masing respon, nilai rasio S/N *kerf*, LPB, KP dan LR ditunjukkan pada Tabel 4.2.



Tabel 4.2 Data rasio S/N

| Komb. | Variabel proses | | | | | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR |
|-------|-----------------|----|-----|------|----|-------------|---------|---------|----------|
| | AN | ON | OFF | OV | SV | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 15 | 1 | 45 | 10.3249 | 17.8398 | -1.6546 | -20.5679 |
| 2 | 1 | 1 | 20 | 3 | 50 | 9.9227 | 18.6698 | -4.9413 | -20.4153 |
| 3 | 1 | 1 | 25 | 5 | 55 | 9.8826 | 17.8431 | -2.4751 | -20.0966 |
| 4 | 1 | 3 | 15 | 1 | 50 | 9.4331 | 22.3770 | -5.7815 | -21.2216 |
| 5 | 1 | 3 | 20 | 3 | 55 | 9.2940 | 21.8502 | -6.0785 | -21.4207 |
| 6 | 1 | 3 | 25 | 5 | 45 | 9.1928 | 21.2855 | -5.7759 | -21.2894 |
| 7 | 1 | 5 | 15 | 3 | 45 | 9.1555 | 25.3537 | -8.0426 | -22.2031 |
| 8 | 1 | 5 | 20 | 5 | 50 | 9.2176 | 25.0127 | -7.6374 | -22.4523 |
| 9 | 1 | 5 | 25 | 1 | 55 | 9.0935 | 25.1725 | -7.5845 | -22.5768 |
| 10 | 2 | 1 | 15 | 5 | 55 | 9.8020 | 18.1147 | -0.5975 | -20.8032 |
| 11 | 2 | 1 | 20 | 1 | 45 | 9.6412 | 18.6856 | -1.6228 | -21.0378 |
| 12 | 2 | 1 | 25 | 3 | 50 | 9.3957 | 18.5242 | -2.1519 | -21.1099 |
| 13 | 2 | 3 | 15 | 3 | 55 | 9.1934 | 22.6316 | -5.7550 | -21.4970 |
| 14 | 2 | 3 | 20 | 5 | 45 | 9.1934 | 22.9090 | -5.3470 | -21.7318 |
| 15 | 2 | 3 | 25 | 1 | 50 | 9.2310 | 21.7496 | -6.0296 | -21.8113 |
| 16 | 2 | 5 | 15 | 5 | 50 | 8.8954 | 26.0374 | -7.4464 | -23.3962 |
| 17 | 2 | 5 | 20 | 1 | 55 | 8.7283 | 26.3104 | -8.0208 | -23.0614 |
| 18 | 2 | 5 | 25 | 3 | 45 | 8.1329 | 25.5361 | -8.9019 | -23.8392 |
| | | | | Maks | | 10.3249 | 26.3104 | -0.5975 | -20.0966 |
| | | | | Min | | 8.1329 | 17.8398 | -8.9019 | -23.8392 |

Sumber: Hasil perhitungan

4.3. Normalisasi Rasio S/N

Normalisasi dilakukan untuk mentransformasi nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara nol sampai satu. Proses normalisasi dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respon rasio S/N. Karakteristik kualitas untuk rasio S/N adalah semakin besar semakin baik. Karakteristik kualitas respon semakin besar semakin baik berlaku untuk masing-masing rasio S/N *kerf*, LPB, KP dan LR.

Perhitungan normalisasi rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.16.

Contoh perhitungan normalisasi rasio S/N untuk respon LPB pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:



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

$$X_i^*(1) = \frac{17,8398 - 17,8398}{26,3104 - 17,8398}$$

$$X_i^*(1) = 0,0000$$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N untuk masing-masing respon pada setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Data normalisasi rasio S/N

| Komb. | Rasio S/N | | | | X_i^* | | | |
|-------|-------------|---------|---------|----------|-------------|--------|--------|--------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR |
| 1 | 10.3249 | 17.8398 | -1.6546 | -20.5679 | 1.0000 | 0.0000 | 0.8727 | 0.8741 |
| 2 | 9.9227 | 18.6698 | -4.9413 | -20.4153 | 0.8165 | 0.0980 | 0.4769 | 0.9149 |
| 3 | 9.8826 | 17.8431 | -2.4751 | -20.0966 | 0.7982 | 0.0004 | 0.7739 | 1.0000 |
| 4 | 9.4331 | 22.3770 | -5.7815 | -21.2216 | 0.5932 | 0.5356 | 0.3758 | 0.6994 |
| 5 | 9.2940 | 21.8502 | -6.0785 | -21.4207 | 0.5297 | 0.4734 | 0.3400 | 0.6462 |
| 6 | 9.1928 | 21.2855 | -5.7759 | -21.2894 | 0.4836 | 0.4068 | 0.3764 | 0.6813 |
| 7 | 9.1555 | 25.3537 | -8.0426 | -22.2031 | 0.4665 | 0.8871 | 0.1035 | 0.4372 |
| 8 | 9.2176 | 25.0127 | -7.6374 | -22.4523 | 0.4948 | 0.8468 | 0.1523 | 0.3706 |
| 9 | 9.0935 | 25.1725 | -7.5845 | -22.5768 | 0.4383 | 0.8657 | 0.1586 | 0.3373 |
| 10 | 9.8020 | 18.1147 | -0.5975 | -20.8032 | 0.7615 | 0.0325 | 1.0000 | 0.8112 |
| 11 | 9.6412 | 18.6856 | -1.6228 | -21.0378 | 0.6881 | 0.0999 | 0.8765 | 0.7485 |
| 12 | 9.3957 | 18.5242 | -2.1519 | -21.1099 | 0.5761 | 0.0808 | 0.8128 | 0.7293 |
| 13 | 9.1934 | 22.6316 | -5.7550 | -21.4970 | 0.4838 | 0.5657 | 0.3789 | 0.6258 |
| 14 | 9.1934 | 22.9090 | -5.3470 | -21.7318 | 0.4838 | 0.5984 | 0.4281 | 0.5631 |
| 15 | 9.2310 | 21.7496 | -6.0296 | -21.8113 | 0.5009 | 0.4616 | 0.3459 | 0.5419 |
| 16 | 8.8954 | 26.0374 | -7.4464 | -23.3962 | 0.3479 | 0.9678 | 0.1753 | 0.1184 |
| 17 | 8.7283 | 26.3104 | -8.0208 | -23.0614 | 0.2716 | 1.0000 | 0.1061 | 0.2078 |
| 18 | 8.1329 | 25.5361 | -8.9019 | -23.8392 | 0.0000 | 0.9086 | 0.0000 | 0.0000 |

Sumber: Hasil perhitungan

4.4. Perhitungan Nilai *Deviation Sequence*

Nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi dari masing-masing respon. *Deviation sequence* dihitung dengan menggunakan persamaan 2.33.



Contoh perhitungan nilai $\Delta_{0,i}(k)$ respon LPB pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

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

$$\Delta_{0,i}(1) = |1 - 1|$$

$$\Delta_{0,i}(1) = 0$$

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

Tabel 4.4 *Deviation sequence* masing-masing respon

| Komb. | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR |
|-------|-------------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.0000 | 1.0000 | 0.1273 | 0.1259 |
| 2 | 0.1835 | 0.9020 | 0.5231 | 0.0851 |
| 3 | 0.2018 | 0.9996 | 0.2261 | 0.0000 |
| 4 | 0.4068 | 0.4644 | 0.6242 | 0.3006 |
| 5 | 0.4703 | 0.5266 | 0.6600 | 0.3538 |
| 6 | 0.5164 | 0.5932 | 0.6236 | 0.3187 |
| 7 | 0.5335 | 0.1129 | 0.8965 | 0.5628 |
| 8 | 0.5052 | 0.1532 | 0.8477 | 0.6294 |
| 9 | 0.5617 | 0.1343 | 0.8414 | 0.6627 |
| 10 | 0.2385 | 0.9675 | 0.0000 | 0.1888 |
| 11 | 0.3119 | 0.9001 | 0.1235 | 0.2515 |
| 12 | 0.4239 | 0.9192 | 0.1872 | 0.2707 |
| 13 | 0.5162 | 0.4343 | 0.6211 | 0.3742 |
| 14 | 0.5162 | 0.4016 | 0.5719 | 0.4369 |
| 15 | 0.4991 | 0.5384 | 0.6541 | 0.4581 |
| 16 | 0.6521 | 0.0322 | 0.8247 | 0.8816 |
| 17 | 0.7284 | 0.0000 | 0.8939 | 0.7922 |
| 18 | 1.0000 | 0.0914 | 1.0000 | 1.0000 |
| Maks | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Min | 0 | 0 | 0 | 0 |

Sumber: Hasil perhitungan

4.5 Perhitungan *Grey Relational Coefficient* (GRC)

GRC merupakan hubungan antara kondisi yang ideal dengan kondisi aktual respon dari nilai *deviation sequence* yang telah diperoleh. Nilai GRC dihitung berdasarkan nilai $\Delta_{0,i}(k)$ pada masing-masing responnya.



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

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

$$\xi_i(1) = \frac{0,000 + 0.5 \times 1,000}{1 + 0.5 \times 1,000}$$

$$\xi_i(1) = 0,3333$$

Hasil perhitungan GRC untuk masing-masing respon pada kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 *Grey relational coefficient* masing-masing respon

| Komb. | Kerf | LPB | KP | LR |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1.0000 | 0.3333 | 0.7971 | 0.7988 |
| 2 | 0.7315 | 0.3566 | 0.4887 | 0.8545 |
| 3 | 0.7125 | 0.3334 | 0.6886 | 1.0000 |
| 4 | 0.5514 | 0.5185 | 0.4447 | 0.6245 |
| 5 | 0.5153 | 0.4871 | 0.4310 | 0.5856 |
| 6 | 0.4919 | 0.4574 | 0.4450 | 0.6107 |
| 7 | 0.4838 | 0.8157 | 0.3580 | 0.4704 |
| 8 | 0.4974 | 0.7655 | 0.3710 | 0.4427 |
| 9 | 0.4709 | 0.7882 | 0.3728 | 0.4300 |
| 10 | 0.6770 | 0.3407 | 1.0000 | 0.7259 |
| 11 | 0.6158 | 0.3571 | 0.8020 | 0.6653 |
| 12 | 0.5412 | 0.3523 | 0.7276 | 0.6487 |
| 13 | 0.4920 | 0.5352 | 0.4460 | 0.5720 |
| 14 | 0.4920 | 0.5546 | 0.4665 | 0.5337 |
| 15 | 0.5005 | 0.4815 | 0.4332 | 0.5218 |
| 16 | 0.4340 | 0.9394 | 0.3774 | 0.3619 |
| 17 | 0.4070 | 1.0000 | 0.3587 | 0.3869 |
| 18 | 0.3333 | 0.8454 | 0.3333 | 0.3333 |

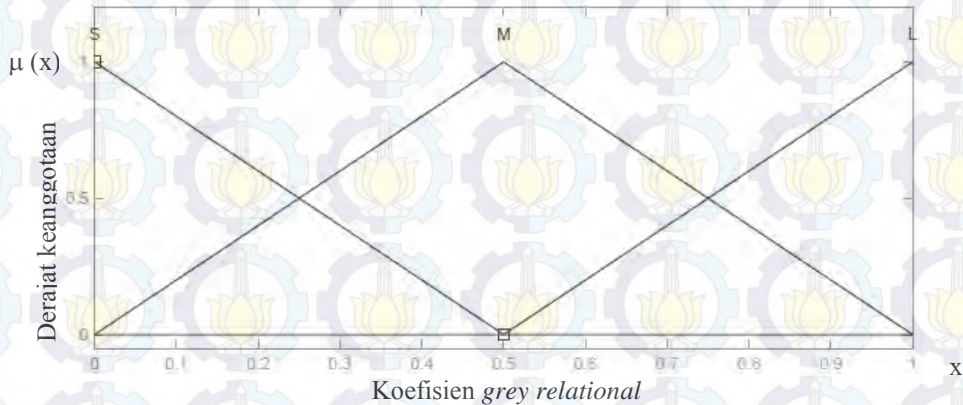
Sumber: Hasil perhitungan

4.6 *Fuzzification*

Fuzzification merupakan proses pengubahan *input* menjadi bilangan fuzzy dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Variabel-variabel input dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini menggunakan nilai GRC dari masing-masing respon *kerf*, LPB, KP dan LR. Nilai GRC dari masing-masing respon akan diubah

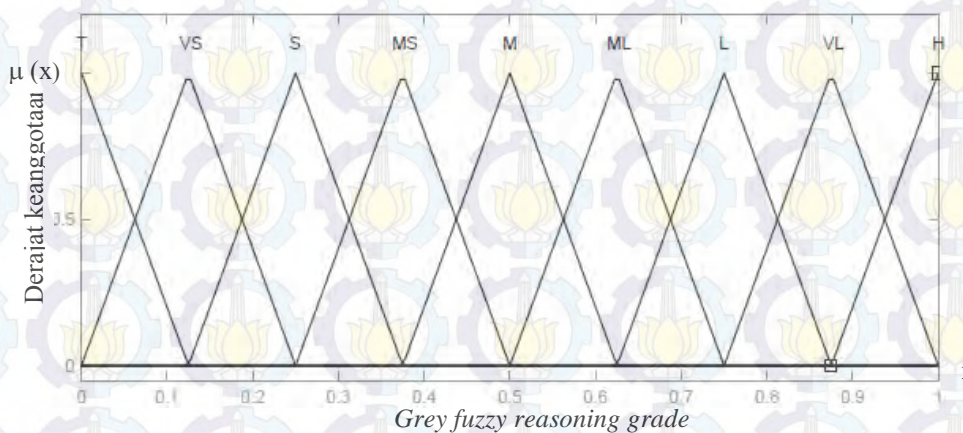


kedalam *linguistic fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang digunakan pada variabel *input* adalah bentuk segitiga (*triangle*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Fungsi keanggotaan dari masing-masing respon dikelompokkan secara *uniform* kedalam tiga kelas *fuzzy subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M) dan *large* (L).



Gambar 4.1. Fungsi keanggotaan dari masing-masing respon

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



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



4.7 Penentuan Fuzzy Rules

Dasar aturan *fuzzy* adalah sekelompok aturan dengan menggunakan pengontrolan jika-maka (*if-then control*) yang menyatakan hubungan antara variabel *input* dan variabel *output*. Pada penelitian ini terdapat empat variabel *input*, yaitu GRC dari respon *kerf*, LPB, KP dan LR dengan masing-masing memiliki tiga *fuzzy subsets*. *Fuzzy rules* yang dibutuhkan untuk mengkombinasikan seluruh variabel *input* adalah sebanyak delapan puluh satu *fuzzy rules*. Tabel 4.6 menunjukkan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini. Arti dari *fuzzy rules* pada Tabel 4.6 adalah sebagai berikut:

Rule 1 : Jika GRC (*kerf*) adalah S dan GRC (LPB) adalah S dan GRC (KP) adalah S dan GRC (LR) adalah S, maka GFRG adalah T.

Rule 2 : Jika GRC (*kerf*) adalah S dan GRC (LPB) adalah S dan GRC (KP) adalah S dan GRC (LR) adalah M, maka GFRG adalah VS.

...

Rule 81 : Jika GRC (*kerf*) adalah L dan GRC (LPB) adalah L dan GRC (KP) adalah L dan GRC (LR) adalah L, maka GFRG adalah H.

