



**ANALISA RSM (*RESPONSE SURFACE METHODE*) DENGAN VARIASI
*WIRE SPEED, INTERPULSE, DAN ARUS TERHADAP MATERIAL
REMOVAL RATE DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES
WIRE – EDM***

SKRIPSI

Oleh:

Arif Efendi

NIM 121910101068

**PROGRAM STUDI STRATA I
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2020



**ANALISA RSM (*RESPONSE SURFACE METHODE*) DENGAN VARIASI
*WIRE SPEED, INTERPULSE, DAN ARUS TERHADAP MATERIAL
REMOVAL RATE DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES
WIRE – EDM***

SKRIPSI

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

Oleh:

Arif Efendi

NIM 121910101068

**PROGRAM STUDI STRATA I
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**

PERSEMBAHAN

Segala puji syukur kepada Allah SWT dengan ikhlas dan kerendahan hati, saya persembahkan skripsi ini kepada:

1. Allah SWT atas segala berkat, rahmat, serta hidayah - Nya, serta kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.
2. Kedua orang tua saya Ayah Sugiono dan Ibu Endang Miryatin yang memberikan segala do'a dukungan semangat dan materi, keluarga saya Kakak Nur Fidiawati, Kakak Suryanto. Terima kasih atas semua do'a, motivasi dan bimbingan kalian semua demi terciptanya insan yang beriman dan berakhlak mulia.
3. Bapak Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T. dan Bapak Ir. Mochammad Edoward Ramadhan, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Ir. Franciscus Xaverius Kristianta M.Eng. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Ir. Robertus Sidartawan S.T.,M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan banyak saran demi terciptanya sebuah tulisan yang baik dan benar dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Seluruh guru dari taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidik dan mengarahkan pada kebaikan.
6. Almamater Universitas Jember tercinta.
7. Saudara seperjuanganku Teknik Mesin 2012.
8. Keluarga seperjuangan skripsi (Radix Fahri, Wildan Ahmada, dan Adi Febri) yang telah memberikan tenaga dan waktunya untuk membantu penelitian ini.
9. Keluarga Kobar yang selalu memberikan semangat dan motivasi yang tiada henti.

MOTTO

“Never trouble about trouble until trouble troubles you.”

(Rosemary Kesanly)

“Jangan takut untuk terjatuh, tetapi takutlah ketika kau tidak bisa bangkit.”

(Nur Hidayatur Rahmah)

“Kesuksesan bukan akhir, kegagalan bukan hal yang fatal, hal itu adalah keberanian untuk melanjutkan apa yang penting.”

(Winston Churchill)

“Hiduplah seperti pohon yang lebat buahnya, hidup ditepi jalan dan meski dilempari dengan batu, tetap akan membalas dengan memberi buah.”

(Abu Bakar As - Siddiq)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Arif Efendi

NIM : 121910101068

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “**Analisa RSM (Response Surface Methode) Dengan Variasi Wire Speed, Interpulse, dan Arus Terhadap Material Removal Rate dan Kekasaran Permukaan Pada Proses Wire – Edm**” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapatkan sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 23 Januari 2020

yang menyatakan,

Arif Efendi

NIM.121910101068

SKRIPSI

**ANALISA RSM (*RESPONSE SURFACE METHODE*) DENGAN VARIASI
*WIRE SPEED, INTERPULSE, DAN ARUS TERHADAP MATERIAL
REMOVAL RATE DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES
WIRE – EDM***

Oleh :

Arif Efendi

NIM 121910101068

Pembimbing

Pembimbing Utama : Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T.

Pembimbing Anggota : Ir. Mochammad Edoward R, S.T., M.T.

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisa RSM (*Response Surface Methode*) Dengan Variasi *Wire Speed*, *Interpulse*, dan Arus Terhadap *Material Removal Rate* dan Kekasaran Permukaan Pada Proses *Wire – EDM*”.

Telah diuji dan disahkan pada :

Hari, Tanggal : Kamis, 23 Januari 2020

Tempat : Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin

Tim Pembimbing

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T.
NIP. 196008121998021001

Ir. Mochamad Edoward R, S.T., M.T.
NIP. 198704302014041001

Tim Penguji

Penguji I,

Penguji II,

Ir. F.X. Kristianta, M.Eng.
NIP. 196501202001121001

Ir. Robertus Sidartawan, S.T., M.T.
NIP. 197003101997021001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik

Universitas Jember,

Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP. 197008261997021001

RINGKASAN

Analisa RSM (*Response Surface Methode*) Dengan Variasi *Wire Speed*, *Interpulse*, dan Arus Terhadap MRR (*Material Removal Rate*) dan Kekasaran Permukaan Pada Proses *Wire - EDM*; Arif Efendi. 1219010101068; 2020; 98 halaman; Jurusan Teknik Mesin, Fakultas teknik, Universitas Jember.

Electrical Discharge Machining (EDM) adalah salah satu proses pemotongan benda kerja dengan memanfaatkan loncatan bunga api listrik melalui elektroda sebagai pahat potong. *Wire - EDM* merupakan salah satu jenis EDM dengan hasil pemotongan dengan ketelitian yang tinggi yang biasa digunakan dalam pembuatan pisau pemotong, *dies* dll. Baja yang digunakan adalah baja SLD dengan sifat yang keras dan tahan terhadap panas.

Analisa MRR dan kekasaran permukaan dilakukan dengan variasi *wire speed* sebesar (5, 6, 7 mm/s), *interpulse* sebesar (7, 9, 11 μ s), dan arus sebesar (8, 10, 12 Amp). Metode yang digunakan dalam percobaan ini adalah *Response Surface* dengan tiga kali replikasi.

Dengan hasil optimum yang didapatkan menggunakan *software* perangkat lunak statistik adalah *wire speed* sebesar 5,2020 mm/s, *interpulse* sebesar 7,7273 μ s, dan arus sebesar 8 amp yang akan menghasilkan nilai optimum *Material Removal Rate* (MRR) sebesar 54,5688 mm³/menit dan kekasaran permukaan sebesar 5,2391 μ m.

SUMMARY

Analysis RSM (Response Surface Methode) With Variations in Wire Speed, Interpulse, and Current Against MRR (Material Removal Rate) and Surface Roughness in Wire – EDM Processes; Arif Efendi. 121910101068; 2020; 98 pages; Mechanical Engineering Department of Engineering Faculty of Jember University.

Electrical Discharge Machining (EDM) is a process of cutting workpieces by utilizing electric sparks through the electrodes as cutting chisel. Wire – EDM is one type of EDM with high accuracy cutting results commonly used in making cutting knives, dies etc. The steel used is SLD steel with hard and heat resistant properties.

MRR analysis and surface roughness are carried out with wire speed variations of (5, 6, 7 mm/s), interpulse of (7, 9, 11 μ s), and current of (8, 10, 12 Amp). The method used in this experiment is Response Surface Methode with three replications.

With the optimum results obtained using statistical software is wire speed of 5,2020 mm/s, an interpulse of 7,7273 μ s, and a current of 8 amp which will produce an optimum *Material Removal Rate (MRR)* of 54,5688 mm³/minute and surface roughness of 5,2391 μ m.

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan atas kehadiran Allah SWT. atas segala berkat, bimbingan, serta rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi tentang “Analisa RSM (*Response Surface Methode*) Dengan Variasi *Wire Speed, Interpulse*, dan Arus Terhadap *Material Removal Rate* (MRR) dan Kekasaran Permukaan Pada Proses *Wire - EDM*”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pada kesempatan ini pula penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Ir. Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Fakultas Teknik Mesin Universitas Jember.
3. Bapak Dr. Ir. Salahudin Junus, S.T., M.T. selaku Ketua Prodi S1 Fakultas Teknik Mesin Universitas Jember.
4. Bapak Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T. dan Bapak Ir. Mochammad Edoward R, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing dalam penyusunan skripsi.
5. Bapak Ir. Franciscus Xaverius Kristianta, M.Eng. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Ir. Robertus Sidartawan, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan banyak saran demi terciptanya sebuah tulisan yang baik dan benar dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Saudara seperjuangan Ahmad Khoirul Anwar (Alas), Mohammad Khabibie (Panu), Maulana Muhammad Firdaus (Citeng), Ahmad Rifqi in’A (Kenting) dan Mashyar Hilmi (Gondrong), Adrian Ronatal Situmorang, Lulus, Hasan, Reza, Ambon.
7. Adik-adik Teknik Mesin angkatan 2013, 2014, 2015, 2016, dan 2017.
8. Kepada pihak yang telah banyak membantu dan memberi masukan dalam penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa sebagai manusia biasa tidak terlepas dari keterbatasan, yang biasanya mewarnai kadar ilmiah dari skripsi ini. Oleh karena itu penulis selalu terbuka terhadap masukan dan saran dari semua pihak yang sifatnya membangun untuk mendekati kesempurnaan. Tidak lupa penulis menyampaikan permohonan maaf yang sebesar - besarnya jika terdapat kesalahan dan kekeliruan. Akhir kata penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan dapat menjadi bahan acuan yang bermanfaat di kemudian hari.

Jember, 23 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN SAMPUL.....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
<i>SUMMARY</i>	ix
PRAKATA.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.4.1 Tujuan Penelitian	3
1.4.2 Manfaat Penelitian.....	4
1.4 Hipotesa	4

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Proses Permesinan EDM (Electrical Dischard Machining)	5
2.2 Wirecut (Wire EDM)	7
2.2.1 Prinsip Kerja <i>Wire-EDM</i>	8
2.2.2 Bagian-Bagian <i>Wire-EDM</i>	10
2.2.3 Parameter Proses <i>Wire-EDM</i>	12
2.2.4 Jenis-Jenis Kawat Elektroda	14
2.2.5 Metode <i>Flushing</i> (Pembilasan Geram)	15
2.3 Material Baja SLD.....	15
2.4 <i>Material Removal Rate</i> (MRR).....	16
2.5 Kekasaran Permukaan.....	16
2.6 Desain Eksperimen	21
2.6.1 Prinsip dasar desain eksperimen	22
2.7 Metode Response Surface	23
2.7.1 Eksperimen orde 1	25
2.7.2 Eksperimen orde ke 2	27
2.8 Analisis statistik	29
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	33
3.2 Alat dan Bahan	33
3.2.1 Alat	33
3.2.2 Bahan.....	36
3.3 Rancangan Percobaan	37
3.3.1 Menentukan Variabel Bebas dan Terikat.....	37

3.4	Pelaksanaan Percobaan	38
3.5	Pengambilan Data	38
3.6	Tahap Penarikan Kesimpulan	42
BAB 4.	PEMBAHASAN	45
4.1	Data Hasil percobaan	45
4.2	Analisis Data <i>Material Removal Rate</i> (MRR)	45
4.2.1	Pengujian Residual	47
4.2.2	Pembentukan Model.....	49
4.2.3	Pengujian Kesesuaian Model	51
4.2.4	Analisis Contour dan Surface Plot	52
4.3	Analisis Data Kekasaran Permukaan	55
4.3.1	Pengujian Residual	56
4.3.2	Pembentukan Model.....	58
4.3.3	Pengujian Kesesuaian Model	60
4.3.4	Analisis Countour dan Surface Plot.....	61
4.4	Optimasi Respon.....	64
4.5	Pembahasan	66
4.5.1	Analisis Variabel Proses Terhadap MRR.....	66
4.5.2	Analisis Variabel Proses Terhadap Respon Kekasaran Permukaan.	67
4.5.3	Pembahasan analisis	68
BAB 5.	PENUTUP.....	72
5.1	Kesimpulan	72
5.2	Saran	72

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.3 Proses pembentukan bunga api pada WEDM (Kunieda dkk., 2005)	8
Gambar 2.5 proses <i>flushing</i> pada permesinan WEDM (port, 1922)	15
Gambar 2.6 Profil kekasaran permukaan	17
Gambar 2.7 Nilai kekasaran beberapa proses permesinan (Rochim, Dalam Yusron, 2014)	21
Gambar 2.8 Hubungan linier	25
Gambar 3.1 Mesin <i>wire</i> – EDM DK7740	33
Gambar 3.2 TR220 Portable Roughness Tester	34
Gambar 3.3 Skema proses pemotongan benda kerja	36
Gambar 3.4 Nilai kekasaran permukaan	39
Gambar 3.5 Representasi <i>Box-Behnken design</i> (Montgomery, 1997)	40
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 4.1 Plot residual <i>versus fits</i> pada MRR	48
Gambar 4.2 Plot ACF (Auto Correlation Function)	48
Gambar 4.3 Grafik <i>probability plot of residual</i> untuk MRR	49
Gambar 4.4 (a) <i>surface plot</i> dan (b) <i>contour plot</i> arus dan <i>interpulse</i> terhadap MRR pada <i>wirespeed</i> sebesar 5 mm/s	53
Gambar 4.5 (a) <i>surface plot</i> dan (b) <i>contour plot</i> arus dan <i>wirespeed</i> terhadap MRR pada <i>interpulse</i> sebesar 7 μ s	54
Gambar 4.6 (a) <i>surface plot</i> dan (b) <i>contour plot</i> <i>interpulse</i> dan <i>wirespeed</i> terhadap MRR pada arus sebesar 8 amp	55
Gambar 4.7 Plot residual <i>versus fitted values</i> pada kekasaran permukaan	57
Gambar 4.8 Plot ACF (Auto Correlation Function) pada kekasaran permukaan	57
Gambar 4.9 Gambar <i>probability plot</i> kekasaran permukaan	58
Gambar 4.10 (a) <i>surface plot</i> dan (b) <i>contour plot</i> arus dan <i>interpulse</i> terhadap kekasaran permukaan pada <i>wirespeed</i> sebesar 5 mm/s	62
Gambar 4.11 (a) <i>surface plot</i> dan (b) <i>contour plot</i> arus dan <i>wirespeed</i> terhadap kekasaran permukaan pada <i>interpulse</i> sebesar 7 μ s	63
Gambar 4.12 (a) <i>surface plot</i> dan (b) <i>contour plot</i> <i>interpulse</i> dan <i>wirespeed</i> terhadap kekasaran permukaan pada arus sebesar 8 amp	64
Gambar 4.13 Grafik kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimal	66

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Komposisi kimia baja SLD	16
Tabel 2.2 Tabel CCD(<i>Central Composite Design</i>) (Faulina, 2011)	24
Tabel 2.3 Rancangan Percobaan <i>Box-Behnken Design</i> dengan k=3 (Kristiyantoro, 2009)	24
Tabel 2.4 Rancangan faktorial pada percobaan faktorial 2^k	28
Tabel 2.5 Rancangan komposit pusat.....	28
Tabel 2.5 ANAVA untuk uji signifikansi regresi desain eksperimen.	29
Tabel 3.2 Spesifikasi TR220 <i>Portable Roughness Tester</i>	35
Tabel 3.2 Variabel bebas dan masing – masing level.	37
Tabel 3.3 Rancangan <i>Box-Behnken Design</i>	40
Tabel 4.1 data hasil percobaan.	45
Tabel 4.2 Data hasil percobaan MRR.	47
Tabel 4.3 Koefisien regresi untuk MRR	50
Tabel 4.4 Analysis of varians for MRR	51
Tabel 4.5 Data hasil percobaan kekasaran permukaan.	56
Tabel 4.6 Koefisien regresi untuk kekasaran permukaan	59
Tabel 4.7 Analisis varians untuk kekasaran permukaan	60
Tabel 4.8 Kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimum	66

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses permesinan merupakan proses yang tidak bisa dipisahkan dari industri manufaktur. Seiring dengan kemajuan teknologi, banyak produk yang semakin sulit untuk dikerjakan dengan proses permesinan konvensional. Untuk mengatasi masalah itu maka dikembangkanlah proses permesinan nonkonvensional. Proses permesinan nonkonvensional memiliki beberapa kelebihan seperti dalam hal ketelitian, ketepatan, kualitas dan kemampuannya untuk memotong benda kerja berkekuatan tinggi dan bentuk yang kompleks. Selain kelebihan tersebut, proses ini juga memiliki kekurangan yaitu produktivitasnya yang rendah dibandingkan dengan permesinan konvensional. Proses non konvensional terdiri atas beberapa jenis, satu diantaranya adalah *Electrical Discharge Machining Wire - Cut* (*EDM Wire - Cut*) yang sering digunakan dalam pembuatan pahat potong, *dies*, *punch*, dan *modal*. *Wire - Cut EDM (Electrical Discharge Machining)* adalah sebuah proses termo - elektrik yang menyebabkan benda kerja terkikis karena pelepasan muatan listrik (*Electric Discharge*). Sebagai elektroda digunakan kawat yang berbentuk silinder dengan diameter tertentu untuk memotong benda kerja. Proses permesinan *Wire - Cut* tidak dipengaruhi oleh sifat mekanik benda kerja, tetapi dipengaruhi oleh titik leburnya.

