



**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN *WIRE-EDM* BAJA
PERKAKAS SKD 11 MENGGUNAKAN
METODE *TAGUCHI***

SKRIPSI

Oleh

**Okik Aris Setiawan
NIM 141910101030**

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



**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN WIRE-EDM BAJA
PERKAKAS SKD 11 MENGGUNAKAN
METODE *TAGUCHI***

SKRIPSI

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

Oleh

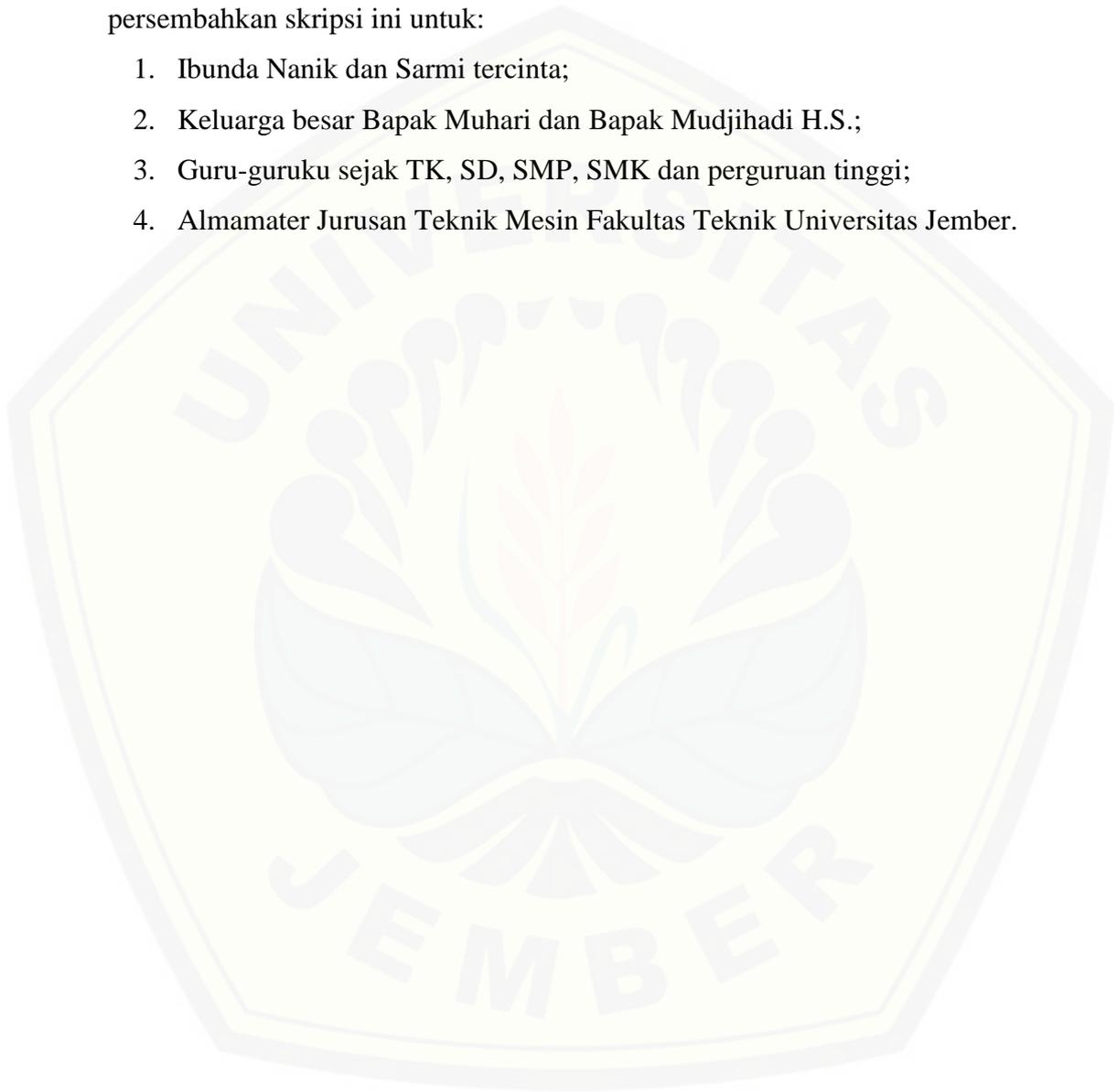
**Okik Aris Setiawan
NIM 141910101030**

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

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan puji syukur atas rahmat Allah SWT, saya persembahkan skripsi ini untuk:

1. Ibunda Nanik dan Sarmi tercinta;
2. Keluarga besar Bapak Muhari dan Bapak Mudjihadi H.S.;
3. Guru-guruku sejak TK, SD, SMP, SMK dan perguruan tinggi;
4. Almamater Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.