Tabel 4.6 Fuzzy rules

| Rules no. | Variabel input GRC | | | | Variabel output GFRG |
|-----------|--------------------|-----|----|----|----------------------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR | |
| 1 | S | S | S | S | T |
| 2 | S | S | S | M | VS |
| 3 | S | S | S | L | MS |
| 4 | S | S | M | S | T |
| 5 | S | S | M | M | S |
| 6 | S | S | M | L | MS |
| 7 | S | S | L | S | VS |
| 8 | S | S | L | M | MS |
| 9 | S | S | L | L | ML |
| 10 | S | M | S | S | T |
| 11 | S | M | S | M | S |
| 12 | S | M | S | L | M |
| 13 | S | M | M | S | VS |
| 14 | S | M | M | M | MS |
| 15 | S | M | M | L | ML |
| 16 | S | M | L | S | S |
| 17 | S | M | L | M | M |



Tabel 4.6 *Fuzzy rules* (lanjutan)

| <i>Rules</i> no. | <i>Kerf</i> | Variabel <i>input</i> GRC | | | Variabel <i>output</i> GFRG |
|---------------------|-------------|---------------------------|----|----|-----------------------------------|
| | | LPB | KP | LR | |
| 18 | S | M | L | L | L |
| 19 | S | L | S | S | VS |
| 20 | S | L | S | M | MS |
| 21 | S | L | S | L | ML |
| 22 | S | L | M | S | S |
| 23 | S | L | M | M | M |
| 24 | S | L | M | L | L |
| 25 | S | L | L | S | MS |
| 26 | S | L | L | M | ML |
| 27 | S | L | L | L | VL |
| 28 | M | S | S | S | T |
| 29 | M | S | S | M | S |
| 30 | M | S | S | L | M |
| 31 | M | S | M | S | VS |
| 32 | M | S | M | M | MS |
| 33 | M | S | M | L | ML |
| 34 | M | S | L | S | S |
| 35 | M | S | L | M | M |
| 36 | M | S | L | L | L |
| 37 | M | M | S | S | VS |
| 38 | M | M | S | M | MS |
| 39 | M | M | S | L | ML |
| 40 | M | M | M | S | S |
| 41 | M | M | M | M | M |
| 42 | M | M | M | L | L |
| 43 | M | M | L | S | MS |
| 44 | M | M | L | M | ML |
| 45 | M | M | L | L | VL |
| 46 | M | L | S | S | S |
| 47 | M | L | S | M | M |
| 48 | M | L | S | L | L |
| 49 | M | L | M | S | MS |
| 50 | M | L | M | M | ML |
| 51 | M | L | M | L | VL |
| 52 | M | L | L | S | M |
| 53 | M | L | L | M | L |
| 54 | M | L | L | L | VL |
| 55 | L | S | S | S | VS |
| 56 | L | S | S | M | MS |
| 57 | L | S | S | L | ML |

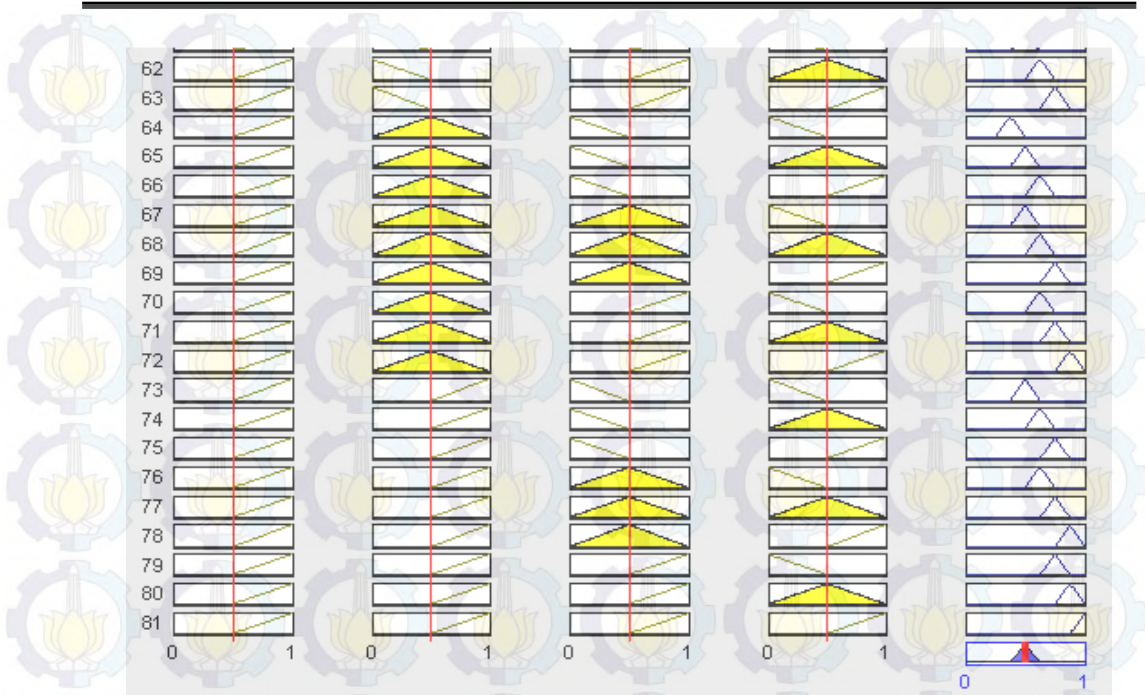


Tabel 4.6 *Fuzzy rules* (lanjutan)

| <i>Rules</i> no. | <i>Kerf</i> | Variabel <i>input</i> GRC | | | Variabel <i>output</i> GFRG |
|---------------------|-------------|---------------------------|----|----|-----------------------------------|
| | | LPB | KP | LR | |
| 58 | L | S | M | S | S |
| 59 | L | S | M | M | M |
| 60 | L | S | M | L | L |
| 61 | L | S | L | S | MS |
| 62 | L | S | L | M | ML |
| 63 | L | S | L | L | VL |
| 64 | L | M | S | S | S |
| 65 | L | M | S | M | M |
| 66 | L | M | S | L | L |
| 67 | L | M | M | S | MS |
| 68 | L | M | M | M | ML |
| 69 | L | M | M | L | VL |
| 70 | L | M | L | S | M |
| 71 | L | M | L | M | L |
| 72 | L | M | L | L | VL |
| 73 | L | L | S | S | MS |
| 74 | L | L | S | M | ML |
| 75 | L | L | S | L | VL |
| 76 | L | L | M | S | M |
| 77 | L | L | M | M | L |
| 78 | L | L | M | L | VL |
| 79 | L | L | L | S | ML |
| 80 | L | L | L | M | VL |
| 81 | L | L | L | L | H |

4.8 *Defuzzification*

Defuzzification merupakan proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke dalam himpunan tegas. GRC dari masing-masing respon digunakan sebagai variabel *input* pada proses *defuzzification*. Variabel *input* kemudian diolah didalam *fuzzy inference engine* berdasarkan komposisi *fuzzy rules* yang telah ditetapkan untuk menghasilkan suatu output. *Output* yang dihasilkan adalah GFRG yang berupa suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy*. Proses *defuzzification* dilakukan dengan menggunakan metode *centroid* (titik tengah). Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses penegasan ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 ilustrasi *fuzzy rules* (lanjutan)

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

Tabel 4.7 *Grey fuzzy reasoning grade* (GFRG)

| No. | GFRG | No. | GFRG |
|-----|--------|-----|--------|
| 1 | 0.7128 | 10 | 0.6881 |
| 2 | 0.587 | 11 | 0.6134 |
| 3 | 0.6872 | 12 | 0.5758 |
| 4 | 0.5488 | 13 | 0.5174 |
| 5 | 0.5054 | 14 | 0.5185 |
| 6 | 0.4896 | 15 | 0.477 |
| 7 | 0.5083 | 16 | 0.4816 |
| 8 | 0.5001 | 17 | 0.5043 |
| 9 | 0.4859 | 18 | 0.4158 |

Sumber: Hasil perhitungan

4.9 Hasil Optimasi

Rancangan percobaan Taguchi berupa matriks ortogonal yang mampu untuk mengelompokkan pengaruh dari masing-masing variabel pada pada level yang berbeda.



Contoh perhitungan rata-rata nilai GFRG variabel proses AN pada level 1 adalah sebagai berikut:

$$\bar{\eta}_V = \frac{0.7128 + 0.5870 + 0.6872 + 0.5488 + 0.5054 + 0.4896 + 0.5083 + 0.5001 + 0.4895}{9}$$

$$\bar{\eta}_V = 0,5583$$

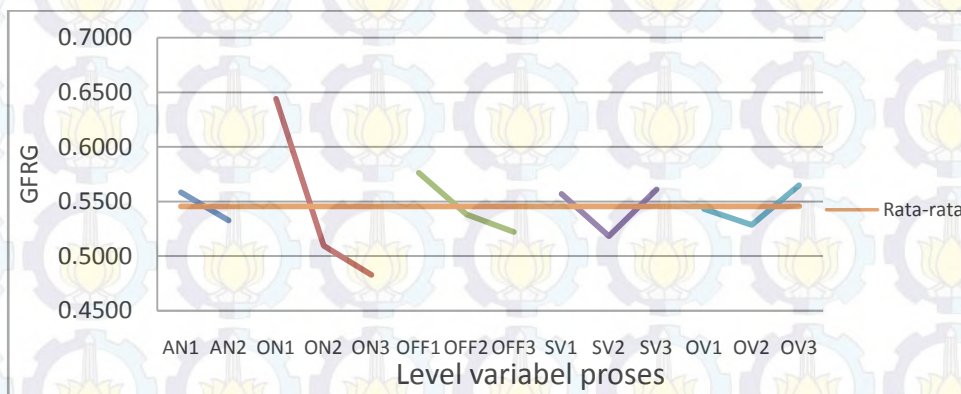
Perhitungan rata-rata nilai GFRG pada masing-masing variabel proses untuk setiap levelnya ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Rata-rata nilai GFRG pada masing-masing level

| Variabel proses | Level 1 | Level 2 | Level 3 | Selisih |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| AN | 0.5583 | 0.5324 | | 0.0259 |
| ON | 0.6441 | 0.5095 | 0.4827 | 0.1614 |
| OFF | 0.5762 | 0.5381 | 0.5219 | 0.0543 |
| OV | 0.5570 | 0.5183 | 0.5609 | 0.0426 |
| SV | 0.5431 | 0.5284 | 0.5647 | 0.0363 |
| Rata-rata total | 0.5454 | | | |

Sumber: Hasil perhitungan

Plot untuk nilai hasil rata-rata GFRG pada setiap masing-masing level dari variabel proses AN, ON, OFF, OV dan SV ditunjukkan pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 Plot nilai GFRG masing-masing level variabel proses

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



Tabel 4.9 Kombinasi variabel proses respon optimum

| Variabel proses | Level | Nilai |
|-----------------|-------|------------|
| AN | 1 | 1 A |
| ON | 1 | 1 μ s |
| OFF | 1 | 15 μ s |
| OV | 3 | 95 V |
| SV | 3 | 55 V |

Sumber: Hasil perhitungan

4.10 Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon dan besarnya kontribusi faktor terhadap respon. Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada GFRG yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon.

Contoh perhitungan ANOVA GFRG dilakukan berdasarkan rumus pada Tabel 2.40 adalah sebagai berikut:

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

$$SS_T = (0.7128 - 0.5454)^2 + (0.5870 - 0.5454)^2 + (0.6872 - 0.5454)^2 + (0.5488 - 0.5454)^2 + (0.5054 - 0.5454)^2 + (0.4896 - 0.5454)^2 + (0.5083 - 0.5454)^2 + (0.5001 - 0.5454)^2 + (0.4859 - 0.5454)^2 + (0.6881 - 0.5454)^2 + (0.6134 - 0.5454)^2 + (0.5758 - 0.5454)^2 + (0.5174 - 0.5454)^2 + (0.5185 - 0.5454)^2 + (0.4770 - 0.5454)^2 + (0.4816 - 0.5454)^2 + (0.5043 - 0.5454)^2 + (0.4158 - 0.5454)^2$$

$$SS_T = 0,11621$$

$$SS_{AN} = n_{AN} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$$

$$SS_{AN} = 9 \times [(0.5583 - 0.5454)^2 + (0.5324 - 0.5454)^2]$$

$$SS_{AN} = 0,003021$$

$$MS_{AN} = \frac{SS_{AN}}{df_{AN}}$$

$$MS_{AN} = \frac{0,003021}{1}$$

$$MS_{AN} = 0,003021$$



Hasil perhitungan ANAVA untuk GFRG secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.10 beserta persen kontribusi untuk masing-masing faktor. Persentase kontribusi dihitung dari hasil analisis variansi dengan menggunakan persamaan 2.41 dan 2.42.

Contoh perhitungan persen kontribusi untuk variabel proses AN adalah sebagai berikut:

$$SS'_{AN} = SS_{AN} - db_{AN} \cdot MS_E$$

$$SS'_{AN} = 0,003021 - 1 \times 0,00043$$

$$SS'_{AN} = 0,02978$$

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

$$\rho_{AN} = \frac{0,02978}{0,11621} \times 100\%$$

$$\rho_{AN} = 2,23\%$$

Tabel 4.10 ANAVA dan kontribusi GFRG

| Source | DF | SS | MS | F | P | contribution |
|--------|----|----------|----------|--------|-------|--------------|
| AN | 1 | 0.003021 | 0.003021 | 7.01 | 0.029 | 2.23% |
| ON | 2 | 0.089758 | 0.044879 | 104.14 | 0 | 76.50% |
| OFF | 2 | 0.009316 | 0.004658 | 10.81 | 0.005 | 7.27% |
| OV | 2 | 0.006656 | 0.003328 | 7.72 | 0.014 | 4.99% |
| SV | 2 | 0.004009 | 0.002004 | 4.65 | 0.046 | 2.71% |
| Error | 8 | 0.003448 | 0.000431 | | | 6.31% |
| Total | 17 | 0.116208 | | | | 100% |

Sumber: Hasil perhitungan

Berdasarkan *p-value* pada Tabel 4.10 terlihat bahwa seluruh variabel proses memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GFRG. Persen kontribusi menunjukkan pengaruh dari masing-masing variabel proses terhadap total variasi respon yang diamati. Jika besar persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besar persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka mengindikasikan ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan.