Baja SLD adalah jenis baja perkakas yang mempunyai ketahanan tinggi terhadap keausan dan memiliki stabilitas yang tinggi dalam pengerasan. Baja SLD sangat sering digunakan sebagai bahan pembuatan material *spareparts* industri karena sifatnya yang keras dan tahan terhadap panas, diantaranya dalam pembuatan pisau potong. Dalam hal ini pisau pemotong (*Cutting*) digunakan untuk memotong sebuah produk, sehingga pisau tersebut diharapkan dan dituntut untuk memiliki permukaan yang halus yang bisa dilihat pada ASTM D7127-13 dan tingkat kepresisian yang tinggi

Beberapa penelitian mengenai pengaturan parameter pemotongan pada *wire - EDM* telah dilakukan oleh Mulyadi dan Suryanto (2016)

tentang optimasi hasil proses *wire-EDM* dengan metode *Prinsipal Component Analysis (PCA)* membuktikan bahwa terdapat pengaruh yang signifikan terhadap laju pengerjaan bahan atau MRR, waktu pemotongan, lebar pemotongan dan kekasaran permukaan dari parameter *interpulse* (6 μ s, 9 μ s, 13 μ s), *electric current* (5 Amp, 10 Amp, 15 Amp), *wire speed* (3 mm/s, 5 mm/s, 7 mm/s) dan variabel frekuensi (70 Hz, 75 Hz, 80 Hz). Dari keempat parameter tersebut, pengaturan terbaik yang diperoleh dari optimasi dengan menetapkan *inter pulse* sebesar 9 μ s, *electric current* 10 Amp, *wire speed* 5 mm/s, dan variabel frekuensi 80 Hz. Berdasarkan Vikram dan Pradhan (2014) dengan optimisasi WEDM parameter menggunakan metode taguchi dan *response surface methodology (RSM)* dengan proses permesinan menggunakan baja AISI D2 menjelaskan bahwa parameter *pulse on time* (110, 115, 120 μ s), *pulse off time* (45, 50, 55 μ s), *servo voltage* (20, 35, 50 volt), dan *wire feed* (2, 4, 6 mm/min) dengan parameter optimal dari pengaturan kombinasi adalah *pulse on time* 112,99 μ s, *pulse off time* 45 μ s, *servo voltage* 20 volt, dan *wire feed* 4,85 mm/min untuk memaksimalkan MRR dan pemotongan juga meminimalisir kekasaran permukaan.

Berdasarkan pemaparan diatas maka dilaksanakan penelitian untuk mendapatkan setting variabel *wire speed*, *interpulse*, dan arus yang tepat pada produk pisau potong agar didapatkan hasil pengerjaan yang optimal pada penggunaan *wire - EDM*. Dengan variasi *wire speed* 5, 6, 7 mm/s, *interpulse* masing masing 7, 9, 11 μ s dan Arus masing masing 8, 10, 12 Amp. Dengan benda kerja yang akan dipotong dengan proses EDM *wire - cut* ini terbuat dari material SLD. Hasil pengerjaan optimal dalam hal ini adalah benda kerja yang mempunyai MRR (*Material Removal Rate*) yang cepat dan kekasaran permukaan yang halus.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Apakah variabel *wire speed*, *interpulse*, dan arus berpengaruh secara signifikan terhadap *material removal rate* dan kekasaran permukaan pada proses *wire - EDM* ?

2. Bagaimana setting variabel pada proses permesinan *wire* - EDM agar mendapatkan *material removal rate* yang cepat dan kekasaran permukaan yang halus ?

1.3 Batasan masalah

Adapun batasan masalah yang diterapkan untuk memudahkan analisa pada penelitian iniantara lain :

1. Karakteristik yang ditinjau pada penelitian ini adalah *material removal rate* dan kekasaran permukaan.
2. Benda kerja yang digunakan adalah baja SLD.
3. Mesin yang digunakan adalah mesin *wire* – EDM DK7740 .
4. Analisis pengujian data menggunakan metode *respons surface*.
5. Elektroda yang digunakan adalah *molybdenum* Ø 0,18 mm.
6. Cairan dielektrik yang digunakan adalah *Dromus*.
7. *Pulse width* sebesar 30 amp karena dianggap paling optimal.
8. *Variabel frequency* sebesar 78,9 karena dianggap paling optimal.
9. Peneliti tidak membahas tentang komponen dan biaya pada proses permesinan.
10. Peneliti dibatasi oleh tiga variabel bebas yaitu *wire speed*, *interpulse*, dan arus.
11. Peneliti hanya skala laboratorium dan tidak berdasarkan pada produk suatu pabrik.
12. Faktor faktor lain diluar penelitian diasumsikan konstan.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.4.1 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian kali ini adalah :

1. Untuk mengetahui variable proses seperti *wire speed*, *interpulse*, dan arus berpengaruh terhadap nilai *material removal rate* dan kekasaran permukaan proses *wire* - EDM.
2. Untuk mengetahui setting variable yang optimum pada *wire* - EDM agar mendapat pengaruh *material removal rate* dan kekasaran permukaan seoptimal

mungkin.

1.4.2 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Dapat mengetahui pengaruh parameter (*wire speed*, *interpulse*, dan arus) terhadap nilai *material removal rate* dan kekasaran permukaan.
2. Dapat mengotimalkan parameter (*wire speed*, *interpulse*, dan arus) agar menghasilkan *material removal rate* secepat mungkin dan kekasaran permukaan sehalus mungkin pada proses *wire* - EDM.
3. Memberikan informasi baru tentang harga *material removal rate* dan kekasaran permukaan yang dapat dicapai.

1.4 Hipotesa

Hipotesa penelitian ini adalah semakin tinggi nilai arus dan nilai *interpulse* maka *material removal rate* (MRR) akan meningkat, hal ini dikarenakan saat arus keluar dan *interpulse* berjalan akan terjadi loncatan bunga api antara benda kerja dengan elektroda yang menyebabkan *material removal rate* (MRR) meningkat. Berbanding terbalik dengan nilai *wire speed* yang semakin tinggi akan mengakibatkan nilai kekasaran permukaan semakin rendah dan membuat semakin rendah nilai MRR nya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Permesinan EDM (*Electrical Discharge Machining*)

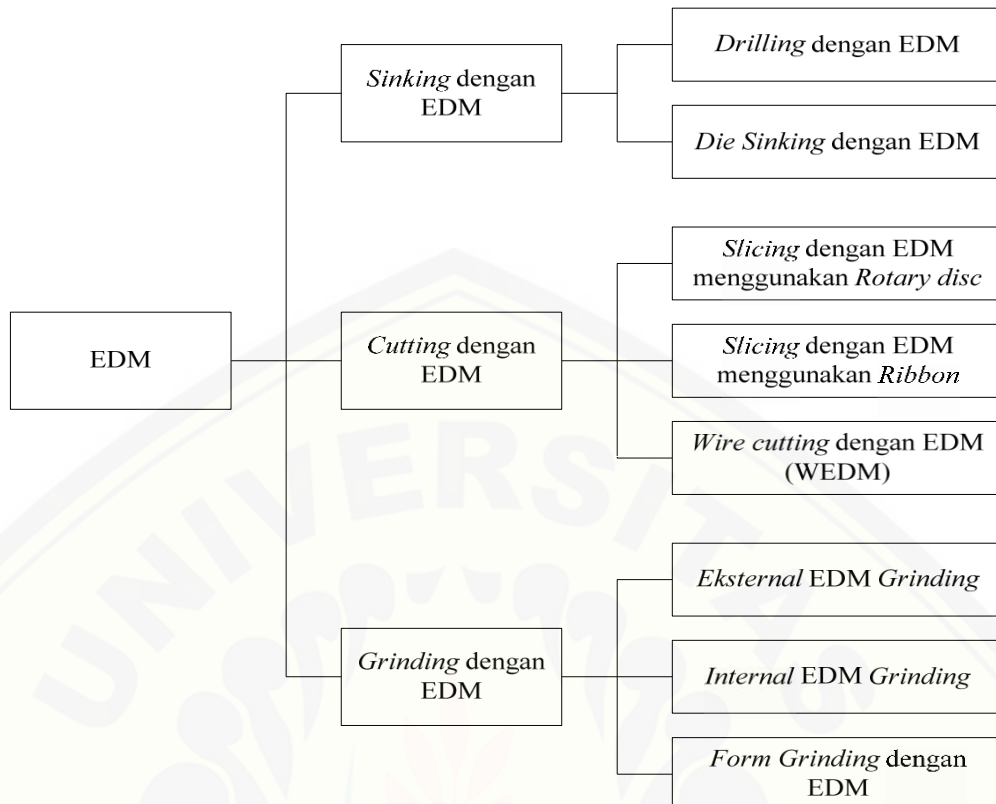
Pada era sekarang ini proses permesinan sudah amatlah maju dilengkapi dengan teknologi-teknologi yang canggih, Proses permesinan dibagi :

1. Proses konvensional, Proses pemotongan material menggunakan pahat, proses konvensional memang lebih murah tapi jika dihadapkan untuk pemotongan dengan material logam dengan kekuatan, kekasaran dan keuletan tinggi akan mengalami kesulitan.
2. Proses non-konvensional, dimana proses pemotongan material sudah tidak menggunakan pahat melainkan energi.

Lahirnya proses non-konvensional didorong oleh kebutuhan proses permesinan yang tidak bisa dicapai dengan proses permesinan konvensional. Proses tersebut antara lain,

1. Pemotongan material dengan sifat-sifat, memiliki kekuatan tinggi, kekasaran tinggi, keuletan tinggi dan lain-lain.
2. Pemotongan dengan bentuk geometri yang ireguler atau kompleks, misalnya pembuatan roda gigi dalam, pembuatan model radius-radius kecil dan lain sebagainya.
3. Menghindari cacat yang diakibatkan oleh pahat pada proses permesinan konvensional.

Secara umum berdasarkan energi yang digunakan, proses non-konvensional dibagi menjadi empat jenis, mekanik, elektrik, kimia dan termal. EDM termasuk material pada mesin EDM terjadi oleh sejumlah loncatan bunga api listrik pada celah diantara katoda (benda kerja) dengan anoda (elektroda). Proses permesinan EDM didasarkan pada *melting* temperatur bukan kekerasan sehingga mesin ini mampu memotong material yang keras sekalipun.



Gambar 2.1 Klasifikasi proses pemesinan EDM (Pandey, 1980)

Secara garis besar proses permesinan EDM dapat dijelaskan dari diagram diatas. Dimana dari diagram diatas proses *wirecut* termasuk dalam klasifikasi EDM sebagai proses pemotongan.

Beberapa keunggulan dari proses permesinan EDM adalah sebagai berikut (Wanda Saputra, dkk) :

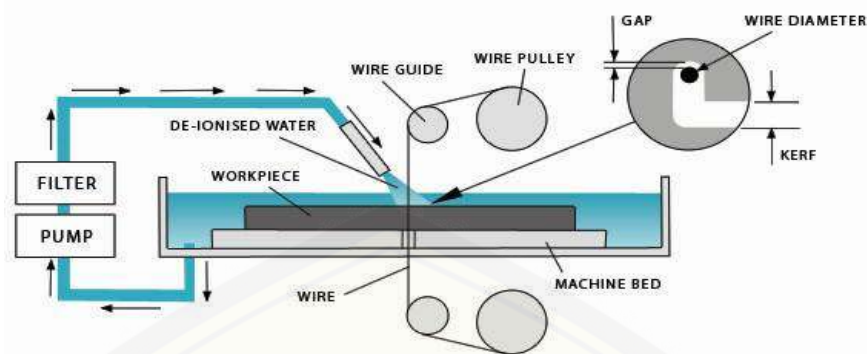
1. Dapat membuat bentuk kompleks yang kemungkinan sukar dilakukan dengan mesin konvensional.
2. Dapat mengerjakan material benda kerja yang keras dengan tingkat kepresisian tinggi.
3. Dapat mengerjakan bagian bentuk yang sangat kecil sekalipun, tanpa cemas bagian tersebut ikut terpotong.
4. Tidak ada kontak langsung antara alat dan benda kerja sehingga tidak timbul distorsi pada pemakanan.
5. Dapat membuat kehalusan permukaan benda kerja dengan baik.