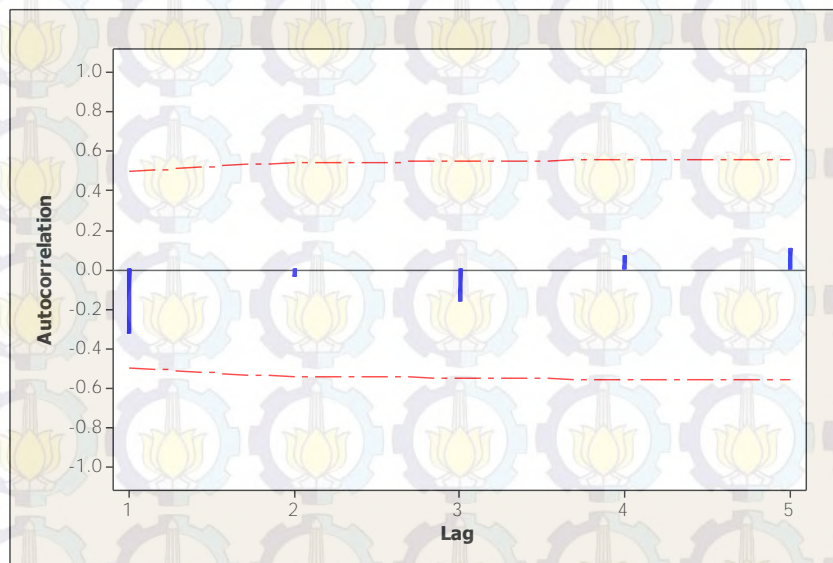


4.11 Pengujian Asumsi Residual

Syarat untuk keabsahan analisis variansi adalah residual harus memenuhi asumsi IIDN $(0, \sigma^2)$, yaitu residual harus bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan mean nol dan nilai variansi tertentu. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

a. Uji Independen

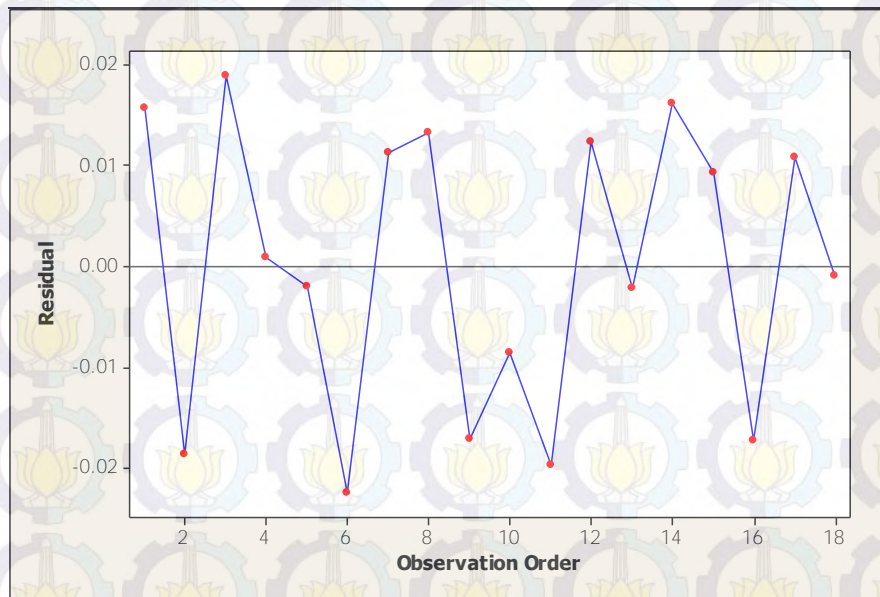
Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual yang berarti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



Gambar 4.5 Plot ACF

b. Uji Identik

Uji residual bersifat identik pada penelitian ini dilakukan secara visual, yaitu dengan mengamati plot antara residual dan *observation order values* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dari plot menunjukkan bahwa data tersebar secara acak dan tidak membentuk tren atau pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual bersifat identik terpenuhi



Gambar 4.6 Plot *residual versus observation order values*

c. Uji Kenormalan

Pengujian asumsi residual normal $(0, \sigma^2)$ dilakukan melalui uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : Residual berdistribusi normal

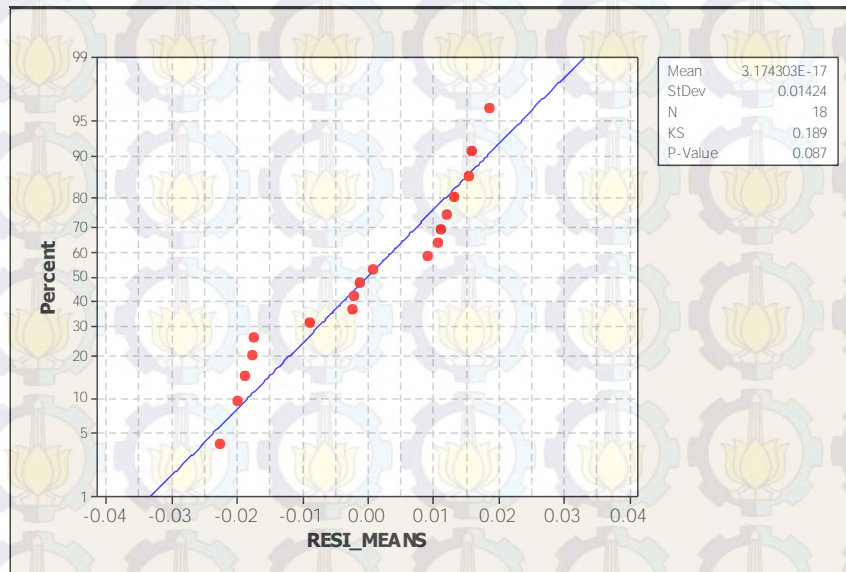
H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

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

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- *p-value* 0,087 yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar $3,174303E-17$ yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi residual adalah sebesar $(0,189)^2 = 0,035721$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variasi tertentu (sebesar 0,035721) telah terpenuhi.



Gambar 4.7 Plot uji distribusi normal

4.12 Prediksi Respon Optimum

Prediksi dari nilai GFRG optimum dapat dihitung berdasarkan kombinasi nilai rata-rata GFRG pada masing-masing level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.9. Kombinasi dari variabel proses yang berpengaruh dan menghasilkan nilai GFRG yang optimum adalah sebagai berikut:

- Variabel proses AN pada level 1
- Variabel proses ON pada level 1
- Variabel proses OFF pada level 1
- Variabel proses OV pada level 3
- Variabel proses SV pada level 3

Nilai prediksi GFRG dihitung dengan menggunakan persamaan 2.40 sebagai berikut:

$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{y}_i - \gamma_m)$$

$$\hat{\mu} = 0.5454 + (0.5583 - 0.5454) + (0.6441 - 0.5454) + (0.5762 - 0.5454) + (0.5609 - 0.5454) + (0.5647 - 0.5454)$$

$$= 0,7226$$



Dari perhitungan diperoleh nilai rata-rata GFRG prediksi untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimum adalah sebesar 0,7226. Penentuan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi dihitung berdasarkan persamaan 2.45. Jumlah pengamatan efektif dihitung dengan menggunakan persamaan 2.46 sebagai berikut:

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

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

$$n_{\text{eff}} = 3,6$$

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

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E}{n_{\text{eff}}}}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(0,05,1,8)} 0,00043}{3,6}}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{5,31 \times 0,00043}{3,6}}$$

$$CI_p = \pm 0,02521$$

Dengan demikian interval keyakinan nilai rata-rata GFRG prediksi yang menghasilkan respon optimum dengan tingkat keyakinan 95% adalah $0,7226 \pm 0,02521$ ($0,6974 \leq \hat{\mu}_{\text{GFRG}} \leq 0,7478$).

4.13 Percobaan Konfirmasi

Untuk memvalidasi hasil percobaan yang telah dilakukan, maka perlu dilakukan pembandingan antara nilai rata-rata GFRG hasil percobaan konfirmasi dengan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi. Oleh karena itu perlu dilakukan percobaan konfirmasi. Percobaan konfirmasi dilakukan dengan pengaturan menggunakan kombinasi optimum hasil optimasi seperti yang



ditunjukkan pada Tabel 4.9. Pada penelitian ini percobaan konfirmasi dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali. Hasil dari percobaan konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil respon percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum

| Percobaan | <i>Kerf</i> (mm) | LPB (mm ³ /min) | KP (μm) | LR (μm) |
|-----------|---------------------|-------------------------------|------------|------------|
| 1 | 0.307 | 8.835 | 1.218 | 10.231 |
| 2 | 0.288 | 8.725 | 1.169 | 10.159 |
| 3 | 0.297 | 9.144 | 1.102 | 10.239 |
| Rata-rata | 0.297 | 8.901 | 1.163 | 10.210 |

Sumber: Hasil percobaan

Langkah berikutnya yaitu perhitungan rasio S/N terhadap nilai-nilai respon yang diperoleh dari percobaan konfirmasi. Hasil perhitungan rasio S/N pada masing-masing respon percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Rasio S/N percobaan konfirmasi kombinasi optimum

| | Rasio S/N | | | |
|-------------------|-------------|---------|---------|----------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR |
| Kombinasi optimum | 10.5322 | 18.9840 | -1.3188 | -20.1803 |

Setelah menghitung rasio S/N kemudian dilakukan perhitungan *deviation sequence* dan GRC. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan GFRG. Hasil perhitungan GFRG percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 GRC dan GFRG percobaan konfirmasi kombinasi optimum

| | Rasio S/N | | | | GFRG |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR | |
| Kombinasi optimum | 0.8409 | 0.3663 | 0.8520 | 0.9572 | 0.7138 |

Interval keyakinan rata-rata GFRG percobaan konfirmasi dihitung dengan menggunakan persamaan 2.46. Perhitungan interval keyakinan GFRG adalah sebagai berikut:

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



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

$$n_{\text{eff}} = 3,6$$

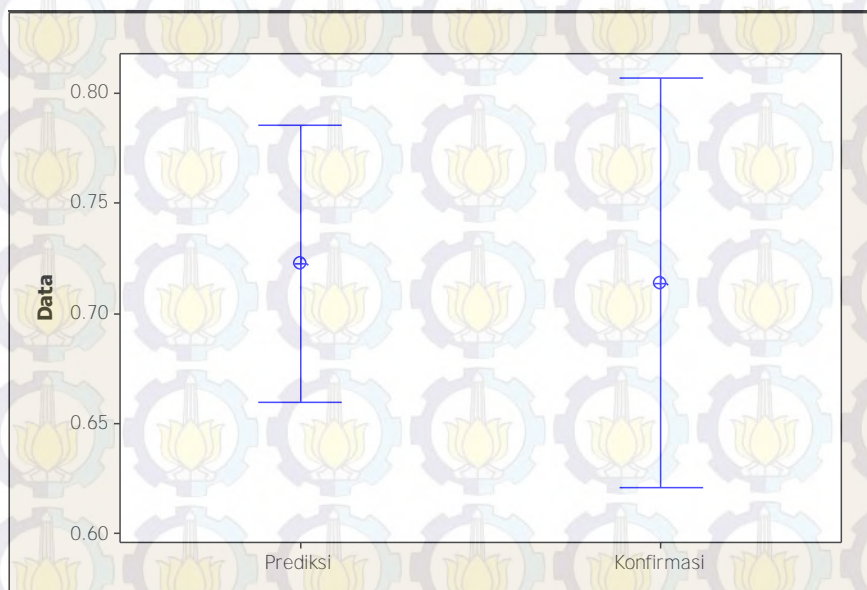
$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(0.05, 1, 8)} 0,00043 \left[\frac{1}{3,6} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_{CE} = \sqrt{5,31 \times 0,00043 \times \left[\frac{1}{3,6} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_{CE} = 0,0374$$

Dengan demikian interval keyakinan nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi dengan tingkat keyakinan 95% adalah $0,7138 \pm 0,0374$ ($0,6764 \leq \hat{\mu}_{\text{GFRG}} \leq 0,7512$).



Gambar 4.8 Plot rata-rata percobaan konfirmasi dan interval keyakinan prediksi

Gambar 4.8 menunjukkan interval keyakinan nilai rata-rata GFRG hasil percobaan konfirmasi dan interval keyakinan nilai rata-rata GFRG hasil prediksi.

Kombinasi level-level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum



dinyatakan valid apabila nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi berada di dalam interval rata-rata GFRG prediksi.

Berdasarkan Gambar 4.8, nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi (0,7138) berada didalam interval rata-rata prediksi ($0.6974 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,7478$). Maka dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi level-level variabel proses pada kondisi optimum yang telah didapat adalah valid.

4.14 Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum

Untuk menguji bahwa nilai respon pada kombinasi awal dengan respon pada kondisi optimum adalah berbeda, maka perlu dilakukan validasi secara statistik. Hasil percobaan pada kombinasi awal dapat dilihat pada Lampiran 9

Adapun uji statistik yang digunakan adalah sebagai berikut:

a) Uji kenormalan

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

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

Hasil uji kenormalan data pada masing-masing respon untuk kombinasi awal ditunjukkan pada Tabel 4.14 dan untuk kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.15. Hasil pengujian kenormalan rata-rata dapat dilihat pada Lampiran 10 A, B, C dan D.

Tabel 4.14 Hasil uji kenormalan data pada kombinasi awal

| Respon | P-value | Keterangan | Kesimpulan |
|-------------|---------|---------------------|----------------------|
| <i>Kerf</i> | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |
| LPB | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |
| KP | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |
| LR | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |

Tabel 4.15 Hasil uji kenormalan data pada kombinasi optimum

| Respon | P-value | Keterangan | Kesimpulan |
|-------------|---------|---------------------|----------------------|
| <i>Kerf</i> | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |
| LPB | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |
| KP | >0.150 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |
| LR | 0.144 | H_0 gagal ditolak | Berdistribusi normal |



Tabel 4.14 dan Tabel 4.15 menunjukkan bahwa nilai *p-value* untuk masing-masing respon baik pada kombinasi awal maupun pada kombinasi optimum adalah lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum adalah berdistribusi normal.

b) Uji kesamaan variansi

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

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

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

σ_1 : kombinasi awal

σ_2 : kombinasi optimum

Hasil uji kesamaan variansi antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil uji kesamaan variansi

| Respon | P-value | Keterangan | Kesimpulan |
|-------------|---------|---------------------|---------------|
| <i>Kerf</i> | 0.761 | H_0 gagal ditolak | Variansi sama |
| LPB | 0.409 | H_0 gagal ditolak | Variansi sama |
| KP | 0.319 | H_0 gagal ditolak | Variansi sama |
| LR | 0.205 | H_0 gagal ditolak | Variansi sama |

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.16 menunjukkan bahwa *p-value* pada masing-masing respon adalah lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data dari kedua sumber, yaitu kombinasi awal dan kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c) 1. Uji kesamaan rata-rata *kerf*, KP dan LR

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

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



μ_1 : kombinasi awal

μ_2 : kombinasi optimum

Hasil uji kesamaan rata-rata antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.17.

2. Uji kesamaan rata-rata LPB

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 < \mu_2$$

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

μ_1 : kombinasi awal

μ_2 : kombinasi optimum

Hasil uji kesamaan rata-rata antara data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Hasil uji kesamaan rata-rata

| Respon | P-value | Keterangan | Kesimpulan |
|-------------|---------|---------------|-----------------|
| <i>Kerf</i> | 0.020 | H_0 ditolak | $\mu_1 < \mu_2$ |
| LPB | 0.010 | H_0 ditolak | $\mu_1 > \mu_2$ |
| KP | 0.003 | H_0 ditolak | $\mu_1 < \mu_2$ |
| LR | 0.000 | H_0 ditolak | $\mu_1 < \mu_2$ |

Sumber: Hasil perhitungan

Berdasarkan hasil pengujian kesamaan rata-rata yang ditunjukkan pada Tabel 4.17, *p-value* untuk masing-masing respon adalah kurang dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara statistik dengan tingkat keyakinan 95% nilai rata-rata masing-masing respon pada kondisi awal dengan nilai rata-rata masing-masing respon pada kondisi optimum adalah berbeda. Dimana untuk nilai *kerf*, KP dan LR pada kombinasi optimum memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan kondisi awal, dan LPB pada kombinasi optimum memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi awal.



4.15 Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Kombinasi awal merupakan pengaturan kombinasi variabel proses yang biasa digunakan dalam proses pemotongan WEDM. Pada penelitian ini kombinasi awal diatur pada level tengah, yaitu pada level dua untuk variabel proses yang memiliki tiga level. Untuk variabel proses yang memiliki dua level kombinasi awal diatur pada level satu.

Tujuan dari percobaan dengan menggunakan kombinasi awal ini adalah untuk mengetahui peningkatan karakteristik kinerja dari masing-masing respon baik secara individu maupun secara serentak. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon sebelum dilakukan optimasi (kombinasi awal) dengan respon setelah dilakukan optimasi (kombinasi optimum). Pengaturan kombinasi variabel proses yang digunakan sebagai kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Pengaturan level kombinasi awal

| Variabel proses | Kombinasi awal | |
|-----------------|----------------|------------|
| | Level | Nilai |
| AN | 1 | 2A |
| ON | 2 | 3 μ s |
| OFF | 2 | 20 μ s |
| OV | 2 | 85V |
| SV | 2 | 50V |

Percobaan dengan menggunakan kombinasi awal dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali. Hasil masing-masing dari percobaan pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Respon percobaan kondisi awal

| Percobaan | Kerf (mm) | LPB (mm ³ /min) | KP (μ m) | LR (μ m) |
|-----------|-----------|----------------------------|---------------|---------------|
| 1 | 0.337 | 6.522 | 1.466 | 12.987 |
| 2 | 0.313 | 7.928 | 1.733 | 12.726 |
| 3 | 0.322 | 7.413 | 1.611 | 12.857 |
| Rata-rata | 0.324 | 7.288 | 1.603 | 12.857 |

Sumber: Hasil percobaan



Langkah berikutnya yaitu perhitungan rasio S/N terhadap nilai-nilai respon yang diperoleh. Hasil perhitungan rasio S/N pada masing-masing respon percobaan pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Rasio S/N kombinasi awal

| | Rasio S/N | | | |
|-------------------|-------------|---------|---------|----------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR |
| Kombinasi optimum | 9.7850 | 17.1657 | -4.1206 | -22.1829 |

Sumber: Hasil perhitungan

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

Tabel 4.21 GRC dan GFRG pada kombinasi awal

| | GRC | | | | GFRG |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR | |
| Kombinasi optimum | 0.6700 | 0.3165 | 0.5410 | 0.4728 | 0.5025 |

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.21 menunjukkan nilai GRC dan GFRG pada percobaan konfirmasi kondisi optimum adalah sebesar 0,7138 dan nilai GFRG pada percobaan dengan menggunakan kombinasi awal yaitu sebesar 0,5351.

Tabel 4.22 Perbandingan GFRG kondisi awal dan kondisi optimum

| | GRC | | | | GFRG |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | <i>Kerf</i> | LPB | KP | LR | |
| Kombinasi awal | 0.6700 | 0.3165 | 0.5410 | 0.4728 | 0.5025 |
| Kombinasi optimum | 0.8409 | 0.3663 | 0.8520 | 0.9572 | 0.7138 |
| Peningkatan | | | | | 29.60% |

Sumber: Hasil perhitungan

Berdasarkan nilai GFRG yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.22, menunjukkan bahwa setelah dilakukan optimasi nilai GFRG



mengalami peningkatan sebesar 29,60% dibandingkan dengan nilai GFRG sebelum dilakukan optimasi.

Tabel 4.23 Perbandingan respon individu pada kondisi awal dan kondisi optimum

| Variabel respon | Kombinasi awal | Kombinasi optimum | Keterangan | |
|-----------------|----------------|-------------------|------------|-------|
| Kerf | 0.324 | 0.297 | 8.23% | turun |
| LPB | 7.288 | 8.901 | 18.13% | naik |
| KP | 1.603 | 1.163 | 27.46% | turun |
| LR | 12.857 | 10.210 | 20.59% | turun |

Sumber: Hasil perhitungan

Perbandingan dari masing-masing respon secara individual yang ditunjukkan pada Tabel 4.23, antara kombinasi awal dengan kombinasi optimum dijabarkan sebagai berikut:

- Nilai respon *kerf* dengan pengaturan kombinasi awal adalah sebesar 0,324 mm dan nilai respon *kerf* dengan pengaturan kombinasi optimum sebesar 0,297 mm. Dari hasil keduanya didapatkan bahwa nilai dari lebar pemotongan (*kerf*) pada kondisi optimum mengalami penurunan sebesar 8,23%.
- Nilai respon LPB dengan pengaturan kombinasi awal adalah sebesar 7,288 mm³/menit dan respon LPB dengan pengaturan kombinasi optimum adalah sebesar 8,901 mm³/menit. Dari hasil keduanya didapatkan bahwa nilai dari LPB pada kombinasi optimum mengalami peningkatan sebesar 18,13%.
- Nilai respon KP dengan pengaturan kombinasi awal sebesar 1,603 μm dan nilai respon KP dengan pengaturan kombinasi optimum adalah sebesar 1,163 μm . Dari hasil keduanya didapatkan bahwa nilai dari KP pada kombinasi optimum mengalami penurunan sebesar 27,46%.
- Respon LR dengan pengaturan kombinasi awal mendapatkan nilai sebesar 12,857 μm sedangkan respon LR dengan pengaturan kombinasi optimum mendapatkan nilai sebesar 10,210 μm . Dari hasil keduanya didapatkan bahwa nilai dari LR pada kombinasi optimum mengalami penurunan sebesar 20,59%.



4.16 Pembahasan

4.16.1 Pengaruh Variabel-variabel Proses Terhadap Respon Multirespon

Penelitian ini dilakukan pada proses pemotongan baja perkakas Buderus 2379 ISO-B dengan menggunakan proses pemesinan WEDM. Analisis variansi pengaruh variabel proses AN, ON, OFF, OV dan SV terhadap multirespon (GFRG) ditunjukkan pada tabel 4.10. Hasil analisis menunjukkan bahwa variabel proses AN memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 2,23%, selanjutnya variabel proses ON memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 76,50%, variabel proses OFF memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 7,27%, selanjutnya variabel proses OV memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 4,99% dan variabel proses SV memiliki kontribusi terhadap total variansi sebesar 2,71%.

Tabel 4.10 juga menunjukkan bahwa *error* memberikan kontribusi yang relatif besar, yaitu sebesar 6,31%. Hal tersebut berarti, bahwa masih terdapat variabel proses yang memiliki pengaruh terhadap respon yang diamati. Variabel-variabel tersebut juga dikenal sebagai faktor *noise*, yaitu variabel-variabel yang sulit untuk diamati bahkan untuk dikendalikan

4.16.2 Pengaruh Variabel-variabel Proses Terhadap Individu

Berdasarkan ANAVA yang telah dilakukan, dapat diketahui pengaruh variabel *arc on time*, *on time*, *off time*, *open voltage* dan *servo voltage* terhadap masing-masing respon secara individu adalah sebagai berikut:

a. Variabel proses *arc on time* (AN)

Variabel proses AN mengatur besarnya arus tambahan pada saat proses pemotongan WEDM. Peningkatan nilai AN yang lebih tinggi akan menghasilkan peningkatan pada energi yang digunakan saat proses pemotongan. Hal ini akan mengakibatkan pengikisan pada benda kerja akan semakin besar, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk proses pemotongan menjadi lebih singkat.

Energi yang lebih besar akan menyebabkan panas terkonduksi lebih dalam pada benda kerja, sehingga kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja



juga akan lebih dalam. Hal ini juga menyebabkan kekasaran permukaan pada benda kerja akan meningkat serta celah hasil pemotongan menjadi lebih lebar. Fenomena yang sama juga telah disimpulkan oleh Hasan dkk. (2009), bahwa dengan peningkatan nilai AN akan meningkatkan kekasaran permukaan.

b. Variabel proses *on time* (ON)

Proses pemotongan pada proses pemesinan WEDM hanya terjadi pada saat *on time*. Nilai variabel ON yang tinggi, menyebabkan periode loncatan bunga api menjadi semakin panjang. Hal ini mengakibatkan banyaknya benda kerja yang terkikis dalam setiap satuan waktu menjadi lebih banyak, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk proses pemotongan menjadi lebih singkat.

Nilai ON yang tinggi juga akan menghasilkan energi yang lebih besar. Hal ini mengakibatkan pengikisan pada benda kerja menjadi lebih banyak, sehingga lapisan *recast* yang terbentuk menjadi semakin tebal. Selain itu, dengan energi yang lebih besar kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja menjadi semakin dalam, akibatnya kekasaran permukaan pada benda kerja menjadi lebih tinggi. Fenomena ini juga disimpulkan dalam penelitian yang pernah dilakukan oleh Durairaj dkk. (2013). Nilai ON yang tinggi menghasilkan *kerf* yang lebar dan lapisan *recast* yang tebal.

c. Variabel proses *off time* (OFF)

Saat proses pemesinan memasuki fase *off time* tidak terjadi proses pemotongan, sehingga proses pembilasan geram (*flushing*) menjadi lebih sempurna, namun saat memasuki fase *off time* aliran *back ground* tetap mengalir untuk mengionisasi cairan dielektrik. Nilai OFF yang tinggi akan memberi waktu yang lebih banyak terhadap proses ionisasi cairan dielektrik (ion+elektron), yang bertujuan untuk mempersiapkan loncatan bunga api listrik berikutnya saat memasuki proses pemotongan. Selain itu, nilai OFF yang tinggi menyebabkan proses pemotongan menjadi lebih lama, serta mempertipis lapisan *recast* yang terbentuk. Kekasaran permukaan dan celah pemotongan menjadi lebih kecil dengan meningkatnya nilai variabel proses OFF. Hal ini sesuai dengan yang disimpulkan oleh Durairaj dkk. (2013), yang menyatakan



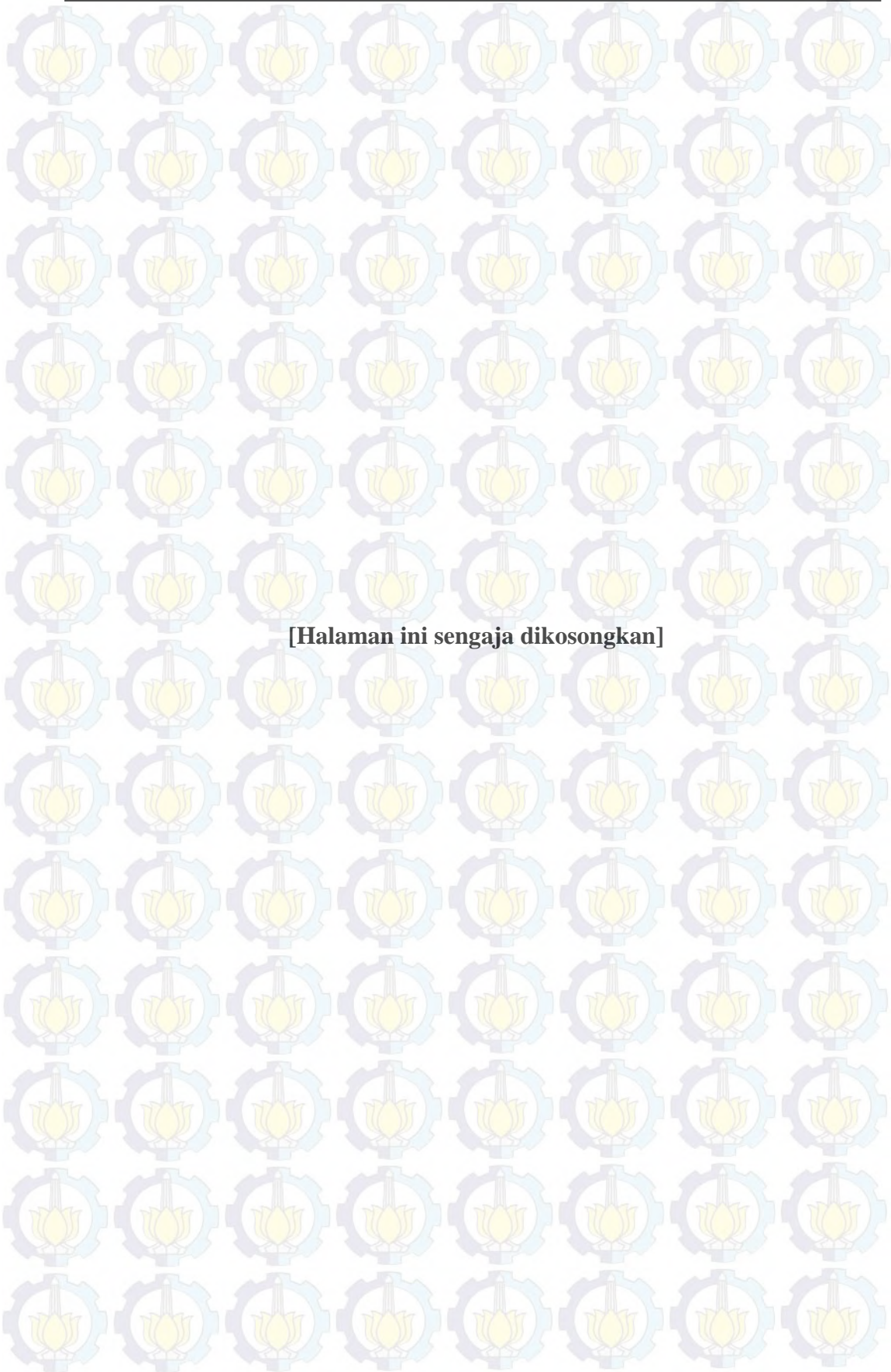
bahwa dengan nilai OFF yang tinggi akan mempertipis lapisan *recast* yang terbentuk dan menurunkan kekasaran permukaan.

d. Variabel proses *open voltage* (OV)

Pada proses pemotongan dengan menggunakan WEDM, benda kerja dan kawat elektroda tidak saling bersentuhan dan dipisahkan oleh cairan dielektrik. Loncatan bunga api listrik terjadi saat beda potensial yang terjadi cukup besar untuk mengionisasi cairan dielektrik. Semakin besar nilai OV, maka semakin besar pula beda potensial yang terjadi. Dengan demikian, energi yang digunakan untuk mengikis benda kerja akan semakin besar. Hal tersebut menyebabkan waktu proses pemotongan menjadi semakin singkat. Selain itu, benda kerja yang terkikis semakin banyak dan kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja juga akan semakin dalam. Sebagai akibatnya, lebar pemotongan dan kekasaran permukaan juga akan meningkat. Hal ini sesuai dengan kesimpulan dari penelitian Rupajati (2013), yang menyatakan bahwa peningkatan nilai OV akan meningkatkan kekasaran permukaan yang terjadi.

e. Variabel proses *servo voltage* (SV)

Servo voltage adalah variabel yang digunakan untuk menentukan seberapa cepat respon pemakanan untuk mengubah kondisi pemotongan. Semakin kecil SV maka semakin cepat proses pemotongan, tetapi dengan *gap* yang semakin kecil dapat menyebabkan kawat putus. Pada saat proses pemotongan, *gap* yang terbentuk antara benda dengan kawat elektroda menjadi lebar, sehingga membuat beda potensial menjadi lebih kecil. Untuk mengatasi hal tersebut, yang dilakukan adalah mengatur besarnya tegangan referensi yaitu dengan cara mengatur nilai variabel proses SV. Pada nilai SV yang kecil, *servo control* akan menghasilkan beda potensial yang sesuai dengan tegangan referensi pada jarak yang sempit.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan, proses optimasi, percobaan konfirmasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon pada Proses Pemesinan *Wire Electrical Discharge Machining* (WEDM) BajaPerkakas Buderus 2379 ISO-B dengan Menggunakan Metode “Taguchi-*grey-fuzzy*”, ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontribusi variabel-variabel proses dalam mengurangi variasi total dari respon lebar pemotongan, laju pengerjaan bahan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* secara serentak adalah sebagai berikut:
 - *Arc on time* sebesar 2,23%.
 - *On time* sebesar 76,50%.
 - *Off time* sebesar 7,27%.
 - *Open voltage* sebesar 4,99%.
 - *Servo voltage* sebesar 2,71%.
2. Pengaturan kombinasi variabel-variabel proses yang secara signifikan dapat memaksimalkan laju pengerjaan bahan, meminimumkan lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast* secara serentak adalah sebagai berikut:
 - *Arc on time* pada 1 A.
 - *On time* pada 1 μ s.
 - *Off time* pada 15 μ s.
 - *Open voltage* pada 95 volt.
 - *Servo voltage* pada 55 volt.



5.2 Saran

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

1. Metode optimasi multirespon dalam penelitian ini adalah *grey relational analysis* dan Logika *fuzzy*. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai perbandingan.
2. Pada penelitian ini kontribusi *error* masih sebesar 6,31%, maka pada penelitian selanjutnya disarankan untuk memperhitungkan faktor-faktor *noise* seperti kemurnian cairan dielektrik, temperatur cairan dielektrik dan tekanan *flushing* untuk mengurangi besarnya *error*.
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mencoba menggunakan level variabel-variabel proses dengan rentang yang berbeda untuk membandingkan besarnya kontribusi variabel proses dalam mengurangi variasi total respon yang diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

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

Datta, S. dan Mahapatra, S. S. (2010), "Modeling, Simulation and Parametric Optimization of Wire EDM Process using Response Surface Methodology Coupled with Grey-Taguchi Technique," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 2, No. 5, hal. 162-183.