6. Lubang dapat dibuat secara mudah, tepat dan baik.

2.2 Wirecut (Wire - EDM)

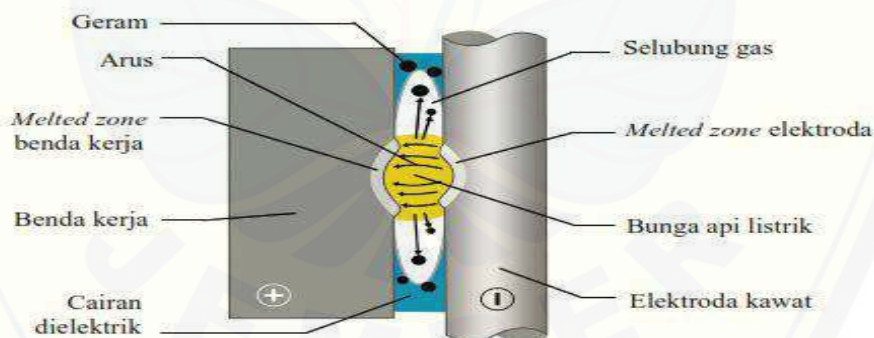
Pada mesin dengan menggunakan kabel listrik (*Wire Electrical Discharge Machining/ WEDM*), atau *wire-cut EDM*, sebuah kabel logam biasanya terbuat dari kuningan, dihubungkan ke logam yang di olah. Kabel yang berasal dari cekam diletakkan diantara *guide* atas dan bawah. *Guidenya* berpindah pada garis xy. Biasanya ini akan menjadi *CNC* dan hampir semua modern, *upper guide*-nya dapat juga berpindah dan menaikkan kemampuan mesin dalam pemotongan arus dan transisi (lingkaran pada bagian bawah dan persegi pada bagian atas). Hal ini memungkinkan arus *EDM* untuk diprogram untuk memotong arus yang tak beraturan dan juga yang beraturan. *Wire-cut* menggunakan air sebagai pengantar arusnya dengan penghambat air dan partikel-partikel elektrik lain yang dikontrol oleh penyaring (*filters*) dan unit *de-ionizer* (Wirawan, 2008).

Proses pemesinan WEDM pada dasarnya sama dengan proses pemesinan EDM, tetapi proses WEDM menggunakan elektroda berupa kawat dengan ukuran diameter tertentu. Pada umumnya, kawat elektroda dihubungkan pada kutub negatif dan benda kerja dihubungkan pada kutub positif. Pada WEDM, proses pemotongan benda kerja dilakukan oleh sejumlah loncatan bunga api listrik yang terjadi diantara celah benda kerja dan kawat elektroda. Bunga api listrik akan meloncat dari kawat elektroda yang merupakan kutub negatif menuju benda kerja yang merupakan kutub positif. Bunga api listrik tersebut terjadi secara periodik terhadap waktu. Prinsip dasar proses WEDM ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 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 tidak ada arus listrik yang mengalir. 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 2.3.

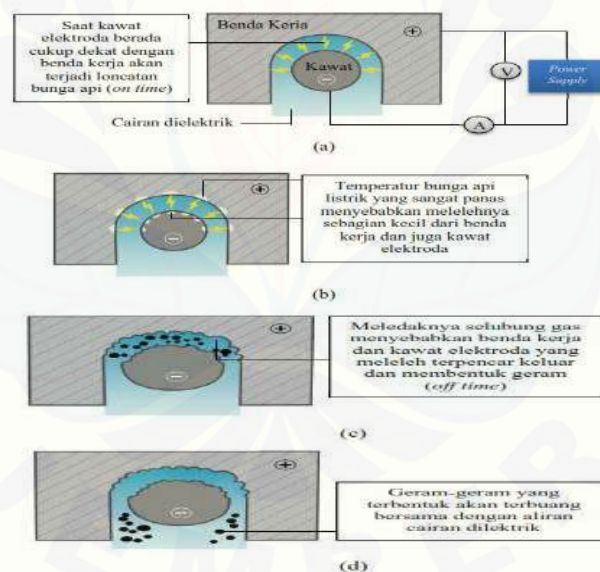


Gambar 2.3 Proses pembentukan bunga api pada WEDM (Kunieda dkk., 2005)

2.2.1 Prinsip Kerja Wire-EDM

Proses pemotongan pada *wirecut* dapat diuraikan sebagai berikut, setiap loncatan bunga api listrik berenergi tinggi akan menumbuk benda kerja. Hal ini akan menyebabkan perubahan energi listrik menjadi energi panas, sehingga permukaan benda kerja dan elektroda kawat akan mengalami kenaikan suhu yang tinggi kurang lebih $8000\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $12000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Panas tersebut cukup untuk membuat benda

kerja maupun elektroda kawat meleleh dan mengakibatkan terjadinya penguapan. Penguapan tersebut akan menimbulkan gelembung udara yang akan terus menguap dan mengembang sesuai dengan kenaikan suhu yang terjadi. Pelelehan dan penguapan pada benda kerja jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan pelelehan maupun penguapan pada elektroda kawat. Setelah terjadi loncatan bunga api listrik, maka aliran listrik berhenti sesaat (*OFF Time period*), sehingga menyebabkan penurunan temperature secara signifikan yang disebabkan oleh cairan dielektrik. Hal ini menyebabkan lelehan material benda kerja maupun lelehan elektroda kawat membeku dengan cepat dan gelembung uap meledak, sehingga terpecah keluar dari permukaan dan meninggalkan bekas yang berupa kawah-kawah halus pada permukaan material. Hasil pembekuan tadi dibawa keluar oleh cairan dielektrik. Secara sederhana pemotongan pada proses *wire-EDM* diilustrasikan oleh gambar 2.4



Gambar 2.4 a) proses loncatan bunga api dari kawat elektroda ke benda kerja pada saat *on time*, b) proses pelelehan benda kerja dan elektroda akibat temperatur bunga api, c) proses terbentuknya geram pada saat *off time*, d) proses pembuangan geram oleh cairan dielektrik (sommer dan sommer.,2005)

2.2.2 Bagian-Bagian Wire-EDM

Bagian-bagian dari *Wire-EDM* terdiri dari 4 komponen utama yaitu (Dian Kurniasih, 2009) :

1) *Servomekanism*

Servomekanism dari *WEDM* berfungsi untuk mengatur tingkat arus yang digunakan dalam pemotongan, kecepatan motor penggerak meja benda kerja, kecepatan kawat dan secara otomatis mengatur jarak antara kawat dan benda kerja agar jarak tersebut konstan selama proses permesinan berlangsung, sehingga kawat tidak menyentuh benda kerja, hal ini sangat penting, karena apabila kawat menyentuh benda kerja akan terjadi hubungan singkat yang dapat menyebabkan kerusakan terhadap benda kerja dan kawat putus.

Penentuan level dari kecepatan motor penggerak, kecepatan kawat, jarak antara kawat dan benda kerja yang tepat (presisi) sangat menentukan keberhasilan suatu proses permesinan. Jika jarak antara kawat dan benda kerja terlalu lebar, maka cairan dielektrik tidak dapat berubah menjadi gas dan bunga api tidak mencapai benda kerja sehingga terjadi proses pemakanan material, jika jaraknya terlalu sempit, kawat dapat menyentuh benda kerja menyebabkan hubungan singkat dan kawat putus.

2) *The electric fluid*

Cairan dielektrik yang biasa digunakan adalah *deionized water*. Kadar ionisasi air memerlukan tingkat hambatan dari cairan dielektrik. Dalam kebanyakan proses, semakin rendah tingkat hambatan dari cairan dielektrik semakin cepat proses pemotongan material benda kerja, tetapi bagaimanapun juga, tingkat hambatan dari cairan dielektrik sebaiknya relatif tinggi apabila benda kerja yang dipotong terbuat dari bahan karbida atau grafit. Cairan dielektrik memiliki beberapa fungsi :

1. Menghubungkan bunga api dari kawat ke benda kerja.
2. Sebagai isolator (penyekat) antara kawat dan benda kerja.
3. Membilas partikel yang dihasilkan proses pemakanan material dari celah antara kawat dan benda kerja agar terhindar dari hubungan singkat.
4. Sebagai pendingin untuk kawat dan benda kerja.

3) *Electrode (Wire)*

Elektroda dalam hal ini merupakan kawat secara kontinu bergerak tergulung dari gulungan penyuplai ke gulungan penarik, sehingga kawat yang berada di depan area benda kerja yang akan di potong selalu baru. Dengan sistem gerakan kawat ini, tingkat kecepatan potong akan menjadi tinggi. Ketahanan kawat dan tingkat kecepatan pemakanan material tergantung faktor-faktor seperti sifat kelistrikan, konduktifitas panas kawat dan material, titik leleh, selang waktu dan tingkat energi pulsa yang di berikan. Oleh karena itu material dari elektroda sebaiknya memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. Memiliki konduktor yang baik.
2. Memiliki titik leleh yang tinggi.
3. Memiliki kekuatan tarik yang tinggi.
4. Memiliki konduktifitas panas tinggi.
5. Dapat menghasilkan pemakanan material yang efisien.
6. *Machine Control Unit*

Machine Control Unit dibagi 3 yaitu :

- a) Panel kontrol untuk mengatur kondisi pemotongan (*Servo Mechanism*).
- b) Panel kontrol untuk mengatur perintah-perintah pemotongan agar menghasilkan bentuk produk sesuai dengan yang diinginkan.
- c) Panel kontrol untuk memasukkan data secara manual dan sebuah layar monitor.

2.2.3 Parameter Proses *Wire-EDM*

Parameter-parameter pada proses pemesian WEDM menurut *Instruction Manual Book Wirecut EDM DK 7740* adalah sebagai berikut :

1) *Open voltage* (OV)

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

2) *Low power* (LP)

Low power merupakan variabel yang mengatur jenis sumber energi pemotongan (AC atau DC) dan besarnya energi tersebut.

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

On time adalah waktu terjadinya loncatan bunga api berlangsung, sedangkan *off time* adalah jeda waktu antara loncatan bunga api. Pada saat *off time* tidak terjadi loncatan bunga api sehingga memungkinkan terjadinya pembilasan geram oleh cairan dielektrik. Nilai *off time* yang rendah dapat mempercepat proses pemotongan tetapi dapat menyebabkan kawat elektroda putus.

4) *Arc on time* (AN) dan *arc off time* (AFF)

Arc on time adalah variabel yang mengatur besarnya arus tambahan, sedangkan *arc off time* adalah variabel yang mengatur frekuensi arus tambahan tersebut.

5) *Servo voltage* (SV)

Servo voltage adalah variabel yang digunakan untuk menentukan respon kecepatan pemakanan sesuai dengan kondisi pemotongan. Semakin kecil SV semakin cepat proses pemotongan tetapi *gap* akan semakin kecil yang dapat menyebabkan *short circuit*. Dengan kata lain SV berfungsi untuk menjaga seberapa besar *gap* agar tidak terjadi *short circuit*.

6) *Electric current (A)*

Electric current adalah faktor yang digunakan untuk mengatur besar arus listrik.

7) *Wire speed (Ws)*

Wire feed adalah variabel yang digunakan untuk mengatur kecepatan kawat elektroda.

8) *Wire tension (WT)*

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

9) *Water flow (WL)*

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

10) *Variabel frequency*

Variabel frequency adalah variabel yang digunakan untuk mengatur kecepatan putar dan kecepatan gerak meja penahan benda kerja.

11) *Interpulse*

Interpulse adalah variabel yang digunakan untuk mengatur lama jeda waktu saat mengatur loncatan bunga api.

12) *Pulse width*

Pulse width adalah variabel untuk mengatur lebar pulsa atau lebar kawah dalam pemotongan *Wire EDM*.

2.2.4 Jenis-Jenis Kawat Elektroda

Pemilihan jenis kawat pada dasarnya tergantung pada sifat fisis dan mekanis dari benda kerja. Kawat elektroda 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*

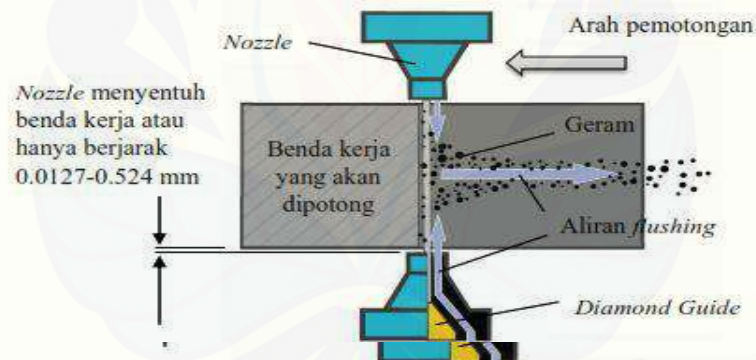
Zinc coated brass wire adalah kawat yang terbuat dari kuningan dan dilapisi oleh seng (Zn). Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan dengan kecepatan pemotongan yang tinggi dan benda kerja yang tebal.

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.

2.2.5 Metode *Flushing* (Pembilasan Geram)

Pembilasan geram (*flushing*) adalah pembuangan geram yang dihasilkan saat proses pemesinan pada WEDM. Proses ini dilakukan oleh cairan dielektrik yang mengalir dari dua buah *nozzle* atau lebih yang berada di bagian atas dan bawah benda kerja. Pembilasan geram yang tidak sempurna akan menyebabkan terjadinya penimbunan geram yang dihasilkan. Penimbunan geram tersebut akan menyebabkan loncatan bunga api menjadi tidak teratur sehingga dapat menyebabkan kawat elektroda putus. Proses *flushing* pada pemesinan WEDM ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 proses *flushing* pada pemesinan WEDM (port, 1922)

2.3 Material Baja SLD

Merupakan baja unggulan dengan kadar karbon tinggi dan *khromium* tinggi, kekerasan tinggi 57 - 63 Hrc. Merupakan salah satu dari *Hitachi YSS Cold Work Tool Steels* yang merupakan *Cold work die steel* dengan ketahanan abrasi yang tinggi, memiliki tingkat kekerasan yang sangat baik. Aplikasi untuk *Cold work dies, Forming roll* atau *Shear blade*. Berikut adalah kelebihan baja SLD :

- a. Ketahanan aus yang tinggi
- b. Kekuatan tekan tinggi
- c. Sifat pengerasan yang baik
- d. Stabilitas tinggi dalam pengerasan
- e. Resistensi yang baik terhadap temper-back

Tabel 2.1 Komposisi kimia baja SLD

Grade				Chemical composition (%)							
YSS	JIS equivalent	AISI	DIN WNr.	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Co
SLD	SKD 11	D2	1.2379	1.5	0.3	0.4	12.0	-	0.9	0.3	-

2.4 Material Removal Rate (MRR)

Material Removal Rate (MRR) atau biasa disebut sebagai laju pembuangan material adalah jumlah material yang dikeluarkan dari benda kerja per satuan waktu (geram). Tingkat pembuangan material dapat dihitung dari volume pembuangan material atau bisa juga dari perbedaan jumlah berat sebelum dan sesudah proses permesinan. Hal ini merupakan indikasi seberapa cepat atau lambat laju permesinan dan parameter kinerja penting dalam proses *wire* – EDM, karena biasanya adalah proses yang lambat. Produktivitas permesinan yang lebih tinggi juga harus dicapai dengan akurasi dan kekasaran permukaan yang diinginkan. MRR sangat tergantung pada parameter proses. Nilai tegangan yang lebih tinggi, arus puncak, durasi pulsa, kecepatan kawat, siklus kerja, dan nilai interval pulsa yang lebih rendah dapat juga menghasilkan MRR yang lebih tinggi. Selain parameter listrik ini, parameter non elektrik dan sifat material lainnya memiliki pengaruh signifikan terhadap MRR.