Durairaj, M., Sudarshun N, D. Swamynathan. (2013), "Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade", *Proceeding of Engineering* Vol. 64, hal. 868-877.

Groover, M. P. (2002), *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 2nd edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Guitrau, E. B. (1997), *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.

Hassan, M. A., Mehat, M. S., Sharif, S., Daud, R., Tomadi, S. H., dan Reza, M. S. (2009), "Study of The Surface Integrity of AISI 4140 Steel in Wire-Electrical Discharge Machining," *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, Vol. II, hal. 978-988.

Huang, J. T. dan Liao, Y. S. (2003), "Optimization of Machining Parameters of Wire-EDM based on Grey Relational and Statistical Analysis," *International Journal of Production Research*, Vol 41, hal. 1707-1720.

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

Kumar, A. dan Singh, D. K. (2012), "Strategic Optimization and Investigation Effect of Process Parameters on Performance of Wire Electric Discharge Machine," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 4, hal. 2766-2772.

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

Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2002), "The Use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 42, hal. 237-244.

Lusi, N. (2013), *Optimasi Parameter Pemesinan Untuk Laju Pengerjaan Bahan, Lebar Pemotongan dan Kekasaran Permukaan Pada Proses Pemesinan Wire-Electrical Discharge Machining (WEDM) Meterial SKD61 dengan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy*, Tesis yang Tidak Dipublikasikan, Program Magister Teknik Mesin FTI ITS, Surabaya.

Montgomery, D. C., (2009), *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*, Master Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Johor.

Pandey, P. C. dan Shan, H. S. (1980), *Modern Machining Processes*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.

Park, S. H. (1996), *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, 1st edition, Chapman & Hall, London.

Port, J. (1992), *Introduction to Wire EDM*, USA.

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

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

Ross, P. J. (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill Companies, Inc., Taiwan.

Rupajati, P. (2013), *Optimasi Tebal Lapisan Recast dan Kekasaran Permukaan pada Proses Pemesinan Wire Electrical Discharge Machining (Wire-EDM) Baja Perkakas AISI H13 dengan Menggunakan Metode Taguchi dan Logika Fuzzy serta Analisis Microcracks pada Benda Kerja*, Tesis yang Tidak Dipublikasikan, Program Magister Teknik Mesin FTI ITS, Surabaya.

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

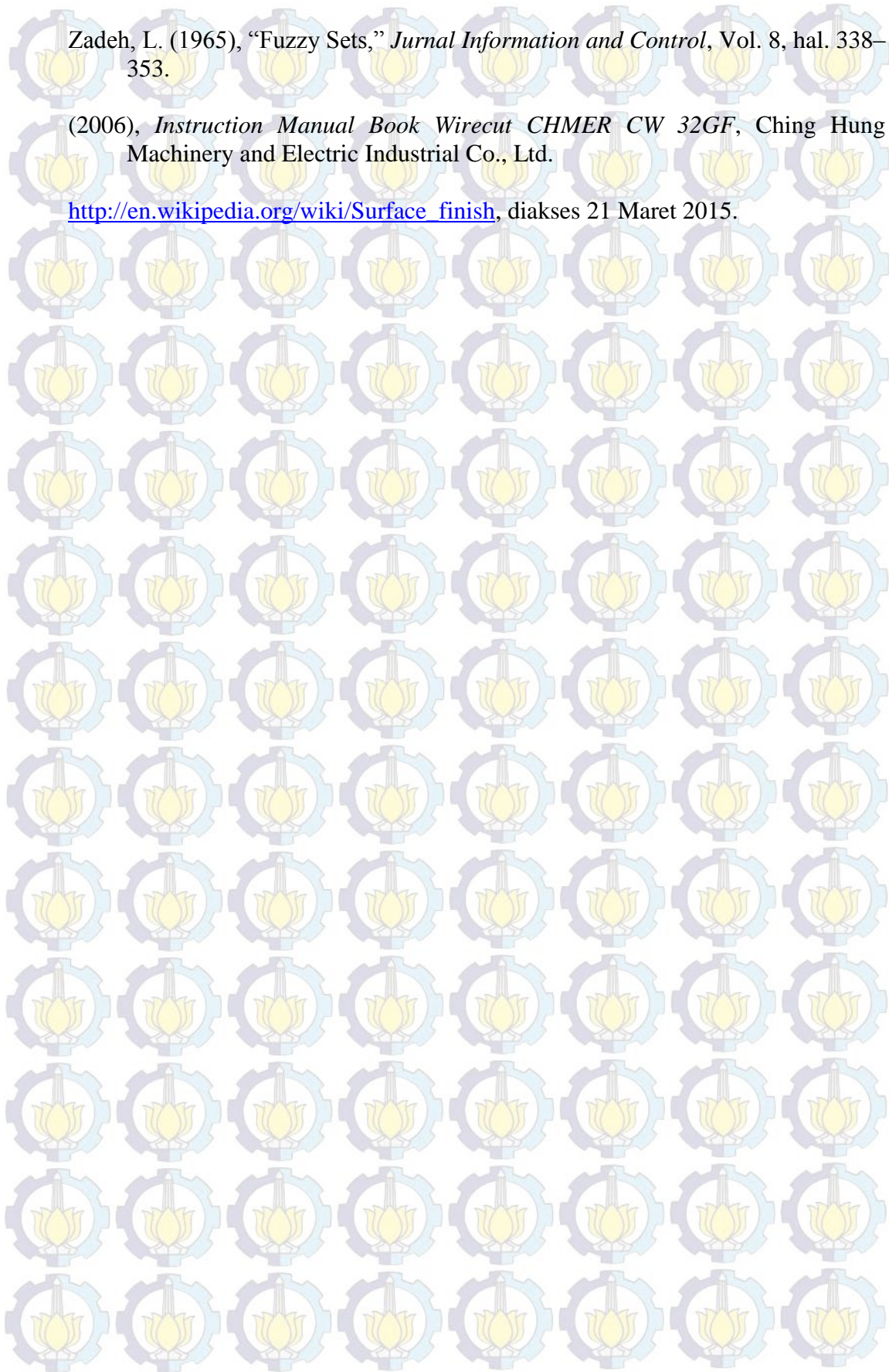
Sommer, C. dan Sommer, S. (2005), *Complete EDM Handbook*, Advanced Publishing Inc., Houston.

Tosun, N., Cogun, C., dan Tosun, G. (2004), "A Study on Kerf and Material Removal Rate in Wire Electrical Discharge Machining based on Taguchi Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, hal. 316-322.

Zadeh, L. (1965), "Fuzzy Sets," *Jurnal Information and Control*, Vol. 8, hal. 338–353.

(2006), *Instruction Manual Book Wirecut CHMER CW 32GF*, Ching Hung Machinery and Electric Industrial Co., Ltd.

http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_finish, diakses 21 Maret 2015.



LAMPIRAN 1
CUTTING DATA DESCRIPTION

Tabel L1. *Cutting data description* pada mesin WEDMCHMER CW32GF

| SIMBOL | VARIABEL | KETERANGAN |
|--------|------------------------------|--|
| | | 0 ~ 15 (70V ~ 140V) |
| | | 0 = 70V 8 = 110V |
| | | 1 = 75V 9 = 115V |
| | | 2 = 80V 10 = 120V |
| OV | <i>Open voltage</i> | 3 = 85V 11 = 125V |
| | | 4 = 90V 12 = 130V |
| | | 5 = 95V 13 = 135V |
| | | 6 = 100V 14 = 140V |
| | | 7 = 105V 15 = 145V |
| | | 0 ~ 30 |
| | | LP = 0 DC rough cutting |
| | | LP = 1 DC spark alignment |
| | | LP = 2 DC fine cutting |
| | | LP = 20 DC moderate cutting |
| LP | <i>Low power</i> | LP = 3~9 N/A (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 finishing cutting |
| ON | <i>On time</i> | 1 μs ~ 10μs |
| OFF | <i>Off time</i> | 7 μs ~ 50 μs |
| 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 |

Tabel L1. *Cutting data description* pada mesin WEDMCHMER CW32GF (lanjutan)

| SIMBOL | VARIABEL | KETERANGAN |
|--------|----------------------|--|
| | | 0 ~ 15 (<i>slow</i> → <i>fast</i>) |
| WF | <i>Wire feed</i> | 0 = 0 mm/sec |
| | | 1 = 0 mm/sec |
| | | 2 = 5 mm/sec |
| | | 3 = 25 mm/sec |
| | | 4 = 60 mm/sec |
| | | 5 = 90 mm/sec |
| | | 6 = 110 mm/sec |
| | | 7 = 140 mm/sec |
| | | 8 = 170 mm/sec |
| | | 9 = 200 mm/sec |
| | | 10 = 220 mm/sec |
| | | 11 = 250 mm/sec |
| | | 12 = 290 mm/sec |
| | | 13 = 300 mm/sec |
| | | 14 = 330 mm/sec |
| | | 15 = 340 mm/sec |
| | | 0 ~ 15 |
| WT | <i>Wire tension</i> | 0 = 490 g |
| | | 1 = 490 g |
| | | 2 = 490 g |
| | | 3 = 520 g |
| | | 4 = 560 g |
| | | 5 = 630 g |
| | | 6 = 730 g |
| | | 7 = 870 g |
| | | 8 = 1000 g |
| | | 9 = 1180 g |
| | | 10 = 1390 g |
| | | 11 = 1610 g |
| | | 12 = 1840 g |
| | | 13 = 2060 g |
| | | 14 = 2200 g |
| | | 15 = 2400 g |
| WL | <i>Wire flow</i> | 0 ~ 7 (<i>weak</i> → <i>strong</i>) |
| FM | <i>Feedrate mode</i> | FM = 0 (<i>servo</i>) |
| | | FM = 1 (<i>constant</i>) |
| F | <i>Feedrate</i> | 0 ~ 500 mm/min (<i>valid only when FM = 1</i>) |

Sumber: *Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32GF*

LAMPIRAN 2

SERTIFIKAT PERLAKUAN PANAS MATERIAL



PT. PARAGON SPESIAL METAL
 Jl. Raya Kedung Asem No. 91 Cid
 Surabaya 60299 - INDONESIA
 Telp. +62-31-87157160, 8716186,
 8704172, 8722182
 Faks. +62-31-8722192, 8706566
 E Mail : paragon@ptparagon.com

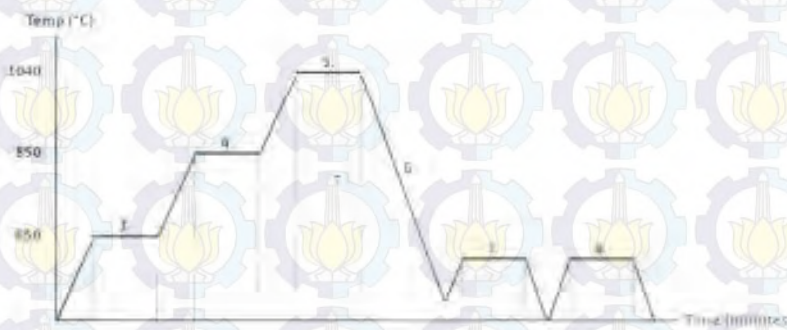
Jl. Flores 13 Blok. C3-1 Kawasan Industri MM2
 2160
 Cibitung Bekasi - Indonesia
 Telp. 021-89982000 89981888
 Fax. 021-89982007
 Email : paragon@ptparagon.com
 paragon.aj@paragon.com

Heat Treatment Certificate

Customer : MEGA DIANTORO
 PK No : 134
 PK Date : 11 Maret 2015
 Amount : 5Pcs = 6Kg
 Material : XW45/2379
 Part Name : Plate

This is to certify that the material have been hardened with the process as follows.

| No. | Process | Temp (°C) | Time (minutes) | Date of Process | Hardness Acquired (HRC) |
|-----|-------------------|-----------|----------------|-----------------|-------------------------|
| 1. | Soft Annealing | | | | |
| 2. | Stress Relieving | | | | |
| 3. | Pre Heating I | 600 | 30 | 13-03-2015 | |
| 4. | Pre Heating II | 850 | 30 | 13-03-2015 | |
| 5. | Austenitizing | 1040 | 40 | 13-03-2015 | |
| 6. | Quenching Media | Cold Q | | 13-03-2015 | |
| 7. | Tempering I | 520 | 150 | 13-03-2015 | |
| 8. | Tempering II | 520 | 150 | 14-03-2015 | 59-60 HRC |
| 9. | Tempering III | | | | |
| 10. | Carburizing | | | | |
| 11. | Nitro Carburizing | | | | |



Prepared by
PT. PARAGON SPESIAL METAL
 Zainul Arifin

LAMPIRAN 3

DATA SPESIFIKASI MESIN WIRE CUT EDM CHMER G32F



Tabel L3. Spesifikasi mesin WEDMCHMER CW32GF

| Machine Body | Model | G32F/S | G43F/S | G53F/S | G64F/S | G96F |
|---|-------|---|---|---|--|--|
| X, Y axis travel (mm) | | 360x250 | 400x300 | 500x300 | 600x400 | 900x600 |
| U,V,Z axis travel (mm) | | 60x60x220 | 60x60x220 | 60x60x220 | 100x100x300 | 100x100x300 |
| Max.size of working piece (WxDxH mm) | | 725x560x215 | 725x600x215 | 825x600x215 | 910x700x295 | 1300x950x295 |
| Max. weight of working piece (kgw) | | 300 | 500 / 350 | 550 / 400 | 800 / 450 | 1500 |
| XY feed rate (mm/min) | | Max. 800 | Max. 800 | Max. 800 | Max. 800 | Max. 800 |
| Motor system (axis) | | AC Servo Motor | AC Servo Motor | AC Servo Motor | AC Servo Motor | AC Servo Motor |
| Wire diameter range (mm) | | ø0.15-0.3 (ø0.25) | ø0.15-0.3 (ø0.25) | ø0.15-0.3 (ø0.25) | ø0.15-0.3 (ø0.25) | ø0.15-0.3 (ø0.25) |
| Max.wire feed rate (mm/sec) | | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Wire tension (gf) | | 300-2500 | 300-2500 | 300-2500 | 300-2500 | 300-2500 |
| Max. taper angle (°) workpiece thickness(mm) | | ±14.5°/80 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±14.5°/80 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±14.5°/80 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±21°/100 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±21°/100 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) |
| Outside dimension (WxDxH mm) | | 2200x2100x2100 / 2300x2300x2100 | 2200x2130x2130 / 2200x2265x2130 | 2290x2130x2130 / 2290x2270x2130 | 2500x2450x2250 / 2500x2450x2250 | 2900x2650x2305 |
| N.W (including power and coolant system) (kgw) | | 2300 / 2375 | 2575 / 2800 | 2800 / 3195 | 3200 / 3595 | 6300 |
| Coolant tank system (L) | | 300/590 | 340 / 650 | 340 / 650 | 340 / 760 | 650 |

| Machine Body | Model | RX853F/S | RX1063F/S | RX1066F/S | RX1283F/S |
|---|-------|--|--|--|--|
| X, Y axis travel (mm) | | 800x500 | 1000x600 | 1000x600 | 1200x800 |
| U,V,Z axis travel (mm) | | 150x150x300 | 150x150x300 | 160x160x500 | 120x120x300 |
| Max.size of working piece (WxDxH mm) | | 1210x800x295 | 1430x900x295 | 1240x900x495 | 1600x1100x295 |
| Max. weight of working piece (kgw) | | 2000/1000 | 3000/1500 | 5000/3000 | 6000/4000 |
| XY feed rate (mm/min) | | Max.800 | Max.800 | Max.800 | Max.800 |
| Motor system (axis) | | AC Servo Motor | AC Servo Motor | AC Servo Motor | AC Servo Motor |
| Wire diameter range (mm) | | Ø0.15-0.3(Ø0.25) | Ø0.15-0.3(Ø0.25) | Ø0.15-0.3(Ø0.25) | Ø0.15-0.3(Ø0.25) |
| Max.wire feed rate (mm/sec) | | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Wire tension (gf) | | 300-2500 | 300-2500 | 300-2500 | 300-2500 |
| Max. taper angle (°) workpiece thickness(mm) | | ±21°/140 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±21°/140 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±21°/180 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) | ±21°/130 (wide-angled nozzle, DA+DB=15mm) |
| Outside dimension (WxDxH mm) | | 2400x2800x2350 / 3150x3500x2350 | 2700x3000x2200 / 4000x4000x2200 | 3200x3600x2800 / 4000x3600x2800 | 4250x4100x2300 / 4350x4100x2300 |
| N.W (including power and coolant system) (kgw) | | 5460/5535 | 6500/7100 | 7500/7600 | 14500/15000 |
| Coolant tank system (L) | | 340/1370 | 650/2000 | 650/2400 | 760/3000 |

Sumber: *Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32GF*

LAMPIRAN 4

DATA LEBAR PEMOTONGAN (*KERF*) & PANJANG PEMOTONGAN

Tabel L4.1 Lebar dan panjang pemotongan replikasi 1

| Komb. | Panjang | | | Mean mm | <i>Kerf</i> | | | Mean mm |
|-------|---------|--------|--------|------------|-------------|-------|-------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 10.077 | 10.072 | 10.076 | 10.075 | 0.285 | 0.31 | 0.293 | 0.296 |
| 2 | 10.072 | 10.075 | 10.069 | 10.072 | 0.315 | 0.312 | 0.311 | 0.313 |
| 3 | 10.077 | 10.076 | 10.079 | 10.077 | 0.307 | 0.324 | 0.317 | 0.316 |
| 4 | 10.096 | 10.095 | 10.098 | 10.096 | 0.337 | 0.337 | 0.342 | 0.339 |
| 5 | 10.108 | 10.102 | 10.103 | 10.104 | 0.353 | 0.341 | 0.341 | 0.345 |
| 6 | 10.109 | 10.11 | 10.103 | 10.107 | 0.351 | 0.359 | 0.344 | 0.351 |
| 7 | 10.107 | 10.111 | 10.108 | 10.109 | 0.331 | 0.353 | 0.352 | 0.345 |
| 8 | 10.115 | 10.113 | 10.117 | 10.115 | 0.349 | 0.362 | 0.343 | 0.351 |
| 9 | 10.121 | 10.118 | 10.119 | 10.119 | 0.343 | 0.349 | 0.352 | 0.348 |
| 10 | 10.082 | 10.078 | 10.081 | 10.080 | 0.328 | 0.313 | 0.319 | 0.320 |
| 11 | 10.085 | 10.086 | 10.085 | 10.085 | 0.323 | 0.324 | 0.322 | 0.323 |
| 12 | 10.083 | 10.084 | 10.091 | 10.086 | 0.342 | 0.329 | 0.337 | 0.336 |
| 13 | 10.094 | 10.092 | 10.092 | 10.093 | 0.351 | 0.347 | 0.345 | 0.348 |
| 14 | 10.094 | 10.096 | 10.099 | 10.096 | 0.341 | 0.342 | 0.362 | 0.348 |
| 15 | 10.096 | 10.099 | 10.094 | 10.096 | 0.339 | 0.339 | 0.363 | 0.347 |
| 16 | 10.087 | 10.089 | 10.192 | 10.123 | 0.361 | 0.367 | 0.377 | 0.368 |
| 17 | 10.125 | 10.123 | 10.124 | 10.124 | 0.379 | 0.365 | 0.378 | 0.374 |
| 18 | 10.133 | 10.137 | 10.129 | 10.133 | 0.379 | 0.389 | 0.387 | 0.385 |

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L4.2 Lebar dan panjang pemotongan replikasi 2

| Komb. | Panjang | | | Mean mm | Kerf | | | Mean mm |
|-------|---------|--------|--------|------------|-------|-------|-------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 10.067 | 10.066 | 10.069 | 10.067 | 0.317 | 0.303 | 0.319 | 0.313 |
| 2 | 10.076 | 10.077 | 10.072 | 10.075 | 0.301 | 0.311 | 0.363 | 0.325 |
| 3 | 10.074 | 10.075 | 10.075 | 10.075 | 0.335 | 0.314 | 0.327 | 0.325 |
| 4 | 10.087 | 10.081 | 10.085 | 10.084 | 0.344 | 0.341 | 0.322 | 0.336 |
| 5 | 10.091 | 10.09 | 10.089 | 10.090 | 0.341 | 0.337 | 0.346 | 0.341 |
| 6 | 10.096 | 10.097 | 10.099 | 10.097 | 0.338 | 0.347 | 0.344 | 0.343 |
| 7 | 10.103 | 10.105 | 10.108 | 10.105 | 0.352 | 0.349 | 0.354 | 0.352 |
| 8 | 10.108 | 10.112 | 10.11 | 10.110 | 0.331 | 0.341 | 0.351 | 0.341 |
| 9 | 10.113 | 10.117 | 10.116 | 10.115 | 0.359 | 0.347 | 0.357 | 0.354 |
| 10 | 10.074 | 10.074 | 10.079 | 10.076 | 0.314 | 0.322 | 0.344 | 0.327 |
| 11 | 10.079 | 10.077 | 10.078 | 10.078 | 0.325 | 0.337 | 0.346 | 0.336 |
| 12 | 10.082 | 10.083 | 10.084 | 10.083 | 0.332 | 0.342 | 0.352 | 0.342 |
| 13 | 10.098 | 10.097 | 10.097 | 10.097 | 0.344 | 0.341 | 0.352 | 0.346 |
| 14 | 10.094 | 10.098 | 10.099 | 10.097 | 0.349 | 0.342 | 0.348 | 0.346 |
| 15 | 10.107 | 10.101 | 10.104 | 10.104 | 0.334 | 0.346 | 0.352 | 0.344 |
| 16 | 10.123 | 10.124 | 10.126 | 10.124 | 0.348 | 0.353 | 0.349 | 0.350 |
| 17 | 10.125 | 10.125 | 10.127 | 10.126 | 0.348 | 0.367 | 0.358 | 0.358 |
| 18 | 10.132 | 10.127 | 10.128 | 10.129 | 0.397 | 0.401 | 0.398 | 0.399 |

Sumber: Hasil pengukuran

LAMPIRAN 5
DATA LAJU Pengerjaan BAHAN (LPB)

Tabel L5.1 Laju pengerjaan bahan replikasi 1

| Komb. | Kerf (a) mm | Panjang (b) mm | Tebal (c) mm | Waktu (d) min | LPB = (a.b.c)/d mm ³ /min |
|-------|----------------|-------------------|-----------------|------------------|---|
| 1 | 0.296 | 10.075 | 15 | 5.931 | 7.543 |
| 2 | 0.313 | 10.072 | 15 | 5.669 | 8.341 |
| 3 | 0.316 | 10.077 | 15 | 6.223 | 7.675 |
| 4 | 0.339 | 10.096 | 15 | 4.048 | 12.685 |
| 5 | 0.345 | 10.104 | 15 | 4.262 | 12.269 |
| 6 | 0.351 | 10.107 | 15 | 4.782 | 11.129 |
| 7 | 0.345 | 10.109 | 15 | 2.692 | 19.433 |
| 8 | 0.351 | 10.115 | 15 | 2.861 | 18.616 |
| 9 | 0.348 | 10.119 | 15 | 2.996 | 17.632 |
| 10 | 0.320 | 10.08 | 15 | 5.933 | 8.156 |
| 11 | 0.323 | 10.085 | 15 | 5.727 | 8.532 |
| 12 | 0.336 | 10.086 | 15 | 6.211 | 8.184 |
| 13 | 0.348 | 10.093 | 15 | 3.899 | 13.513 |
| 14 | 0.348 | 10.096 | 15 | 4.002 | 13.167 |
| 15 | 0.347 | 10.096 | 15 | 4.281 | 12.274 |
| 16 | 0.368 | 10.123 | 15 | 2.866 | 19.494 |
| 17 | 0.374 | 10.124 | 15 | 2.726 | 20.835 |
| 18 | 0.385 | 10.133 | 15 | 3.168 | 18.469 |

Sumber: Hasil pengukuran

Tabel L5.2 Laju pengerjaan bahan replikasi 2

| Komb. | <i>Kerf</i> (a) mm | Panjang (b) mm | Tebal (c) mm | Waktu (d) min | LPB = (a.b.c)/d mm ³ /min |
|-------|-----------------------|-------------------|-----------------|------------------|---|
| 1 | 0.313 | 10.067 | 15 | 5.849 | 8.081 |
| 2 | 0.325 | 10.075 | 15 | 5.556 | 8.841 |
| 3 | 0.325 | 10.075 | 15 | 6.191 | 7.933 |
| 4 | 0.336 | 10.084 | 15 | 3.719 | 13.665 |
| 5 | 0.341 | 10.09 | 15 | 4.135 | 12.481 |
| 6 | 0.343 | 10.097 | 15 | 4.284 | 12.126 |
| 7 | 0.352 | 10.105 | 15 | 3.010 | 17.728 |
| 8 | 0.341 | 10.11 | 15 | 3.024 | 17.099 |
| 9 | 0.354 | 10.115 | 15 | 2.873 | 18.693 |
| 10 | 0.327 | 10.076 | 15 | 6.220 | 7.946 |
| 11 | 0.336 | 10.078 | 15 | 5.865 | 8.661 |
| 12 | 0.342 | 10.083 | 15 | 5.935 | 8.716 |
| 13 | 0.346 | 10.097 | 15 | 3.863 | 13.565 |
| 14 | 0.346 | 10.097 | 15 | 3.503 | 14.960 |
| 15 | 0.344 | 10.104 | 15 | 4.277 | 12.189 |
| 16 | 0.350 | 10.124 | 15 | 2.576 | 20.631 |
| 17 | 0.358 | 10.126 | 15 | 2.649 | 20.526 |
| 18 | 0.399 | 10.129 | 15 | 3.126 | 19.395 |

Sumber: Hasil pengukuran

LAMPIRAN 6
DATA KEKASARAN PERMUKAAN (KP)

Tabel L6. Kekasaran permukaan

| Komb. | REPLIKASI 1 | | | Mean µm | REPLIKASI 2 | | | Mean µm |
|-------|-------------|-------|-------|------------|-------------|-------|-------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 1.198 | 1.214 | 1.215 | 1.209 | 1.273 | 1.145 | 1.215 | 1.211 |
| 2 | 1.604 | 1.549 | 1.533 | 1.562 | 1.838 | 1.956 | 2.054 | 1.949 |
| 3 | 1.327 | 1.332 | 1.341 | 1.333 | 1.314 | 1.322 | 1.344 | 1.327 |
| 4 | 1.752 | 1.972 | 1.956 | 1.893 | 1.901 | 2.133 | 1.958 | 1.997 |
| 5 | 2.001 | 2.008 | 1.978 | 1.996 | 1.86 | 2.073 | 2.158 | 2.030 |
| 6 | 1.733 | 1.796 | 1.791 | 1.773 | 1.805 | 2.387 | 2.113 | 2.102 |
| 7 | 2.273 | 2.374 | 2.474 | 2.374 | 2.731 | 2.679 | 2.587 | 2.666 |
| 8 | 2.384 | 2.475 | 2.56 | 2.473 | 2.413 | 2.286 | 2.331 | 2.343 |
| 9 | 2.368 | 2.382 | 2.384 | 2.378 | 2.449 | 2.341 | 2.443 | 2.411 |
| 10 | 1.0532 | 1.025 | 1.044 | 1.041 | 1.094 | 1.102 | 1.104 | 1.100 |
| 11 | 1.129 | 1.146 | 1.18 | 1.152 | 1.258 | 1.157 | 1.352 | 1.256 |
| 12 | 1.262 | 1.147 | 1.237 | 1.215 | 1.438 | 1.349 | 1.246 | 1.344 |
| 13 | 1.938 | 1.923 | 2.054 | 1.972 | 1.862 | 1.92 | 1.94 | 1.907 |
| 14 | 1.929 | 1.917 | 2.114 | 1.987 | 1.721 | 1.63 | 1.761 | 1.704 |
| 15 | 1.937 | 2.052 | 2.114 | 2.034 | 1.805 | 2.187 | 1.915 | 1.969 |
| 16 | 2.362 | 2.432 | 2.348 | 2.381 | 2.256 | 2.423 | 2.318 | 2.332 |
| 17 | 2.481 | 2.568 | 2.641 | 2.563 | 2.567 | 2.398 | 2.452 | 2.472 |
| 18 | 2.736 | 2.982 | 2.831 | 2.850 | 2.763 | 2.671 | 2.731 | 2.722 |

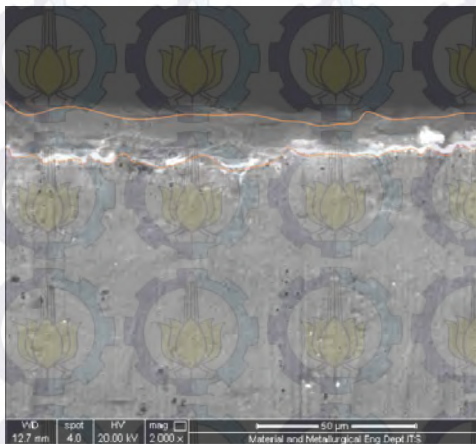
Sumber: Hasil pengukuran

LAMPIRAN 7

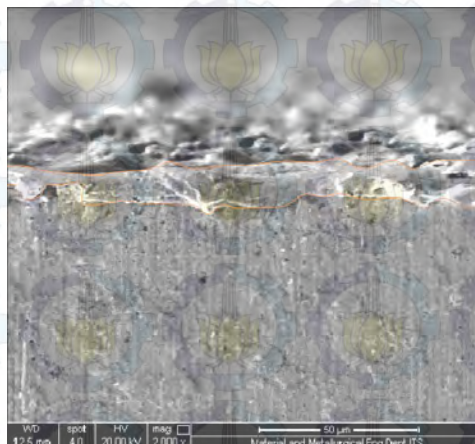
FOTO SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)