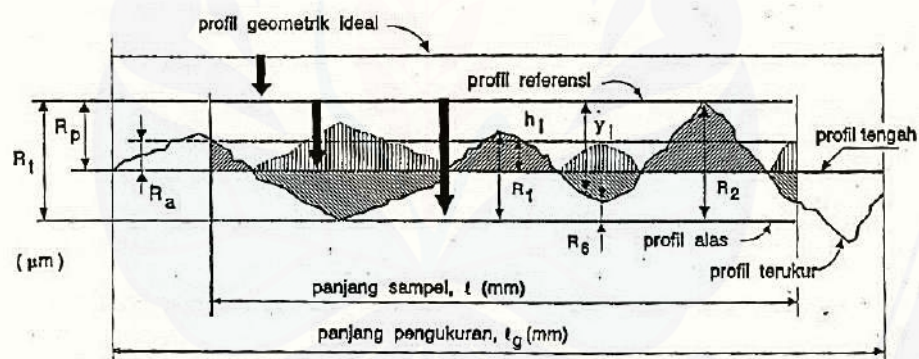
2.5 Kekasaran Permukaan

Karakteristik suatu permukaan memegang peranan penting dalam perancangan komponen mesin/ peralatan. Banyak hal yang di mana karakteristik permukaan perlu dinyatakan dengan jelas misalnya dalam kaitannya dengan gesekan, keausan, pelumasan, tahanan kelelahan, perekatan dua atau lebih komponen-komponen mesin, dan sebagainya.

Setiap proses pengerjaan mempunyai ciri tertentu/ khas atas permukaan benda kerja yang dihasilkannya. Oleh karena itu, dalam memilih proses pengerjaan

aspek permukaan ini perlu dipertimbangkan. Pada dasarnya konfigurasi suatu permukaan sangatlah kompleks. Karena terjadinya berbagai penyimpangan selama proses pembuatan maka permukaan geometrik ideal (*ideal geometric surface*), yaitu permukaan yang dianggap mempunyai bentuk yang sempurna tidaklah dapat dibuat.

Untuk memproduksi profil suatu permukaan, maka sensor/ peraba (*stylus*) alat ukur harus digerakkan mengikuti lintasan yang berupa garis lurus dengan jarak yang telah ditentukan terlebih dahulu. Panjang lintasan ini disebut dengan panjang pengukuran (*traversing length, l_g*). Sesaat setelah jarum jam bergerak dan sesaat sebelum jarum berhenti secara elektronik alat ukur melakukan perhitungan berdasarkan data yang dideteksi oleh jarum peraba. Bagian panjang pengukuran dimana dilakukan analisis profil permukaan disebut dengan panjang sampel (*sampling length, l*). Reproduksi profil sesungguhnya adalah seperti yang ditunjukkan Gambar 2.6 (Rochim, 2007).



Gambar 2.6 Profil kekasaran permukaan

Pada gambar 2.8 terdapat beberapa istilah yang berhubungan yaitu :

R_t : Kekasaran total (*peak to valley height / total height*) adalah pengukuran yang diambil dari jarak antara profil referensi dengan profil alas.

R_p : Kekasaran perataan (*depth of surface smoothness / peak to mean line*) adalah pengukuran dari jarak rata-rata antara profil referensi ke profil terukur.

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

Ra : Kekasaran aritmatik (*mean roughness index / center line average*) adalah harga rata-rata aritmatik yang nilai pengukuran *absolutenya* berdasarkan jarak antara profil terukur dengan profil tengah.

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} [h_i] dx \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Rq : Kekasaran rata-rata kuadrat (*root mean square height*) adalah hasil dari pengukuran akar bagi jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} h_i^2 dx} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

Rz : Kekasaran total rata-rata adalah hasil pengukuran dari jarak rata-rata profil alas ke profil terukur di lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil terukur di lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil alas ke profil terukur di lima lembah terendah.

$$R_z = \sum[R_1 + R_2 + \dots + R_5 - R_6 - \dots - R_{10}]/5 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Untuk memeriksa kekasaran permukaan yang tepat diperlukan ketrampilan dari tenaga ahli, disamping peralatan yang memadai. Menurut ASTM D4417 untuk mengukur kekasaran permukaan dapat dipakai alat pembanding kekasaran permukaan seperti *Surface Profile Comparator*, *Surface Profile Depth Gage*, dan *Replica Tape*.

Ketentuan persiapan permukaan material dapat mengacu pada standar yang sudah ada, misalnya *NACE International*, *SSPC*, *ISO*, *British Standards Institute (BSI)*, *ASTM*, dan *Swedish Standard SS 05.59.00-1988*. Standar acuan karat yang digunakan yaitu : *Standard International ISO 8501-1 "Visual Assesment of Surface Cleanliness"*. Ada empat tingkat karat yang diberikan oleh *standard* ini, antara lain :

1. *Rust Grade A* : Permukaan besi tertutupi *mill scale* dan sedikit karat.
2. *Rust Grade B* : Permukaan besi sudah mulai berkarat dan beberapa bagian *mill scale* sudah mulai mengelupas.

3. *Rust Grade C* : *mill scale* sudah berkarat dan terdapat beberapa bagian sedikit titik-titik karat pada permukaan dasar dari besi.

4. *Rust Grade D* : *mill scale* sudah berkarat dan terdapat karat diatas permukaan dasar besi yang dapat dilihat dengan penglihatan normal.

ISO 8501-1 hanya digunakan pada besi baru yang belum pernah dilakukan perlakuan *coating/ painting*. Namun, pada besi yang sudah pernah dilakukan *coating* sebelumnya dan lapisan *coating* tersebut sudah rusak, biasanya akan termasuk dan *Rust Grade C* atau *D*. Untuk tingkat kebersihan permukaan dengan menggunakan ISO 8501-1 dibedakan menjadi :

1. *Brush Off Cleaning/ Sa 1* (SSPC SP-7)

Sa 1 ini merupakan tingkat kebersihan permukaan material paling jelek, yang mana karat-karat pada material masih tetap ada. Untuk proses aplikasi (*painting*), standar Sa 1 tidak diperbolehkan melakukan aplikasi.

2. *Commercial Cleaning/ Sa 2* (SSPC SP-6)

Sa 2 ini merupakan tingkat kebersihan permukaan material yang sedikit lebih baik dari Sa 1, tetapi tingkat ini masih tidak diperbolehkan proses aplikasi, karena masih ada sedikit sisa-sisa karat.

3. *Near White Metal Cleaning/ Sa 2,5* (SSPC SP-10)

Sa 2,5 ini merupakan tingkat kebersihan permukaan material yang sudah diperbolehkan untuk proses aplikasi. Hasil kebersihan Sa 2,5 ini berwarna mendekati putih.

4. *White Metal Cleaning/ Sa 3* (SSPC SP-5)

Sa 3 ini merupakan tingkat kebersihan yang paling baik. Untuk mendapatkan Sa 3 ini biasanya harganya sangat mahal, karena terlalu sulit untuk mencapainya.

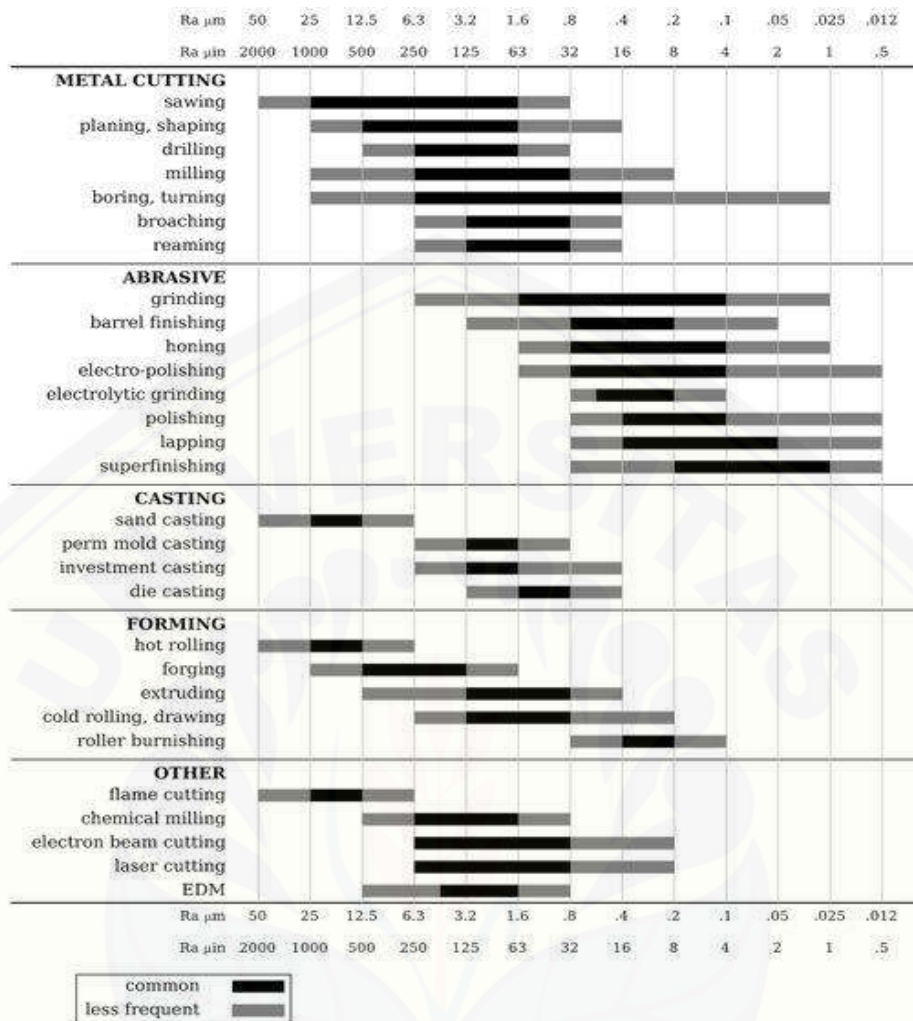
Untuk standar internasional (ISO R468) dan *American Standards Association* (ASA B46,1 – 1962), yang membahas kekasaran permukaan seperti tinggi, lebar, dan arah pola permukaan.

Tabel 2.2 Toleransi harga kekasaran rata – rata Ra

Kelas kekasaran	Harga C.L.A (μm)	Harga Ra (μm)	Toleransi $N_{-25\%}^{+50\%}$	Panjang sampel (mm)
N1	1	0,0025	0,02 – 0,04	0,08
N2	2	0,05	0,04 – 0,08	
N3	4	0,0	0,08 – 0,15	0,25
N4	8	0,2	0,15 – 0,3	
N5	16	0,4	0,3 – 0,6	
N6	32	0,8	0,6 – 1,2	
N7	63	1,6	1,2 – 2,4	
N8	125	3,2	2,4 – 4,8	0,8
N9	250	6,3	4,8 – 9,6	
N10	500	12,5	9,6 – 18,75	2,5
N11	1000	25,0	18,75 – 37,5	
N12	2000	50,0	37,5 – 75,0	8

(Sumber : ISO – 1302, 2001)

Nilai kekasaran (ISO Number) ditunjukkan untuk meminimalisir kemungkinan terjadinya kesalahan interpretasi atas satuan harga kekasaran permukaan. Oleh karena itu dianjurkan menggunakan panjang sampel tertentu sesuai dengan tingkat kekasaran ISO sebagaimana ditunjukkan tabel 2.2 diatas. Pengerjaan proses permesinan dapat mencapai beberapa contoh nilai kekasaran sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Nilai kekasaran beberapa proses permesinan (Rochim, Dalam Yusron, 2014)

2.6 Desain Experimen

Desain eksperimen merupakan sebuah rancangan percobaan yang perlu diambil sebelum eksperimen dilakukan agar data yang diperlukan dapat dicapai sehingga membawa pada analisis objektif dan kesimpulan yang berlaku untuk suatu masalah yang sedang dibahas. Tujuan dari desain eksperimen adalah untuk mendapatkan dan mengumpulkan informasi yang diperlukan sebanyak-banyaknya dan berguna dalam melakukan penelitian (Sudjana, 1994).

2.6.1 Prinsip dasar desain eksperimen

Untuk memahami seberapa jauh suatu proses yang optimum dipengaruhi oleh sejumlah variabel, sering diperlukan data-data percobaan dalam jumlah besar dan membutuhkan waktu lama, yang secara otomatis juga akan memerlukan biaya dalam jumlah yang besar. Beberapa teknik statistika dan matematika sering dipakai untuk melakukan pendekatan guna memperoleh pemahaman terhadap kondisi optimum dari suatu proses, tanpa memerlukan data yang terlampau banyak. Diantara metode yang sering dipakai adalah metode permukaan respon. Metode permukaan respon (*Response Surface Methodology*) merupakan sekumpulan teknik matematika dan statistika yang berguna untuk menganalisis permasalahan dimana beberapa variabel independen mempengaruhi variabel respon dan tujuan akhirnya adalah untuk mengoptimalkan respon. Ide dasar metode ini adalah memanfaatkan desain eksperimen berbantuan statistika untuk mencari nilai optimal dari suatu respon (Nuryanti, 2008)

Metode ini pertama kali diajukan sejak tahun 1951 dan sampai saat ini telah banyak dimanfaatkan baik dalam dunia penelitian maupun aplikasi industri. Misalnya, dengan menyusun suatu model matematika, peneliti dapat mengetahui nilai variabel-variabel independen yang menyebabkan nilai variabel respon menjadi optimal. (Nuryanti, 2008)

Prinsip dasar dalam melakukan desain eksperimen ada 3, yaitu :

1. Replikasi

Prinsip pertama adalah replikasi atau perlakuan yang sama pada unit yang berbeda. Fungsi dari replikasi adalah untuk mengetahui kesalahan pengukuran variabilitas alami. Dengan melakukan replikasi, berkemungkinan memperoleh nilai taksiran pengaruh yang lebih tepat. Replikasi memiliki 2 properti penting, yaitu (Sulistiyanto, 2016).