PERCOBAAN AWAL

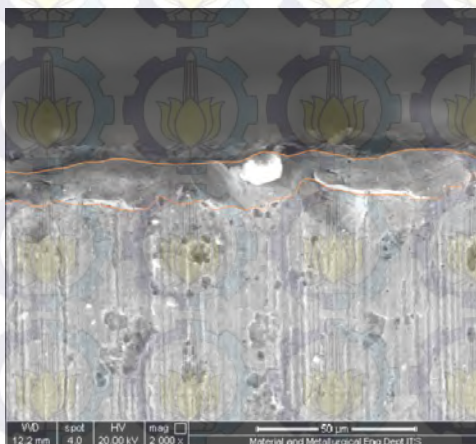
PERCOBAAN KONFIRMASI



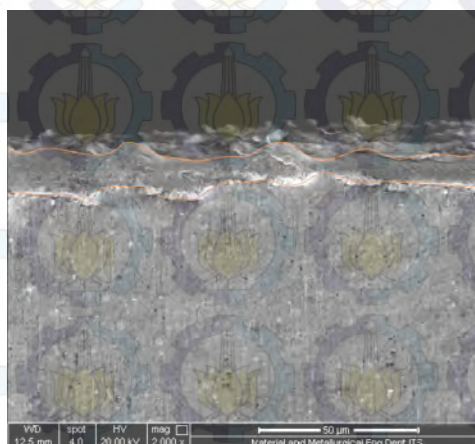
Gambar L7.1 Kombinasi awal 1



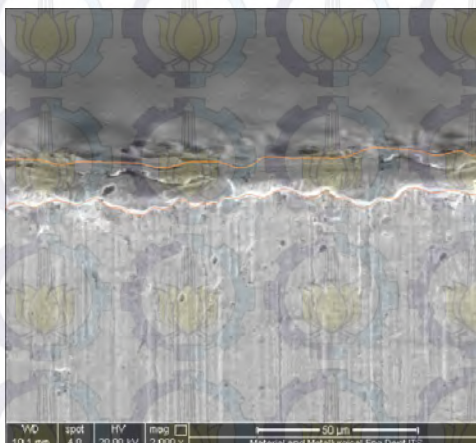
Gambar L7.2 Kombinasi optimum 1



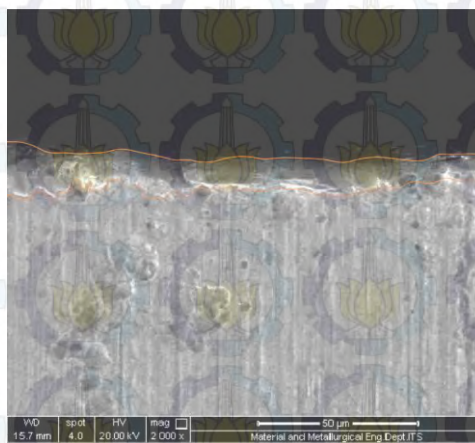
Gambar L7.3 Kombinasi awal 2



Gambar L7.4 Kombinasi optimum 2



Gambar L7.5 Kombinasi awal 3



Gambar L7.6 Kombinasi optimum 3

LAMPIRAN 8

DATA TEBAL RATA-RATA LAPISAN RECAST

Tabel L8. Tebal rata-rata lapisan *recast*

| Komb. | REPLIKASI 1 | | Mean μm | REPLIKASI 1 | | Mean μm |
|-------|-------------|--------|------------|-------------|--------|------------|
| | Luas Area | Skala | | Luas Area | Skala | |
| 1 | 1592.0476 | 149.87 | 10.623 | 1607.80536 | 149.87 | 10.728 |
| 2 | 1581.7696 | 149.87 | 10.554 | 1562.444 | 149.87 | 10.425 |
| 3 | 1561.7351 | 149.87 | 10.421 | 1467.646 | 149.87 | 9.793 |
| 4 | 1731.726 | 149.87 | 11.555 | 1718.2502 | 149.87 | 11.465 |
| 5 | 1788.1967 | 149.87 | 11.932 | 1741.447 | 149.87 | 11.620 |
| 6 | 1758.3696 | 149.87 | 11.733 | 1718.3852 | 149.87 | 11.466 |
| 7 | 2006.1999 | 149.87 | 13.386 | 1853.5622 | 149.87 | 12.368 |
| 8 | 2019.0339 | 149.87 | 13.472 | 1955.5798 | 149.87 | 13.049 |
| 9 | 2026.439 | 149.87 | 13.521 | 2006.1999 | 149.87 | 13.386 |
| 10 | 1623.708 | 149.87 | 10.834 | 1663.8462 | 149.87 | 11.102 |
| 11 | 1698.2003 | 149.87 | 11.331 | 1679.5387 | 149.87 | 11.207 |
| 12 | 1703.1036 | 149.87 | 11.364 | 1702.8616 | 149.87 | 11.362 |
| 13 | 1794.7023 | 149.87 | 11.975 | 1766.2984 | 149.87 | 11.786 |
| 14 | 1846.4129 | 149.87 | 12.320 | 1812.2132 | 149.87 | 12.092 |
| 15 | 1865.4682 | 149.87 | 12.447 | 1826.701 | 149.87 | 12.189 |
| 16 | 2082.7363 | 149.87 | 13.897 | 2341.3366 | 149.87 | 15.622 |
| 17 | 2150.4183 | 149.87 | 14.349 | 2113.25 | 149.87 | 14.101 |
| 18 | 2573.9337 | 149.87 | 17.174 | 2061.3457 | 149.87 | 13.754 |

Sumber: Hasil pengukuran

LAMPIRAN 9

DATA PERCOBAAN AWAL DAN PERCOBAAN KONFIRMASI

Tabel L9.1 Lebar pemotongan (*kerf*) kombinasi awal (AN₁ON₂OFF₂OV₂SV₂)

| Trial | Kerf | | | Mean mm |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 0.346 | 0.326 | 0.339 | 0.337 |
| 2 | 0.306 | 0.319 | 0.315 | 0.313 |
| 3 | 0.311 | 0.333 | 0.321 | 0.322 |

Tabel L9.2 Lebar pemotongan (*kerf*) kombinasi optimum (AN₁ON₁OFF₁OV₃SV₃)

| Trial | Kerf (mm) | | | Mean mm |
|-------|-----------|-------|-------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 0.312 | 0.294 | 0.314 | 0.307 |
| 2 | 0.279 | 0.287 | 0.297 | 0.288 |
| 3 | 0.296 | 0.317 | 0.278 | 0.297 |

Tabel L9.3 Laju pengerjaan bahan (LPB) kombinasi awal (AN₁ON₂OFF₂OV₂SV₂)

| Trial | Panjang | | | Mean mm (a) | Kerf mm (b) | Tebal mm (c) | Waktu min (d) | LPB mm ³ /min [(a.b.c)/d] |
|-------|---------|--------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--|
| | 1 | 2 | 3 | | | | | |
| 1 | 10.097 | 10.095 | 10.098 | 10.097 | 0.337 | 15 | 7.826 | 6.522 |
| 2 | 10.097 | 10.096 | 10.096 | 10.096 | 0.313 | 15 | 5.985 | 7.928 |
| 3 | 10.099 | 10.098 | 10.097 | 10.098 | 0.322 | 15 | 6.573 | 7.413 |

Tabel L9.4 Laju pengerjaan bahan (LPB) kombinasi optimum (AN₁ON₁OFF₁OV₃SV₃)

| Trial | Panjang | | | Mean mm (a) | Kerf mm (b) | Tebal mm (c) | Waktu min (d) | LPB mm ³ /min [(a.b.c)/d] |
|-------|---------|--------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--|
| | 1 | 2 | 3 | | | | | |
| 1 | 10.097 | 10.095 | 10.096 | 10.096 | 0.307 | 15 | 5.257 | 8.835 |
| 2 | 10.097 | 10.096 | 10.096 | 10.096 | 0.288 | 15 | 4.993 | 8.725 |
| 3 | 10.097 | 10.098 | 10.097 | 10.097 | 0.297 | 15 | 4.919 | 9.144 |

Tabel L9.5 Kekasaran permukaan

| Komb. | AWAL | | | Mean μm | OPTIMUM | | | Mean μm |
|-------|-------|-------|-------|-----------------------|---------|-------|-------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 1.453 | 1.373 | 1.571 | 1.466 | 1.322 | 1.112 | 1.221 | 1.218 |
| 2 | 1.831 | 1.732 | 1.635 | 1.733 | 1.126 | 1.123 | 1.258 | 1.169 |
| 3 | 1.643 | 1.673 | 1.518 | 1.611 | 1.033 | 1.141 | 1.133 | 1.102 |

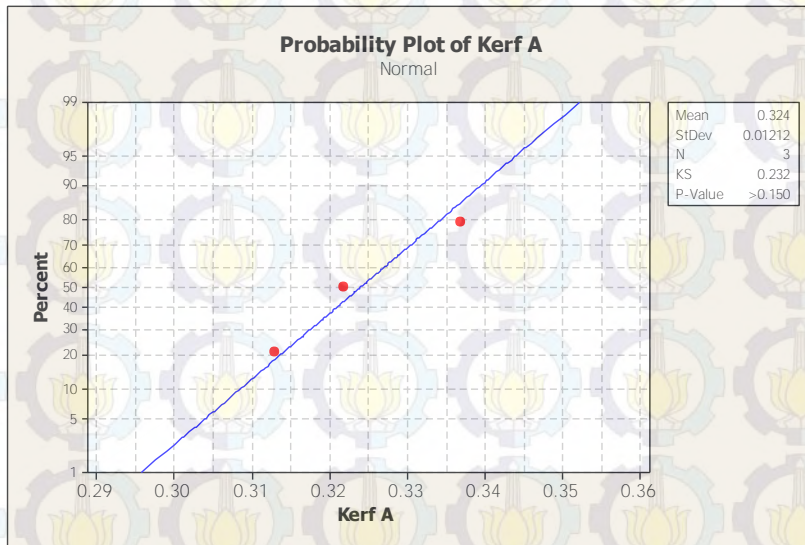
Tabel L9.6 Tebal rata-rata lapisan *recast*

| Komb. | AWAL | | Tebal rata- rata | OPTIMUM | | Tebal rata- rata |
|-------|-----------|---------|------------------------|-----------|---------|------------------------|
| | Luas area | Skala | | Luas area | Skala | |
| 1 | 1946.362 | 149.870 | 12.987 | 1533.320 | 149.870 | 10.231 |
| 2 | 1907.246 | 149.870 | 12.726 | 1522.529 | 149.870 | 10.159 |
| 3 | 1926.879 | 149.870 | 12.857 | 1534.519 | 149.870 | 10.239 |

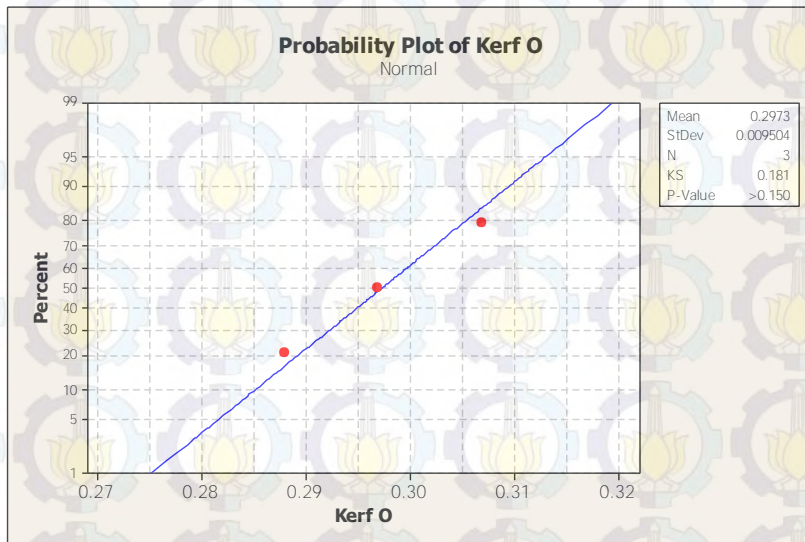
LAMPIRAN 10A
**UJI KESAMAAN RATA-RATA PENGATURAN KOMBINASI AWAL
 DENGAN PENGATURAN KOMBINASI OPTIMUMLEBAR
 PEMOTONGAN (*KERF*)**

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

a) Uji kenormalan data



Gambar L10A.1 *Probability plot* dari respon *kerf* kombinasi awal



Gambar L10A.2 *Probability plot* dari respon *kerf* kombinasi optimum

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

b) Uji kesamaan variansi

Test and CI for Two Variances: Kerf A, Kerf O

Method

Null hypothesis Sigma(Kerf A) / Sigma(Kerf O) = 1
Alternative hypothesis Sigma(Kerf A) / Sigma(Kerf O) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics

| Variable | N | StDev | Variance |
|----------|---|-------|----------|
| Kerf A | 3 | 0.012 | 0.000 |
| Kerf O | 3 | 0.010 | 0.000 |

Ratio of standard deviations = 1.276
Ratio of variances = 1.627

95% Confidence Intervals

| Distribution of Data | CI for StDev Ratio | CI for Variance Ratio |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| Normal Continuous | (0.204, 7.966) (*, *) | (0.042, 63.465) (*, *) |

Tests

| Method | DF1 | DF2 | Test Statistic | P-Value |
|--------------------------------|-----|-----|----------------|---------|
| F Test (normal) | 2 | 2 | 1.63 | 0.761 |
| Levene's Test (any continuous) | 1 | 4 | 0.10 | 0.773 |

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

c) Uji kesamaan rata-rata

Two-sample T for Kerf A vs Kerf O

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|--------|---|---------|---------|---------|
| Kerf A | 3 | 0.3240 | 0.0121 | 0.0070 |
| Kerf O | 3 | 0.29733 | 0.00950 | 0.0055 |

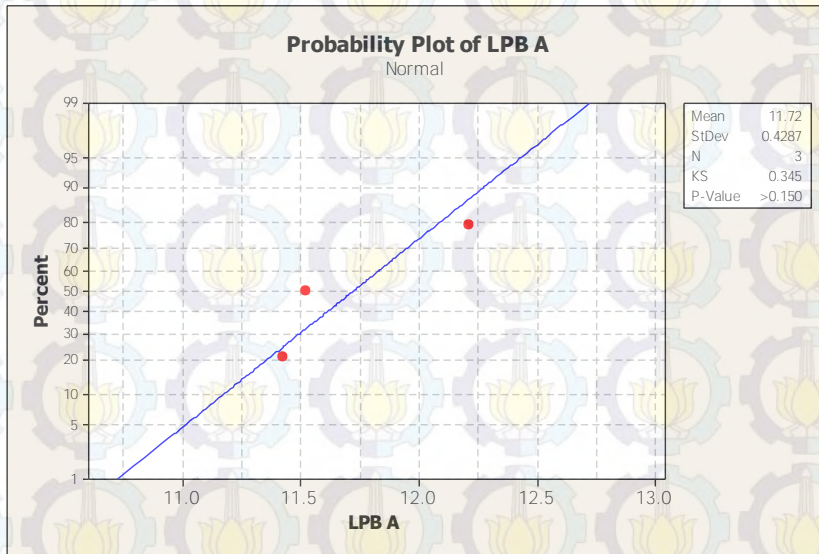
Difference = mu (Kerf A) - mu (Kerf O)
Estimate for difference: 0.02667
95% lower bound for difference: 0.00771
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 3.00 P-Value = 0.020
DF = 4
Both use Pooled StDev = 0.0109

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

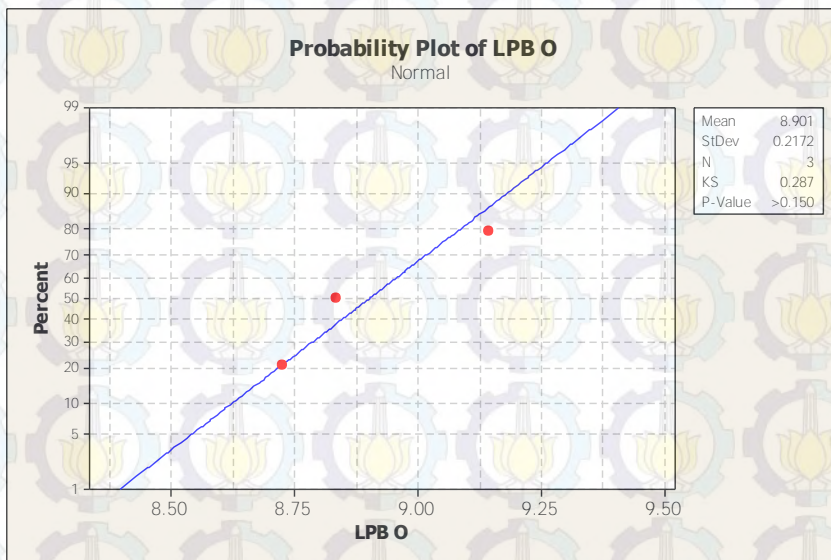
LAMPIRAN 10B
**UJI KESAMAAN RATA-RATA PENGATURAN KOMBINASI AWAL
DENGAN PENGATURAN KOMBINASI OPTIMUM LAJU
PENGGERJAAN BAHAN (LPB)**