Pertama, penyimpangan taksiran, merupakan unit pengukuran dasar untuk menentukan waktu terjadi perbedaan pengamatan dalam data secara statistik yang berbeda secara nyata. Kedua rata-rata sampel yang digunakan untuk menaksir pengaruh suatu faktor dalam eksperimen.

2. Randomisasi

Dalam eksperimen harus memberikan perlakuan acak pada unit-unit. Karena metode statistik mengharapkan bahwa pengamatan atau *error* adalah variabel independen, random, dan berdistribusi tertentu.

3. Kontrol Lokal

Maksudnya sembaran metode yang dapat menjelaskan dan mengurangi variabilitas alami. prinsip ini melakukan pengelompokan satuan unit eksperimen yang mirip ke dalam kelompok tertentu yang bertujuan untuk meningkatkan ketepatan data eksperimen(Sulistiyanto, 2016).

2.7 Metode *Response Surface*

Metode *response surface* atau biasa disebut RSM (*response surface methodology*) adalah teknik matematika dan statistik yang berguna untuk memodelkan dan menganalisis data dimana respon yang diteliti dipengaruhi oleh beberapa variabel yang tujuannya ialah untuk mengoptimalkan respon. Kebanyakan dalam metode RSM, eksperimen dilakukan dalam dua tahap, yaitu eksperimen orde I (model regresi linier berganda) yang merupakan tahap penjarangan faktor dan eksperimen orde II (model regresi kuadrat berganda) yaitu tahap optimasi. Dalam penggunaan metode RSM terdapat dua desain yang dapat digunakan, yaitu (Montgomery, 1997):

1. *Central Composite Design*

Merupakan desain yang direkomendasikan untuk eksperimen sekuensial atau perencanaan desain yang dilakukan secara berulang. Untuk desain dengan jumlah faktor yang sama, jumlah eksperimen yang dilaksanakan lebih banyak dibanding dengan *box-behen design*.

Tabel 2.3 Tabel CCD (*Central Composite Design*) (Faulina, 2011)

	Jumlah Variabel, K				
	2	3	4	5	6
n_f (untuk 2 atau 2^k p	4	8	16	32	64
Banyaknya titik aksial = $2k$	4	6	8	10	12
$\alpha=(nf)1/4$	1.414	1.628	2.000	2.378	2.828
Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
Total	8+ Nc	14+ Nc	24+Nc	42+ Nc	76+ Nc

2. *Box-Behnken Design*

Merupakan perencanaan desain yang digunakan untuk desain eksperimen yang tidak sekuensial yang hanya merencanakan untuk satu kali eksperimen. Untuk desain dengan jumlah faktor yang sama, jumlah eksperimen yang dilaksanakan lebih sedikit dibandingkan dengan *Central Composite design*.

Tabel 2.4 Rancangan Percobaan *Box-Behnken Design* dengan $k=3$ (Kristiyantoro, 2009)

No	X1	X2	X3
1	0	1	1
2	0	-1	1
3	-1	0	-1
4	0	1	-1
5	-1	0	1
6	-1	1	0
7	1	1	0
8	0	-1	-1
9	0	0	0
10	1	0	1
11	0	0	0
12	0	0	0
13	1	0	-1
14	1	-1	0
15	-1	-1	0

Tahap pertama dalam metode permukaan respon adalah mencari fungsi antara variabel respon dan variabel bebas yang tepat. Untuk mengetahui hubungan tersebut biasanya di buat model regresi. Untuk memilih model yang paling sesuai

biasanya diperiksa apakah model antar variabel adalah model linier (model orde satu) atau model polinomial.

2.7.1 Experimen orde 1

Metode respon *surface* model orde pertama (linier) adalah suatu bentuk hubungan yang masuk akal antara respon y dan variabel x_i melalui persamaan polinomial orde 1. Variabel – variabel bebas dianotasikan dengan x_1, x_2, \dots, x_k . Variabel - variabel tersebut mempengaruhi variabel respon yang diasumsikan sebagai variabel random. Rancangan permukaan respon orde pertama yang digunakan adalah rancangan factorial 2^k . Secara umum persamaan dari model orde pertama dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana β_0 adalah intersep dan β_1 adalah kemiringan yang hubunganya di gambarkan di diagram di bawah :



Gambar 2.8 Hubungan linier

Model orde pertama yang menggambarkan hubungan tersebut adalah :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana ini adalah model *multiple linier regression* dengan dua variabel independen, biasa disebut variabel independen, variabel prediktor atau regresi.

Variabel respon y mungkin terkait dengan variabel regresi k . Modelnya sebagai berikut :

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \dots\dots\dots(2.7)$$

- Dimana :
- Y = Variabel Respon
 - b_0 = Koefisien konstan
 - b_1 = Koefisien parameter model
 - X_1 = Nilai variabel bebas
 - b_k = Koefisien parameter
 - X_k = Variabel bebas
 - e = Residual dengan asumsi IIDN $(0, \sigma^2)$

Disebut variabel regresi linier berganda dengan variabel regresi k . Parameter β_j , dimana $j = 0, 1, \dots, k$ yang disebut koefisien regresi. Model ini menggambarkan *hyperplane* dalam ruang dimensi k dari variabel regresi $\{x_j\}$. Parameter β_j mewakili perubahan yang diharapkan dalam respon y per perubahan unit dalam x_j ketika semua variabel independen yang tersisa x_i ($i \neq j$) dipertahankan konstan.

Model yang lebih kompleks dalam penampilan daripada persamaan diatas mungkin masih sering dianalisis dengan teknik regresi linier berganda. Mempertimbangkan menambah istilah interaksi ke model orde pertama dalam dua variabel, bisa dijelaskan :

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \dots\dots\dots(2.8)$$

Jika kita membiarkan $x_3 = x_1x_2$ dan $\beta_3 = \beta_{12}$ maka persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut :

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \varepsilon \dots\dots\dots(2.9)$$

Yang merupakan model linier berganda dengan tiga regresi. Untuk pendugaan orde pertama adalah :

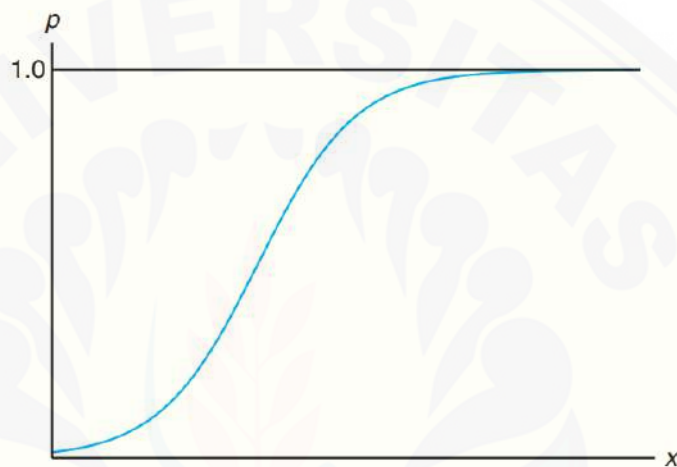
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \dots\dots\dots(2.10)$$

- Dimana :
- Y = Nilai pendugaan
 - β_0 = Konstanta
 - β_i = Koefisien Parameter

X_i = Variabel bebas

2.7.2 Experimen orde ke 2

Pada keadaan mendekati respon, model orde kedua (non linier) lebih biasanya disyaratkan untuk mengaproksimasi respon karena adanya lengkungan (*curvature*) dalam permukaannya. Selain itu juga mengungkapkan bentuk -S dengan fungsi mendekati $P = 1,0$. dalam hal ini $\beta_1 > 0$, dengan demikian tidak akan pernah mengalami probabilitas yang diperkirakan melebihi 1,0.



Gambar 2.9 Hubungan non linier

Untuk persamaan model orde kedua ditunjukkan oleh persamaan berikut (Montgomery,1997):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \dots\dots\dots(2.11)$$

Penduga untuk persamaan model orde kedua sebagai berikut (Montgomery,1997):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \dots\dots\dots(2.12)$$

Jika $k=3$ penduga orde kedua menjadi (Montgomery,1997):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

X_i = Variabel bebas, $i = 1, 2, 3, \dots, k$

b_0 = Konstanta

b_1 = Koefisien parameter model

Model orde ke 2 dibangun dengan menggunakan rancangan komposit pusat (*Central Composit Desain*) untuk membentuk data percobaan. Secara umum rancangan komposit pusat didefinisikan sebagai suatu rancangan faktorial 2^k ditambah dengan 2^k titik – titik sumbu $(\pm a, 0, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm a, 0, \dots, 0)$, \dots , $(0, 0, 0, \dots, \pm a)$, serta n_0 titik pusat $(0, 0, \dots, 0)$ (Ariyanto, 2014: 11). Rancangan komposit pusat adalah rancangan faktorial ordo pertama (2^k) yang diperluas melalui penambahan titik pengamatan pada pusat agar memungkinkan pendugaan koefisien parameter permukaan respon orde kedua (Gasperz, 1991). Rancangan faktorial untuk sebagai contoh disajikan pada Tabel 2.4 dan rancangan komposit pusat dengan dua sampai dengan lima faktor disajikan pada Tabel 2.5 berikut (Raymond et al., 2008: 156).

Tabel 2.5 Rancangan faktorial pada percobaan faktorial 2^k

Perlakuan	A	B	C	Simbol
1	-	-	-	(1)
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

Tabel 2.6 Rancangan komposit pusat

Sifat Rancangan	Banyak Faktor (k)			
	2	3	4	5
Rancangan Faktorial	2^2	2^3	2^4	2^5
a untuk rancangan dapat-putar ($2^{k/4}$)	1.414	1.682	2.000	2.378
n_0	5	6	7	10

2.8 Analisis statistik

Analisis metode permukaan respon menggunakan teknik perhitungan *ordinary least square* untuk mendapatkan nilai duga koefisien parameter regresi. Nilai duga harus memenuhi beberapa asumsi agar dapat diterima atau sah. Dengan OLS, kesalahan nilai duga sangat kecil dan merupakan yang terbaik. Asumsi ini biasa disebut dengan asumsi klasik, yaitu: Normalitas, autokorelasi (independen), heteroskedastisitas, dan multikolinieritas. Pengujian asumsi klasik menggunakan data residual kecuali multikolinieritas, residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ (Sulistiyanto, 2016).

Tabel 2.7 ANOVA untuk uji signifikansi regresi desain eksperimen.

Sumber Variasi	db	Jumlah Kuadrat	Rata-rata Kuadrat	F _{rasio}
Regresi	k	$SS_R = b'X'Y - n\bar{Y}^2$	$MS_R = \frac{SS_R}{k}$	$\frac{MS_R}{MS_E}$
Residual	$n - k - 1$	$SS_E = Y'Y - b'X'Y$	$MS_E = \frac{SS_E}{(n - k - 1)}$	
Lack of fit	$n - k - 1$ $- n_e$	$SS_{LOF} = SS_E - SS_{PE}$	$MS_{LOF} = \frac{SS_{LOF}}{(n - k - 1 - n_e)}$	$\frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}}$
Pure error	n_e	$SS_{PE} = \sum_{j=1}^m \sum_{u=1}^{n_j} (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2$	$MS_{PE} = \frac{SS_{PE}}{n_e}$	
Total	$n - 1$	$SS_T = Y'Y - n\bar{Y}^2$		

Variabel prediktor disebut juga variabel independen (bebas), yang berarti variabel prediktor tidak memiliki hubungan atau korelasi terkait satu sama lain (*intercorrelation*). Dengan kata lain, variabel prediktor ini tidak memiliki sifat multikolinieritas. Koefisien regresi diasumsikan *error* (ε) bersifat identik dan independen (IID) dan berdistribusi normal (normalitas) dengan rata-rata nol dengan varian tertentu ($0, \sigma^2$) atau tidak memiliki sifat heteroskedastisitas (varian konstan). Asumsi juga tidak memiliki ketergantungan diantara komponen *error* terhadap unsur waktu (*time series*). Untuk pemeriksaan asumsi apakah model terpenuhi atau tidak, dibawah ini terdapat pengertian beberapa uji untuk pemeriksaan asumsi klasik yaitu sebagai berikut (Sulistiyanto, 2016).

a. Koefisien Korelasi (r)

Koefisien korelasi menunjukkan kedekatan hubungan antara nilai X (prediktor) dan nilai Y (respon). Semakin mendekati angka 1 atau -1 nilai koefisien korelasinya maka semakin besar pengaruh X terhadap Y . Koefisien korelasi dilambangkan dengan r dan nilainya terletak antara $-1 < r < 1$. Jika $r < 0$ atau negatif maka semakin nilai R mendekati angka -1 semakin besar pula korelasinya. Artinya semakin besar nilai X menyebabkan nilai Y -nya semakin kecil. Sebaliknya jika nilai $r \leq 1$ atau positif maka semakin nilai r mendekati angka 1 maka korelasinya semakin besar atau semakin besar X menyebabkan semakin besar pula nilai Y .

b. Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien R -Sq (R -square, R^2), suatu nilai statistik yang menunjukkan koefisien determinasi, yaitu nilai yang menerangkan besarnya keragaman dalam peubah tak bebas (Y) yang dapat dijelaskan oleh peubah bebasnya (X). Dengan kata lain koefisien ini menunjukkan seberapa besar hubungan (*good of fit*) antara variabel prediktor secara serentak terhadap variabel respon (Supranto, 1996). Nilai ini umumnya dinyatakan dalam persen (%). Semakin besar nilai R^2 maka semakin besar pula pengaruh semua variabel X terhadap variabel Y . Model yang baik adalah model yang memiliki nilai R^2 yang tinggi mendekati 100% atau 1 (koefisien determinasi nilainya terletak antara $0 < R^2 < 1$) (Sulistiyanto, 2016).

c. Pengujian Adanya Penyimpangan (*Uji Lack of Fit*)

Lack of fit adalah model yang belum tepat atau tidak terdapat kecocokan antara data dengan model. Dalam menentukan ketepatan model diperlukan uji *lack of fit*. Tujuan pengujian *lack of fit* adalah untuk mengetahui kesesuaian model yang dihasilkan. Uji ini menggunakan *mean square lack of fit* dan *mean square pure error* dengan nilai distribusi F atau distribusi P.

Hipotesisnya :

H_0 = tidak ada *lack of fit* dalam model

H_1 = ada *lack of fit* dalam model

Uji statistik yang digunakan adalah (Sulistiyanto, 2016)

$$F_{rasio} \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Apabila $F_{rasio} > F_{(a;n-k-l-n_e;n_e)}$ atau $P_{value} > \alpha$ yang berarti tidak ada ketidaksesuaian (*lack of fit*) antara model yang diduga dengan model sebenarnya (Sulistiyanto, 2016)

d. Pengujian Parameter Serentak

Uji ini digunakan untuk mengetahui apakah koefisien dari model secara serentak (simultan) nyata atau tidak. Uji simultan berfungsi untuk mengetahui apakah antara variabel-variabel bebas X dan terikat Y signifikan, atau setidaknya ada salah satu dari variabel prediktor yang berpengaruh signifikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian parameter regresi secara serentak adalah sebagai berikut (Sulistiyanto, 2016):

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

$$H_1: \text{minimal ada satu } \beta_j \neq 0; j = 1, 2, \dots, k$$

Uji statistik yang digunakan (Sulistiyanto, 2016):

$$F_{hitung} = \frac{MS_R}{MS_E} = \frac{SS_R/k}{SS_R/(N-1-k)} \dots\dots\dots(2.13)$$

Daerah penolakan yaitu tolak H_0 pada tingkat signifikansi α apabila $F_{hitung} > F_{(a;k;n-1-k)}$ yang berarti secara statistik variabel-variabelnya bebas terhadap terjadinya perubahan pada variabel respon Y dalam model.

e. Pemeriksaan Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaanya $e_1 = Y_1 - \hat{Y}_1$. Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen) mempunyai *mean* nol dan varians konstan α_2 (identik) dan berdistribusi normal. Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi apakah model terpenuhi atau tidak. Dibawah ini terdapat beberapa uji untuk pemeriksaan asumsi yaitu sebagai berikut :

1) Uji Identik

Pengujian varian identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot e_1 terhadap \hat{Y}_1 (secara visual). Jika penyebaran datanya acak (menyebar di sekitar

garis nol) dan tidak menunjukkan pola – pola tertentu maka asumsi identik terpenuhi (Amrillah, 2006).

2) Uji Independen

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

3) Uji Distribusi Normal

Uji distribusi normal dilakukan untuk menguji apakah residual terdistribusi normal atau tidak dilakukan dengan menggunakan *normal probability plot* yang menyatakan probabilitas dari residual suatu respon. Jika plot membentuk garis lurus dari kiri bawah ke kanan atas menunjukkan residual berdistribusi normal (Amrillah, 2006). *Kolmogorov-smirnov normality test* merupakan salah satu pengujian kenormalan residual. Hipotesa yang digunakan adalah :

H_0 : residual yang berdistribusi normal.

H_1 : residual tidak berdistribusi normal.

Terima H_0 apabila $Pvalue > \alpha$.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian ini dilakukan di CV. Catur Prasetya Packindo. Sedangkan pengujian (MRR) *Material Removal Rate* dan kekasaran permukaan dilakukan di Laboratorium Desain dan Uji Bahan Fakultas Teknik Universitas Jember.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Mesin *Wire* - EDM

Mesin *wire* - EDM yang digunakan pada penelitian ini adalah DK7740 tipe 32GF seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, sedangkan spesifikasi mesin tersebut bisa dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Mesin *wire* – EDM DK7740

Tabel 3.1 Spesifikasi mesin – EDM DK7740

Item	Unit	DK7740
Ukuran meja kerja ($l \times w$)	<i>mm</i>	410 × 710
Cnc sumbu Stroke ($x \times y$)	<i>mm</i>	400 × 500
Max memotong ketebalan benda kerja	<i>mm</i>	400
Max pemotongan lancip		$\pm 6^\circ / 80$ mm
Max benda kerja berat	<i>kg</i>	450
Elektroda kawat diameter	<i>mm</i>	& phi ; 0.18
Posisi presisi	<i>mm</i>	0.02 (GB7926-2005)
Pengolahan presisi (memotong delapan - sudut prisma)	<i>mm</i>	0.015 (GB7926-2005)
Volume kerja kotak cair	<i>l</i>	50
Kekasaran permukaan mesin terbaik (beberapa <i>cutting</i>)	μm	Ra1.6
Max efisiensi pemotongan	<i>mm</i> 2/ <i>min</i>	120
Konsumsi daya		≤ 2 kw AC380V / 220 v 50 hz
Keseluruhan dimensi (<i>pxlxt</i>)	<i>mm</i>	1870 × 1350 × 1800
Dimensi keseluruhan dari lemari listrik (<i>pxlxt</i>)	<i>mm</i>	700 × 660 × 1850

b. Alat uji kekasaran

Material yang telah di potong akan diuji dengan TR220 *Portable Roughness Tester* seperti pada gambar 3.2 berikut ini :

Gambar 3.2 TR220 *Portable Roughness Tester*

(Sumber : Alat uji kekasaran Laboratorium Desain dan Uji Bahan Fakultas Teknik Universitas Jember)

Surface Roughness Tester merupakan alat pengukuran kekasaran permukaan. Setiap permukaan komponen dari suatu benda mempunyai beberapa bentuk yang bervariasi menurut strukturnya maupun dari hasil proses produksinya. Pengukuran kekasaran permukaan diperoleh dari sinyal pergerakan *stylus*

berbentuk diamond untuk bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan sebagai alat indikator pengukur kekasaran permukaan benda uji. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan menggunakan *transducer* dan diolah dengan mikroprocessor. *Roughness tester* dapat digunakan di lantai di setiap posisi, horizontal, vertikal atau di mana pun. Instrumen *roughness* meter ini kompatibel dengan empat standar dunia yaitu ISO (*International Organization for Standardization*), DIN (*Deutsches Institut Fur Normung*), ANSI (*American National Standards Institute*), dan JIS (*Japanese Industrial Standard*) sehingga tidak diragukan lagi dalam ketepatan dan keakuratan dalam pengukuran kekasaran.

Tabel 3.2 Spesifikasi TR220 *Portable Roughness Tester*

<i>Measurement Principle</i>	<i>Electromagnetic Indulance</i>
<i>Measurement Range</i>	160 μ m
<i>Angle of Stylus</i>	90 ⁰
<i>Length wise Radius of Skid</i>	45 mm
<i>Material of Stylus Point</i>	Diamond
<i>Max Driver Distance</i>	18 mm / 0,7 inch
<i>On Measuring :</i>	
<i>If Cutoff Equal to 0,25 mm</i>	<i>Vt Equal 0,13 mm/s</i>
<i>If Cutoff Equal to 0,8 mm</i>	<i>Vt Equal 0,5 mm/s</i>
<i>If Cutoff Equal to 2,5 mm</i>	<i>Vt Equal 0,1 mm/s</i>
<i>On Returning</i>	<i>V = 1 mm/s</i>

(Sumber : *Surface Roughness Tester Specifications* : Alat Uji)

c. 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.

d. Mistar insut

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

e. Meja rata

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

f. *Stopwatch*

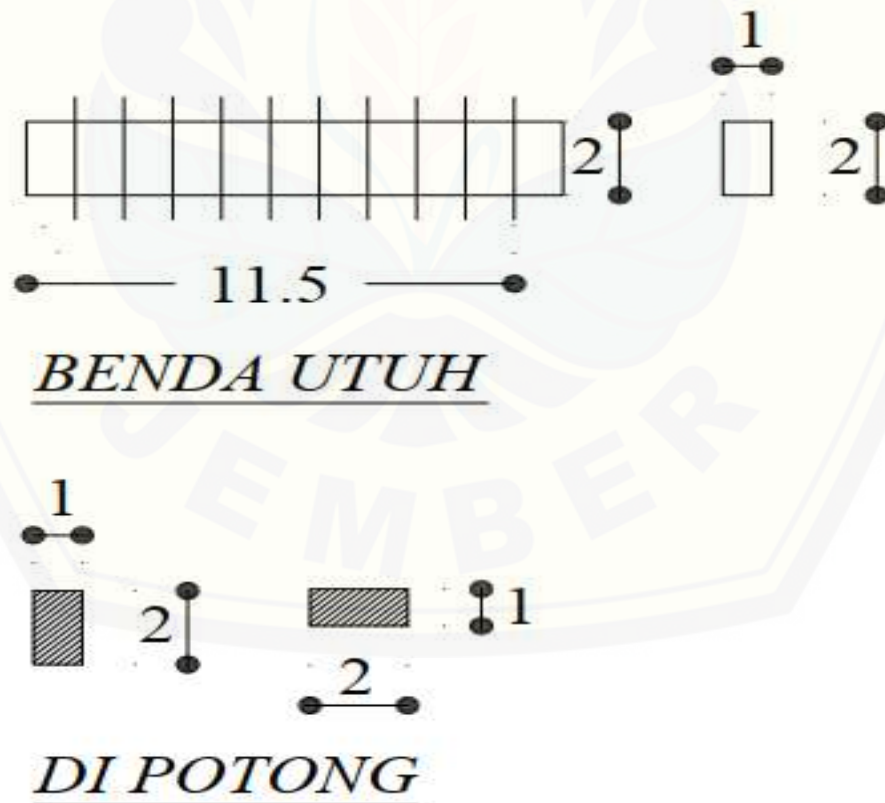
Alat ini digunakan untuk mengukur waktu pemotongan benda kerja pada saat melakukan percobaan.

3.2.2 Bahan

Bahan yang akan digunakan untuk penelitian ini mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

a. Benda kerja

Bahan yang digunakan adalah baja SLD yang telah mengalami perlakuan panas. Panjang benda kerja adalah sebesar 115 cm, lebar 2 cm dan tebal 1 cm.



Gambar 3.3 Skema proses pemotongan benda kerja.

b. Kawat elektroda

Kawat elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah kawat jenis *molybdenum* $\emptyset 0,18$

3.3 Rancangan Percobaan

3.3.1 Menentukan Variabel Bebas dan Terikat

Pengaturan variabel-variabel pada mesin WEDM dilakukan dengan mengacu pada buku *Wire Cut Cutting Data Manual*. maka ditentukan variabel - variabel bebas yang diduga berpengaruh terhadap kinerja proses. Variabel-variabel bebas yang diteliti adalah *wire speed*, *electric current*, dan arus. Variabel - variabel bebas tersebut divariasikan untuk mengetahui interval dimana pengaruhnya terhadap variabel terikat cukup signifikan. Sedangkan variabel terikat yang diteliti adalah *Material Removal Rate* (MRR) dan kekasaran permukaan. Variabel – variabel lain yang diduga berpengaruh terhadap perubahan respon dikondisikan tetap. Penentuan level-level dari variabel-variabel bebas dilakukan dengan beberapa pertimbangan, antara lain:

- Nilai masing-masing level mengacu pada buku *wire cut cutting data manual* dan jurnal serta 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.

Berdasarkan pertimbangan di atas telah ditentukan nilai masing-masing level dari variabel-variabel bebas ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.2 Variabel bebas dan masing – masing level.

Variabel	Level			Unit
	Low	Medium	High	
<i>Wire speed</i>	5	6	7	mm/s
<i>Interpulse</i>	7	9	11	μ s
Arus	8	10	12	Amp

3.4 Pelaksanaan Percobaan

1. Membersihkan benda kerja dari kototan-kotoran yang bersifat isolator yang dapat 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 sesuai dengan program CNC yang telah dibuat.
4. Memasang kawat elektroda *mollybdenum* berdiameter 0,18 mm pada mesin WEDM.
5. Mengatur variabel-variabel pada mesin WEDM sesuai dengan rancangan percobaan yang telah ditetapkan.
6. Melakukan proses pemotongan berdasarkan urutan percobaan yang telah ditentukan.
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 *material removal rate*, dan kekasaran permukaan.
10. Pengambilan data.

3.5 Pengambilan Data

- a. MRR (*Material Removal Rate*)

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai *Material Removal*

Rate :

$$MMR = \frac{\text{Volume Material yang Terbuang}(mm^3)}{\text{Waktu Proses}(min)} \dots\dots\dots(3.1)$$

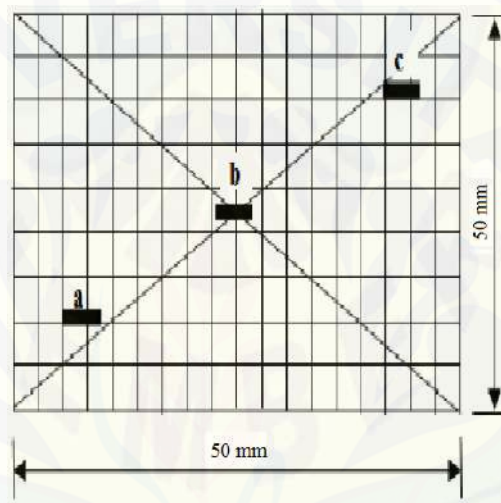
dengan, W_b : berat benda kerja sebelum *machining* (gr)

W_a : berat benda kerja setelah *machining* (gr)

t_m : waktu yang digunakan untuk proses *machining* (min)

b. Kekasaran Permukaan

Nilai kekasaran permukaan benda kerja yang telah dipotong dengan *wire* – EDM diukur menggunakan TR220 *Portable Roughness Tester* sesuai dengan ASTM D7127 (*Standard Test Method for Measurement of Surface Roughness of Abrasive Blast Cleaned Metal Surfaces Using a Portable Stylus Instrument*). Pengambilan data nilai kekasaran permukaan dilakukan pada tiga area sisi benda kerja sebanyak 3 kali pengulangan.

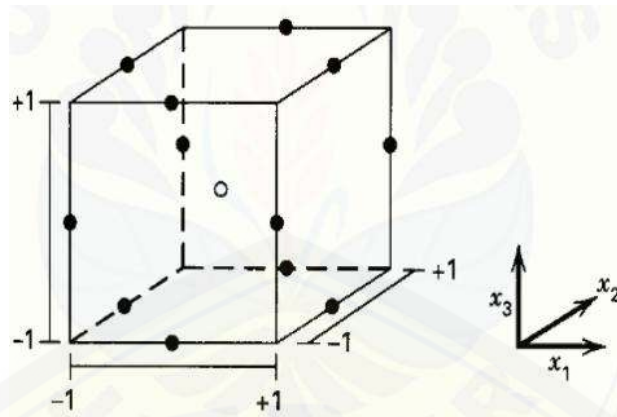


Gambar 3.4 Nilai kekasaran permukaan.

Metode yang digunakan pada tahap ini adalah metode permukaan respon (*Response Surface Methodology*) dengan desain eksperimen *Box-Behnken*. Tahapan yang harus dilakukan pada analisa data dan optimasi adalah sebagai berikut:

1. Melakukan Pengambilan Data

Metode pengambilan data dan kombinasi level berdasarkan rancangan *Box Behnken Design*. Alasan memakai rancangan tersebut karena jumlah eksperimen yang dilakukan lebih sedikit sehingga mempersingkat waktu eksperimen. Rancangan *Box-Behnken Design* dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Gambar 3.5 Representasi *Box-Behnken design* (Montgomery, 1997)Tabel 3.3 Rancangan *Box-Behnken Design*.