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

a) Uji kenormalan data



Gambar L10B.1 *Probability plot* dari respon LPB kombinasi awal



Gambar L10B.2 *Probability plot* dari respon LPB kombinasi optimum

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

b) Uji kesamaan variansi

Test and CI for Two Variances: LPB A, LPB O

Method

Null hypothesis Sigma(LPBA) / Sigma(LPBO) = 1
 Alternative hypothesis Sigma(LPBA) / Sigma(LPBO) not = 1
 Significance level Alpha = 0.05

Statistics

| Variable | N | StDev | Variance |
|----------|---|-------|----------|
| LPB A | 3 | 0.429 | 0.184 |
| LPB O | 3 | 0.217 | 0.047 |

Ratio of standard deviations = 1.973
 Ratio of variances = 3.894

95% Confidence Intervals

| Distribution of Data | CI for StDev Ratio | CI for Variance Ratio |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
| Normal Continuous | (0.316, 12.323) | (0.100, 151.864) |
| | (*, *) | (*, *) |

Tests

| Method | DF1 | DF2 | Statistic | P-Value |
|--------------------------------|-----|-----|-----------|---------|
| F Test (normal) | 2 | 2 | 3.89 | 0.409 |
| Levene's Test (any continuous) | 1 | 4 | 0.27 | 0.630 |

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

c) Uji kesamaan rata-rata

Two-sample T for LPB A vs LPB O

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|-------|---|--------|-------|---------|
| LPB A | 3 | 11.721 | 0.429 | 0.25 |
| LPB O | 3 | 8.901 | 0.217 | 0.13 |

Difference = mu (LPB A) - mu (LPB O)

Estimate for difference: 2.820

95% upper bound for difference: 3.411

T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = 10.16 P-Value = 1.000

DF = 4

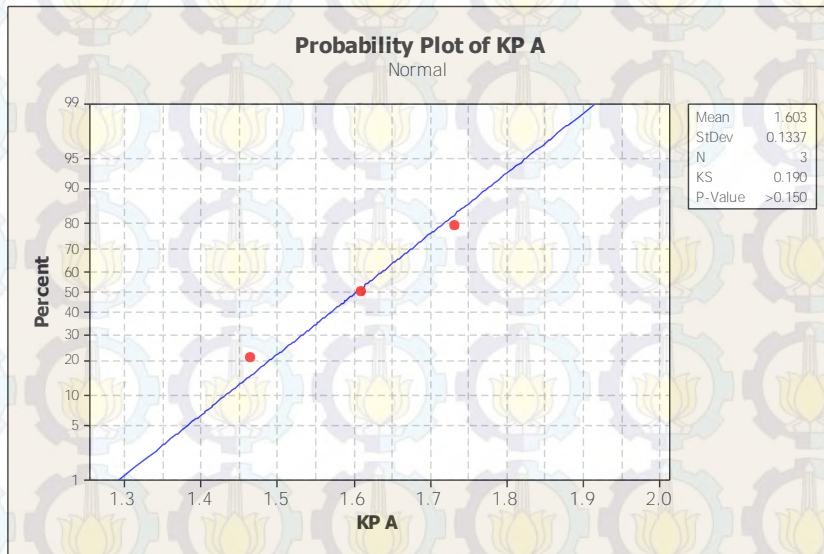
Both use Pooled StDev = 0.3398

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

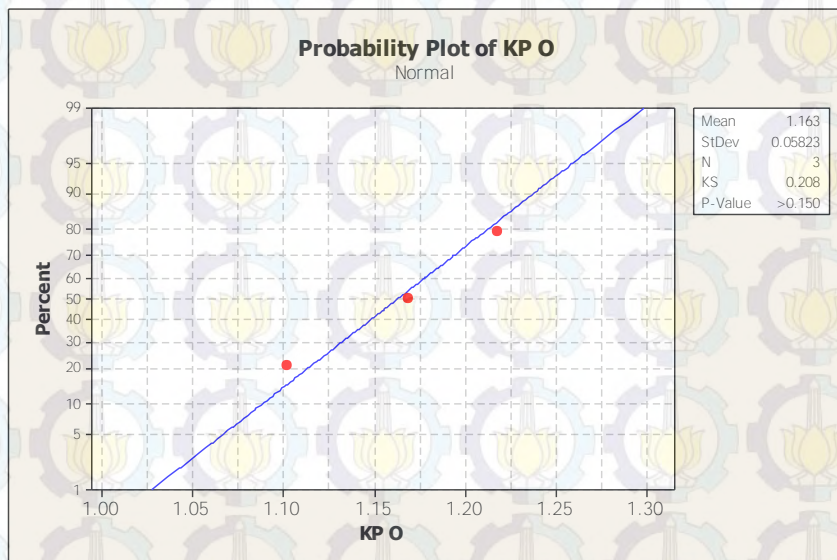
LAMPIRAN 10C
**UJI KESAMAAN RATA-RATA PENGATURAN KOMBINASI AWAL
DENGAN PENGATURAN KOMBINASI OPTIMUM KEKASARAN
PERMUKAAN (KP)**

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

a) Uji kenormalan data



Gambar L10C.1 *Probability plot* dari respon KP kombinasi awal



Gambar L10C.2 *Probability plot* dari respon KP kombinasi optimum

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

b) Uji kesamaan variansi

Test and CI for Two Variances: KPA, KPO

Method

Null hypothesis Sigma(KP A) / Sigma(KP O) = 1
Alternative hypothesis Sigma(KP A) / Sigma(KP O) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics

| Variable | N | StDev | Variance |
|----------|---|-------|----------|
| KP A | 3 | 0.134 | 0.018 |
| KP O | 3 | 0.058 | 0.003 |

Ratio of standard deviations = 2.295
Ratio of variances = 5.269

95% Confidence Intervals

| Distribution of Data | CI for StDev Ratio | CI for Variance Ratio |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
| Normal | (0.368, 14.335) | (0.135, 205.481) |
| Continuous | (*, *) | (*, *) |

Tests

| Method | DF1 | DF2 | Statistic | Test P-Value |
|--------------------------------|-----|-----|-----------|--------------|
| F Test (normal) | 2 | 2 | 5.27 | 0.319 |
| Levene's Test (any continuous) | 1 | 4 | 1.04 | 0.365 |

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

c) Uji kesamaan rata-rata

Two-sample T for KP A vs KP O

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|------|---|--------|--------|---------|
| KP A | 3 | 1.603 | 0.134 | 0.077 |
| KP O | 3 | 1.1630 | 0.0582 | 0.034 |

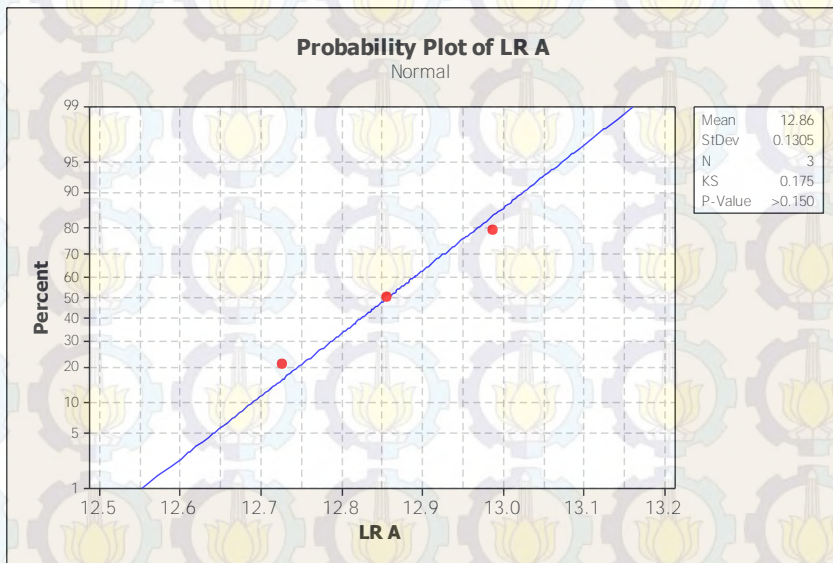
Difference = mu (KP A) - mu (KP O)
Estimate for difference: 0.4403
95% lower bound for difference: 0.2609
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 5.23 P-Value = 0.003
DF = 4
Both use Pooled StDev = 0.1031

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

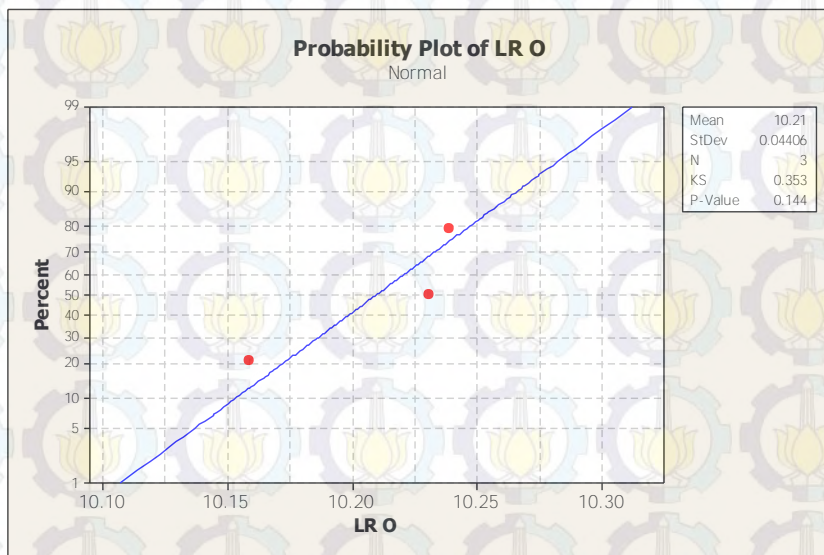
LAMPIRAN 10D
**UJI KESAMAAN RATA-RATA PENGATURAN KOMBINASI AWAL
DENGAN PENGATURAN KOMBINASI OPTIMUM TEBAL LAPISAN
RECAST (LR)**

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

a) Uji kenormalan data



Gambar L10D.1 *Probability plot* dari respon LR kombinasi awal



Gambar L10D.2 *Probability plot* dari respon LR kombinasi optimum

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

b) Uji kesamaan variansi

Test and CI for Two Variances: LRA, LRO

Method

Null hypothesis Sigma(LR A) / Sigma(LR O) = 1
Alternative hypothesis Sigma(LR A) / Sigma(LR O) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics

| Variable | N | StDev | Variance |
|----------|---|-------|----------|
| LR A | 3 | 0.131 | 0.017 |
| LR O | 3 | 0.044 | 0.002 |

Ratio of standard deviations = 2.962
Ratio of variances = 8.772

95% Confidence Intervals

| Distribution of Data | CI for StDev Ratio | CI for Variance Ratio |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
| Normal Continuous | (0.474, 18.497) | (0.225, 342.127) |
| | (*, *) | (*, *) |

Tests

| Method | DF1 | DF2 | Statistic | Test P-Value |
|--------------------------------|-----|-----|-----------|--------------|
| F Test (normal) | 2 | 2 | 8.77 | 0.205 |
| Levene's Test (any continuous) | 1 | 4 | 1.51 | 0.287 |

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

c) Uji kesamaan rata-rata

Two-sample T for LR A vs LR O

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|------|---|---------|--------|---------|
| LR A | 3 | 12.857 | 0.131 | 0.075 |
| LR O | 3 | 10.2097 | 0.0441 | 0.025 |

Difference = mu (LR A) - mu (LR O)
Estimate for difference: 2.6470
95% lower bound for difference: 2.4775
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 33.29 P-Value = 0.000
DF = 4
Both use Pooled StDev = 0.0974

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

LAMPIRAN 11

SERTIFIKAT MATERIAL BAJA PERKAKAS BUDERUS 2080

Buderus | Edelmetall

| | | | | | | |
|---|------------------------|--|------------------------------|---|-----------|-----------|
| PT Wicpanda Lestari Steel JL. Kaliwaron 54-56 RI 60285 SURABAYA | | Werkzeugs-Nr.: A3009101215 EN 10 204 - 2.2 | Buderus EDELSTAHL | | | |
| | | Kunden Bestell-Nr.: 206/WLS/2012 Rechnung-Nr.: 3037025251 Rechnung-Datum: 26.04.2012 | | | | |
| Ges. Anzahl | Materiälbezeichnung | Lot alloy steels 1.2379 / X155CrVNi12 1 FLAT BARS ANNEALED | Gesamsgewicht kg 16,063.7 | | | |
| 752 | | | | | | |
| Ausführung: | | | | | | |
| Abmessung: 20 | Flat HEAT NO: 10057 | 10 x 100 mm x R/L | 475.2 Kg | | | |
| Abmessung: 5 | Flat HEAT NO: 10057 | 10 x 510 mm x R/L | 605.9 Kg | | | |
| Abmessung: 5 | Flat HEAT NO: 10057 | 12 x 500 mm x R/L | 712.8 Kg | | | |
| Abmessung: 2 | Flat HEAT NO: 10057 | 14 x 640 mm x R/L | 405.8 Kg | | | |
| Abmessung: 100 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 20 mm x R/L | 712.8 Kg | | | |
| Abmessung: 100 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 25 mm x R/L | 391.0 Kg | | | |
| Abmessung: 100 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 30 mm x R/L | 1069.2 Kg | | | |
| Abmessung: 100 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 40 mm x R/L | 1425.6 Kg | | | |
| Abmessung: 100 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 50 mm x R/L | 1782.0 Kg | | | |
| Abmessung: 100 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 80 mm x R/L | 2851.2 Kg | | | |
| Abmessung: 50 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 100 mm x R/L | 1782.0 Kg | | | |
| Abmessung: 30 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 120 mm x R/L | 1285.0 Kg | | | |
| Abmessung: 20 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 140 mm x R/L | 997.9 Kg | | | |
| Abmessung: 20 | Flat HEAT NO: 10057 | 15 x 150 mm x R/L | 1069.2 Kg | | | |
| Chemische Analyse in Gew. % (Aussatz) | | | | | | |
| Element | C | Si | Mn | Cr | Mo | V |
| ist | 1.20-1.35 | 0.20-0.30 | 0.20-0.35 | 9.80-12.00 | 0.50-0.70 | 0.55-1.00 |
| Bemerkungen: Wir bestätigen, dass die Angaben des oben aufgeführten Lieferungsbezugs es Ursprungszeugnisses nach EN 10204 2.2 o. 1.1 entsprechen | | | | Buderus Edelmetall GmbH Qualitätskontrolle Wetzlar, 26.04.2012 Fr. G. Lauterbach | | |

BIODATA PENULIS



Mega Diantoro, dilahirkan di kota Sidoarjo pada tanggal 10 September 1990. Penulis adalah anak pertama dari empat bersaudara pasangan Bapak H. Sapawi dan Ibu Hj. Mariana. Pendidikan dasar ditempuh di SDN 4 tuban, lulus pada tahun 2002. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Sunari Loka Kuta, lulus pada tahun 2005. Pendidikan sekolah menengah atas ditempuh di SMA 1 Muhammadiyah sampai pada tahun 2008. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan S1 selama empat tahun di Universitas Udayana jurusan Teknik Mesin. Gelar sarjana teknik diperoleh setelah menamatkan pendidikannya pada tahun 2012. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan studi S2 di ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya) tepatnya di jurusan Teknik Mesin program studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur. Saat ini penulis mempunyai keinginan untuk mengembangkan hasil dari tesisnya menjadi penelitian-penelitian lanjut di bidang proses manufaktur.