No	Variabel Proses			Hasil Percobaan MRR			Hasil Percobaan Ra			Rata – Rata MRR (gr/min)	Rata – Rata Ra (μm)
	Arus	Interpulse	Wire Speed	1	2	3	1	2	3		
1	10	11	7								
2	10	7	7								
3	8	9	5								
4	10	11	5								
5	8	9	7								
6	8	11	6								
7	12	11	6								
8	10	7	5								
9	10	9	6								
10	12	9	7								
11	10	9	6								
12	10	9	6								
13	12	9	5								
14	12	7	6								
15	8	7	6								

2. Pembentukan Model

Tahap permodelan hasil eksperimen dan identifikasi bentuk respon pada RSM terdiri atas dua tahap yaitu pemberian kode data hasil eksperimen dan permodelan dengan regresi linier. RSM menggunakan kode -1, 0, dan +1 bukan dengan nilai asli faktor (Daneshi et al, 2010). Tahap verifikasi model menggunakan ANOVA untuk menyimpulkan apakah model yang terbentuk akurat dan tingkat

signifikansi tiap faktor independent terhadap variabel respon. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan *software Minitab* 16. Pada orde 1, signifikansi faktor dan model regresi linier dilihat berdasarkan nilai $p - value$ dan R^2 . Sedangkan pada orde ke II, signifikansi model dilihat berdasarkan uji kesesuaian model regresi (*Lack of Fit*) dan uji parameter regresi secara serentak. Dalam uji regresi akan dilihat nilai $p - value$ pada individu faktor untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel respon. Hipotesis uji kesesuaian model regresi :

H_0 = Model regresi tidak ada *Lack of Fit*

H_1 = Model regresi ada *Lack of Fit*

Dengan dasar pengambilan keputusan, apabila nilai $P - value$ lebih dari α maka H_0 diterima dan dinyatakan bahwa model regresi cocok. Sedangkan hipotesis yang digunakan dalam uji parameter secara serentak adalah :

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

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \beta_j \neq 0 ; j = 1, 2, 3, \dots, k$$

dengan dasar pengambilan keputusan, apabila nilai F hitung lebih dari F tabel maka H_0 ditolak dan dinyatakan bahwa variabel independen memberikan sumbangan bagi terbentuknya model. Tahap penentuan pola / kondisi optimum dilakukan dengan melihat grafik respon yang telah terbentuk.

Pembentukan model ini adalah pembentukan model yang menyatakan hubungan variabel proses dengan variabel respon yang dibentuk dari nilai koefisien penduga model regresi (model percobaan orde dua). Persamaan penduga untuk model regresi adalah sebagai berikut:

Jika $k = 3$ penduga untuk model orde kedua menjadi (Setyawan, dalam Ihsan, 2015):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

Untuk mendapatkan nilai koefisien, langkah pertama yang dilakukan adalah mengolah data eksperimen menggunakan *software* komputer sehingga

didapatkan nilai koefisien. Kemudian nilai koefisien tersebut dimasukkan kedalam persamaan tersebut di atas.

3. Pengujian Model

Pengujian dilakukan dengan pengujian asumsi klasik IIDN $(0, \sigma^2)$. Pengujian tersebut antara lain uji identik, uji distribusi normal. Penjelasan lebih jelasnya sebagai berikut :

a) Uji Identik

Pengujian identik ini memiliki tujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Cara yang dilakukan dengan pemeriksaan plot e_1 terhadap \hat{Y}_i (visual). Apabila dalam penyebaran data acak dan tidak menampakkan pola tertentu maka asumsi identik dapat terpenuhi.

b) Uji Independen

Pengujian independen memiliki fungsi untuk penjaminan bahwa pengamatan dilakukan tidak berurutan sehingga pengamatan tidak ada korelasi (independen). Plot ACF (*Auto Correlation Function*) digunakan untuk pemeriksaan asumsi. Bila residual bersifat independen maka nilai korelasinya pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$.

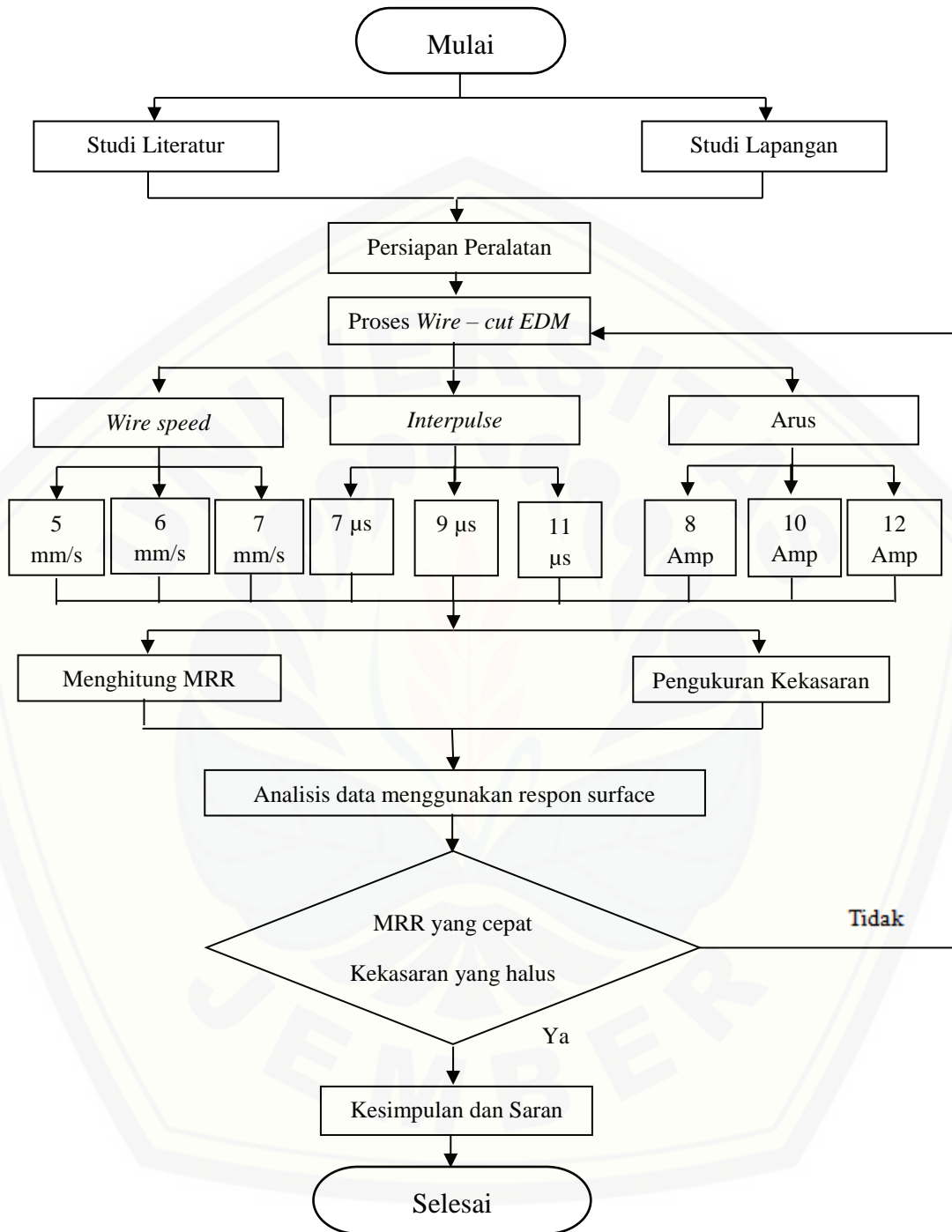
c) Uji Distribusi Normal

Pengujian distribusi normal berfungsi untuk menguji residual apakah terdistribusi normal atau tidak dengan menggunakan *normal probability plot* yaitu probabilitas dari residual satu respon, jika residual berdistribusi normal.

3.6 Tahap Penarikan Kesimpulan

Tahap ini merupakan tahap akhir dari penelitian yaitu melakukan analisis dan interpretasi (tafsiran) terhadap hasil pengolahan data eksperimen. Dengan analisis dan interpretasi tersebut dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai jawaban atas permasalahan yang telah dirumuskan. Selain itu juga diberikan saran yang berguna untuk penelitian selanjutnya.

3.5. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Hasil pengolahan data menggunakan perangkat lunak statistik menghasilkan beberapa nilai yang menunjukkan bahwa variabel proses yang berpengaruh terhadap variabel respon *Material Removal Rate* (MRR) dan kekasaran permukaan adalah variabel arus mempunyai pengaruh yang signifikan dengan variabel respon MRR sedangkan untuk kekasaran permukaan variabel bebas yang mempunyai pengaruh signifikan adalah arus dan *wirespeed* yang semakin rendah nilai arus dan *wirespeed* akan semakin kecil nilai kekasaran permukaannya yang juga membuat semakin lama MRRnya.
- b. Hasil setting variabel proses berdasarkan *software* perangkat lunak statistik adalah arus sebesar 8 amp, *interpulse* sebesar 7 μ s dan *wirespeed* sebesar 5 mm/s akan menghasilkan nilai optimum MRR sebesar 54,5688 mm³/menit dan kekasaran permukaan sebesar 5,2391 μ m.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian saran yang dapat diberikan sebagai berikut :

- a. Pengaturan hasil parameter pengolahan data yang optimal diharapkan dapat digunakan pada proses permesinan EDM di CV Catur Prasetya Packindo.
- b. Penelitian selanjutnya agar menggunakan parameter lain misalnya *variabel frequency, pulse on – time*, cairan pendingin dll.
- c. Melakukan pengulangan yang lebih banyak agar data yang dilakukan lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Agdianto, Bastian Dwi. 2012. "Kekasaran Permukaan Hasil Pemotongan Baja SKD-11 Akibat Variasi Tegangan, *Wire Tension*, dan *Feed Rate* Pada Proses *Wire-Edm*". Tidak Diterbitkan. Skripsi. Jember: Universitas Jember.
- Bachtiar, dan Usman Dinata. 2013. Optimasi Multirespon Proses Pemesinan *Wire-EDM* Pada Baja Perkakas HSS Menggunakan Metode Taguchi. *Jurnal Teknik Mesin*, 21 (1): 19-29.
- Bisono, R., dan Dani Irawan. 2017. Analisis Pengaruh Parameter Proses Terhadap Kekasaran Permukaan Pada Proses EDM Untuk Material Baja Perkakas dengan Metode Taguchi. *Jurnal Teknik Mesin*, 6 (2):32-37.
- Faulina, Ria dkk. 2011. *Respon Surface Methodology (RSM) dan Aplikasinya*. Surabaya: ITS.
- Gaspersz, V. 1991. *Metode Perancangan Percobaan*. CV. ARMICO. Bandung.
- Guitrau, E. Bud. 1997. *The EDM Handbook*. Cincinnati: Hanser Gardner Publication.
- Kristiyantoro, T. 2009. "*Optimization of Cycle Time by response Surface Method in Manufacturing Chamomile 120 ml Bottle Using Blow Molding Process*". Depok: *Proceeding of the 11th International Conference on QiR (Quality Faculty of Engineering, University of Indonesia, Depok, Indonesia*.
- Kumar, dkk. 2017. Multi-Objective Optimization of Wire Electrical Discharge Machining Process Parameter on Inconel 718. *Jurnal Proceedings*, 4 (2017) 2137-2146.
- Kurniasih, Dian. 2009. Studi Pengaruh Pulse On, SV dan Wire Speed terhadap Kekasaran Permukaan dan Laju Pemakanan Material pada Pemotongan Baja K945 Menggunakan Mesin Wire EDM Dengan Metode Faktorial Design. (Undergraduate Thesis). UBAYA.

- Mulyadi, dan Agus Puji Suryanto. 2016. Optimalisasi Hasil Proses *Wire-Cut* EDM Dengan Metode *Principal Component Analysis* (PCA). *Jurnal Rotor*, 9 (1): 1-6.
- Myers, Raymond H., dan Douglas C. Montgomery, dan Christine M. Anderson C. 1991. *Respon Surface Methodology*. Third Edition. Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, Inc. All right reserved. Canada.
- Nuryanti, dan Djati H. Salimy. 2008. Metode Permukaan Respon dan Aplikasinya pada Optimasi Eksperimen Kimia. *Risalah Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir: 6 – 7 Agustus 2008* (373 – 391)
- Pandey, P.C, dan H. S. Shan. 1980. *Modern Machining Processes*.
- Pathya. 2017. Optimasi Multirespon Proses *Wire-EDM* Menggunakan Metode Taguchi Logika *Fuzzy*. *Jurnal Teknik Mesin*, 1 (1): 2548-3854.
- Raymond, et al. 2008. *Response Surface Methodology* (3th ed.). Bandung: ITB.
- Rochim, Taufiq. 2007. *Teori dan Teknologi Proses Permesinan*. ITB. Bandung.
- Saputra, Wanda dkk. 2014. *Permesinan Non Konvensional*. Edisi Pemula.
- Singh, Vikram, dan S. K. Pradhan. 2014. Optimization of WEDM Parameters using Taguchi technique and Response Surface Methodology in machining of AISI D2 Steel. *Procedia Engineering* 97, (2014): 1579 – 1608.
- Sommer, Carl, dan Steve Sommer, M.E. 2005. *Complete EDM Handbook*. July 30 2005. Advance Pub : 978.
- Sudjana, Nana. 1994. *Pembinaan dan Pengembangan Kurikulum di Sekolah*. Bandung : Sinar Baru Algensindo.
- Sulistiyanto, Sri. 2008. *Manajemen Laba : Teori dan Model Empiris*. Jakarta: Grasindo.
- Sumbodo, Wirawan dkk. 2008. *Teknik Produksi Mesin Industri*. Jilid I.

Susanto, Eko Edi dkk. 2016. Optimalisasi Arus Listrik Terhadap Penyimpangan Pemotongan Pembuatan Roda Gigi Pada Mesin Wire Cutting EDM. *Jurnal Flywheel*. 7 (1): 1979-5858.

Yusron, R. M. 2014. Pengaruh *Pulse On Time* dan *Open Voltage* Terhadap Integritas Permukaan Benda Kerja (IPBK) hasil Pemotongan Baja Perkakas Benderus 2080 Pada Proses *Wire – EDM*. Skripsi. Surabaya : Institut Teknologi Surabaya.



Lampiran 6.1 data *Material Removal Rate*

No	Berat Awal			Berat Akhir			Waktu		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	18,90	19,13	18,86	16,07	16,01	15,98	7,57	7,42	7,27
2	18,90	19,13	18,86	16,21	16,18	16,07	7,59	7,31	7,29
3	18,90	19,13	18,86	15,99	16,07	16,21	6,31	6,16	6,01
4	18,90	19,13	18,86	16,29	16,25	16,28	8,13	7,98	7,83
5	18,90	19,13	18,86	16,19	16,04	16,21	7,56	7,41	7,36
6	18,90	18,75	18,86	15,81	16,23	16,07	8,51	8,36	8,21
7	18,90	18,75	18,86	16,17	15,84	15,83	6,47	6,32	6,17
8	18,90	18,75	18,86	16,00	16,12	16,01	6,23	6,12	5,97
9	18,90	18,75	18,86	16,40	16,00	16,25	6,51	6,36	6,21
10	18,90	18,75	18,86	16,09	16,10	15,99	6,11	5,96	5,81
11	19,13	18,75	18,92	16,30	15,98	16,15	6,56	6,41	6,36
12	19,13	18,75	18,92	16,24	16,20	16,37	6,14	5,99	5,84
13	19,13	18,75	18,92	16,13	16,21	16,15	6,22	6,07	5,92
14	19,13	18,75	18,92	16,05	15,62	15,87	5,48	5,33	5,18
15	19,13	18,75	18,92	16,05	16,15	16,23	6,11	5,56	5,41

Lampiran 6.2 Print out hasil pengolahan data respon surface dengan aplikasi minitab 16.0

29/10/2019 2:10:05

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Response Surface Regression: MRR; kekasaran pe versus arus; interpulse; ...

Response Surface Regression: MRR versus arus; interpulse; wirespeed

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for MRR

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	53,997	0,9133	59,122	0,000
arus	3,942	0,5593	7,049	0,001
interpulse	-4,638	0,5593	-8,292	0,000
wirespeed	-1,575	0,5593	-2,816	0,037
arus*arus	5,087	0,8232	6,179	0,002
interpulse*interpulse	-1,453	0,8232	-1,765	0,138
wirespeed*wirespeed	-2,818	0,8232	-3,423	0,019
arus*interpulse	3,475	0,7909	4,393	0,007
arus*wirespeed	3,610	0,7909	4,564	0,006
interpulse*wirespeed	4,945	0,7909	6,252	0,002

S = 1,58190 PRESS = 199,822

R-Sq = 98,13% R-Sq(pred) = 70,20% R-Sq(adj) = 94,78%

Analysis of Variance for MRR

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	658,026	658,026	73,114	29,22	0,001
Linear	3	316,243	316,243	105,414	42,13	0,001
arus	1	124,346	124,346	124,346	49,69	0,001
interpulse	1	172,051	172,051	172,051	68,75	0,000
wirespeed	1	19,845	19,845	19,845	7,93	0,037
Square	3	143,540	143,540	47,847	19,12	0,004
arus*arus	1	108,533	95,535	95,535	38,18	0,002
interpulse*interpulse	1	5,679	7,799	7,799	3,12	0,138
wirespeed*wirespeed	1	29,328	29,328	29,328	11,72	0,019
Interaction	3	198,243	198,243	66,081	26,41	0,002
arus*interpulse	1	48,302	48,302	48,302	19,30	0,007
arus*wirespeed	1	52,128	52,128	52,128	20,83	0,006
interpulse*wirespeed	1	97,812	97,812	97,812	39,09	0,002
Residual Error	5	12,512	12,512	2,502		
Lack-of-Fit	3	12,485	12,485	4,162	309,80	0,437
Pure Error	2	0,027	0,027	0,013		
Total	14	670,538				

Unusual Observations for MRR

Obs	StdOrder	MRR	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	4	43,900	45,575	1,370	-1,675	-2,12 R
12	12	64,410	62,735	1,370	1,675	2,12 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for MRR using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	380,882
arus	-42,1108
interpulse	-19,3012
wirespeed	-8,05750
arus*arus	1,27167
interpulse*interpulse	-0,363333
wirespeed*wirespeed	-2,81833
arus*interpulse	0,868750
arus*wirespeed	1,80500
interpulse*wirespeed	2,47250

Predicted Response for New Design Points Using Model for MRR

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	61,8000	1,36996	(58,2784; 65,3216)	(56,4207; 67,1793)
2	57,5075	1,36996	(53,9859; 61,0291)	(52,1282; 62,8868)
3	47,1375	1,36996	(43,6159; 50,6591)	(41,7582; 52,5168)
4	45,5750	1,36996	(42,0534; 49,0966)	(40,1957; 50,9543)
5	60,8825	1,36996	(57,3609; 64,4041)	(55,5032; 66,2618)
6	47,8425	1,36996	(44,3209; 51,3641)	(42,4632; 53,2218)
7	53,9967	0,91331	(51,6489; 56,3444)	(49,3012; 58,6921)
8	53,9967	0,91331	(51,6489; 56,3444)	(49,3012; 58,6921)
9	53,9967	0,91331	(51,6489; 56,3444)	(49,3012; 58,6921)
10	41,7175	1,36996	(38,1959; 45,2391)	(36,3382; 47,0968)
11	48,4575	1,36996	(44,9359; 51,9791)	(43,0782; 53,8368)
12	62,7350	1,36996	(59,2134; 66,2566)	(57,3557; 68,1143)
13	58,1725	1,36996	(54,6509; 61,6941)	(52,7932; 63,5518)
14	62,2425	1,36996	(58,7209; 65,7641)	(56,8632; 67,6218)
15	60,4100	1,36996	(56,8884; 63,9316)	(55,0307; 65,7893)

Response Surface Regression: kekasaran pe versus arus; interpulse; wirespeed

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for kekasaran permukaan

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5,27200	0,11318	46,582	0,000
arus	0,16300	0,06931	2,352	0,065
interpulse	0,22362	0,06931	3,227	0,023
wirespeed	0,52163	0,06931	7,526	0,001
arus*arus	0,05288	0,10202	0,518	0,626
interpulse*interpulse	0,28163	0,10202	2,761	0,040
wirespeed*wirespeed	0,33212	0,10202	3,256	0,023
arus*interpulse	0,25200	0,09801	2,571	0,050
arus*wirespeed	0,09250	0,09801	0,944	0,389
interpulse*wirespeed	0,14975	0,09801	1,528	0,187

S = 0,196030 PRESS = 2,67516
R-Sq = 95,21% R-Sq(pred) = 33,30% R-Sq(adj) = 86,59%

Analysis of Variance for kekasaran permukaan

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	3,81846	3,81846	0,42427	11,04	0,008
Linear	3	2,78936	2,78936	0,92979	24,20	0,002
arus	1	0,21255	0,21255	0,21255	5,53	0,065
interpulse	1	0,40007	0,40007	0,40007	10,41	0,023
wirespeed	1	2,17674	2,17674	2,17674	56,65	0,001
Square	3	0,65116	0,65116	0,21705	5,65	0,046
arus*arus	1	0,00030	0,01032	0,01032	0,27	0,626
interpulse*interpulse	1	0,24357	0,29285	0,29285	7,62	0,040
wirespeed*wirespeed	1	0,40729	0,40729	0,40729	10,60	0,023
Interaction	3	0,37794	0,37794	0,12598	3,28	0,117
arus*interpulse	1	0,25402	0,25402	0,25402	6,61	0,050
arus*wirespeed	1	0,03422	0,03422	0,03422	0,89	0,389
interpulse*wirespeed	1	0,08970	0,08970	0,08970	2,33	0,187
Residual Error	5	0,19214	0,19214	0,03843		
Lack-of-Fit	3	0,16312	0,16312	0,05437	3,75	0,218
Pure Error	2	0,02902	0,02902	0,01451		
Total	14	4,01060				

Estimated Regression Coefficients for kekasaran permukaan using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	31,7905
arus	-1,02738
interpulse	-2,23475
wirespeed	-4,60025
arus*arus	0,0132188
interpulse*interpulse	0,0704063
wirespeed*wirespeed	0,332125
arus*interpulse	0,0630000
arus*wirespeed	0,0462500
interpulse*wirespeed	0,0748750

Predicted Response for New Design Points Using Model for kekasaran permukaan

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	5,47188	0,169767	(5,03548; 5,90827)	(4,80526; 6,13849)
2	5,06487	0,169767	(4,62848; 5,50127)	(4,39826; 5,73149)
3	5,92312	0,169767	(5,48673; 6,35952)	(5,25651; 6,58974)
4	5,41512	0,169767	(4,97873; 5,85152)	(4,74851; 6,08174)
5	5,29025	0,169767	(4,85385; 5,72665)	(4,62364; 5,95686)
6	6,03400	0,169767	(5,59760; 6,47040)	(5,36739; 6,70061)
7	5,27200	0,113178	(4,98107; 5,56293)	(4,69013; 5,85387)
8	5,27200	0,113178	(4,98107; 5,56293)	(4,69013; 5,85387)
9	5,27200	0,113178	(4,98107; 5,56293)	(4,69013; 5,85387)
10	5,43800	0,169767	(5,00160; 5,87440)	(4,77139; 6,10461)
11	6,78075	0,169767	(6,34435; 7,21715)	(6,11414; 7,44736)
12	5,29387	0,169767	(4,85748; 5,73027)	(4,62726; 5,96049)
13	5,20587	0,169767	(4,76948; 5,64227)	(4,53926; 5,87249)
14	6,43413	0,169767	(5,99773; 6,87052)	(5,76751; 7,10074)
15	6,24513	0,169767	(5,80873; 6,68152)	(5,57851; 6,91174)

Normplot of Residuals for MRR

Residuals vs Fits for MRR

Residual Histogram for MRR

Residuals vs Order for MRR

Normplot of Residuals for kekasaran permukaan

Residuals vs Fits for kekasaran permukaan

Residual Histogram for kekasaran permukaan

Residuals vs Order for kekasaran permukaan

Optimization Plot

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
MRR	Maximum	45,0	65,0	65,0	1	1
kekasaran pe	Minimum	5,2	5,2	6,2	1	1

Global Solution

arus = 8
interpulse = 7,72727
wirespeed = 5,20202

Predicted Responses

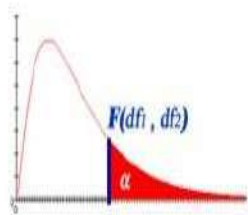
MRR = 64,5688 , desirability = 0,978439
kekasaran pe = 5,2391 , desirability = 0,960923

Composite Desirability = 0,969642

Optimization Plot

01/12/2019 13:38:54

Lampiran 6.3 F tabel $\alpha = 0,5$



F Table for $\alpha = 0.05$

/	df ₁ =1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
df ₂ =2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Lampiran 6.4 Sertifikat Hitachi Metals baja SLD

Customer: P. I. STILBERTINO PRIMA

Hitachi Metals, Ltd.
Yasugi Works
Miyajima 2107-2, Yasuoi-cho, Yasuoi-shi., Shimane-ken
Miyagi 992-8501, Japan

HITACHI
Page: 1/1

TEST CERTIFICATE

ISOTHERM CASE No.: 967 DESCRIPTION: HOT ROLLED ALLOY TOOL STEEL BAR
Order No.: 100050278 (002) Report No.: 7652-2828-20

Material: SLD
Condition: Annealed

Item No.: C7737 Date: Mar. 02, 2018
Spec. No.: 140(40, 80)1155(2-0)A3000-3600
Quantity (pcs.): 2
Our Ref. No.: 5P-153-995D-02

3) Hardness (As Shipped)

Item	Spec.	TP No.	Result
Test Piece	KAV248 MBF	231	1

7) Hardness After Heat Treatment (HT)

Item	Spec.	TP No.	Result
Test Piece	- HRC	-	62.4

2) Heat Treatment

Test Piece (HT)

Q: 1000°C X 15min, AQ
T: 150°C X 60min, AC

6) Decarburization

Item	Spec.	TP No.	Result
Evaluation	GOOD	GOOD	GOOD

5) Microstructure

Item	Spec.	TP No.	Result
Evaluation	GOOD	GOOD	GOOD

4) Chemical Composition %

Element	C	Si	Mn	P	S	CR	Mo	V
Spec.	1.41	0.27	0.41	0.0056	0.0005	12.04	0.03	0.23

Inspection Item

Inspection Item	Result
Visual Inspection	:GOOD
Dimensional Inspection	:GOOD
Material Check	:GOOD

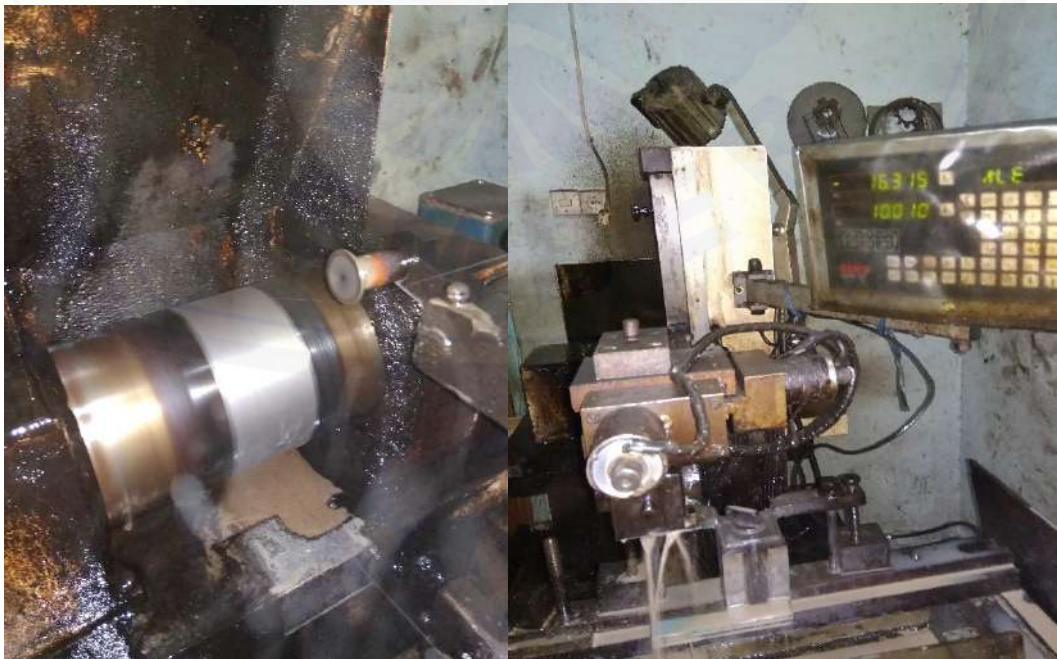
Conforms To All Drawing and/or Specification Requirements.
We hereby certify that the material described herein has been made and tested in accordance with the requirements of the purchase specification with satisfactory results.

W. Sakai
QUALITY ASSURANCE DEPARTMENT

Lampiran 6.5 Foto-foto Alat dan bahan



Lampiran 6.6 Foto-foto proses pemotongan pada Wire-EDM



Lampiran 6.7 Foto-foto proses pengukuran