MOTTO

“Bacalah dengan (menyebut) nama Tuhanmu Yang menciptakan. Dia telah menciptakan manusia dari segumpal darah. Bacalah, dan Tuhanmulah Yang Maha Pemurah. Yang mengajar (manusia) dengan perantara kalam. Dia mengajar kepada manusia apa yang tidak diketahuinya”

(Terjemahan QS. Al 'Alaq ayat 1-5) *)

Siapa yang menghendaki kehidupan dunia, maka harus disertai dengan ilmu
Dan siapa yang menghendaki kehidupan akhirat, juga harus dengan ilmu

(Imam Asy - Syafi'i) **)

*Ngèlmu iku kalakoné kanthi laku, Lekasé lawan kas,
Tegesé kas nyantosani, Setya budaya pangekesé dur angkara*
(Serat Wedhatama) ***)

*) Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo

**) Syamsuddin, Muhammad bin Ahmad Al-Khotib Asy-Syarbini. 1997. *Mughni al-Muhtaj ila Ma'rifah Ma'ani Alfazh al-Minhaj*. Beirut – Lebanon: Darul Ma'rifat

***) Adityo, T. Jatmiko. 2005. *Tafsir Ajaran Serat Wedhatama*. Pura pustaka

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Okik Aris Setiawan

NIM : 141910101030

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Optimasi Parameter Pemesinan *Wire*-EDM Baja Perkakas SKD 11 Menggunakan Metode *Taguchi*” adalah benar-benar karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, 9 November 2018

Yang menyatakan,

Okik Aris Setiawan

NIM 141910101030

SKRIPSI

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN *WIRE*-EDM BAJA
PERKAKAS SKD 11 MENGGUNAKAN
METODE *TAGUCHI***

Oleh

Okik Aris Setiawan

NIM 141910101030

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Santoso Mulyadi, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Optimasi Parameter Pemesinan *Wire*-EDM Baja Perkakas SKD 11 Menggunakan Metode *Taguchi*” telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal : 9 November 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji :

Ketua,

Sekretaris,

Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T.
NIP. 19600812 199802 1 001

Santoso Mulyadi, S.T., M.T.
NIP. 19700228 199702 1 001

Anggota I,

Anggota II,

Dr. R. Koekoeh K.W.,S.T., M.Eng.
NIP 19670708 199412 1 001

Ir. Ahmad Syuhri, M.T.
NIP 19670123 199702 1 001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.
NIP. 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Optimasi Parameter Pemesinan Wire-EDM Baja Perkakas SKD 11 Menggunakan Metode Taguchi; Okik Aris Setiawan, 141910101030; 2018: 103 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Perkembangan produk-produk manufaktur dengan kompleksitas bentuk dan tingkat akurasi tinggi, telah mendorong pengembangan teknologi pemesinan di dunia industri. Banyak produk manufaktur yang saat ini sulit untuk diproduksi dengan menggunakan pemesinan konvensional, karena tuntutan profil yang rumit serta material produk yang sangat keras. Data Badan Pusat Statistik Nasional tahun 2017 menyatakan bahwa, sektor industri logam tumbuh hingga 9,79% pada akhir tahun 2016 dan meningkat menjadi 10,60% pada triwulan 3 tahun 2017.

Wire Electrical Discharge Machining merupakan suatu proses pemesinan non konvensional yang saat ini banyak digunakan di industri manufaktur seperti industri medis, pesawat dan otomotif. Proses *Wire EDM* memanfaatkan energi termal dari loncatan bunga api, akibat perbedaan tegangan antara elektroda dan benda kerja yang bersifat konduktor di dalam suatu media dielektrik. Loncatan bunga api inilah yang dimanfaatkan sehingga benda kerja terkikis atau terpotong.

Baja SKD 11 merupakan baja perkakas dengan tingkat kekerasan tinggi dan banyak digunakan sebagai alat potong serta memiliki sifat tahan aus yang tinggi. Proses pemesinan baja SKD 11 kecil kemungkinan dilakukan dengan pemesinan konvensional karena tingkat kekerasannya yang tinggi yaitu antara 58 HRC hingga 63 HRC, sehingga *Wire EDM* adalah salah pilihan yang cocok dan tepat. Baja SKD 11 umumnya digunakan sebagai pisau potong, cetakan *deep drawing*, *drawing cones*, *compression moulding dies* keramik serta bahan cetakan *injection molding*.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi variabel proses kuat arus, voltase dan *wire speed* serta kombinasi parameter optimasi yang tepat pada proses pemesinan *Wire EDM* baja SKD 11 sehingga dihasilkan *material removal rate* (MRR) dan lebar pemotongan yang optimal.

Hasil percobaan, proses optimasi dan analisis data yang telah dilakukan menggunakan metode *Taguchi* pada proses pemesinan *Wire EDM* baja SKD 11,

diketahui bahwa parameter penelitian yang berpengaruh signifikan terhadap respons dimensi lebar pemotongan (*kerf*) adalah kuat arus dan *wire speed*. Kuat arus berkontribusi sebesar 89,84% dan *wire speed* berkontribusi 8,26% terhadap respons dimensi lebar pemotongan. Parameter yang sangat berpengaruh terhadap respons *material removal rate* (MRR) adalah kuat arus, dengan hasil rata-rata *material removal rate* (MRR) tertinggi pada kuat arus 9 ampere. Kuat arus berkontribusi sebesar 87,88% terhadap respons *material removal rate* (MRR). Sedangkan parameter dalam penelitian yang memiliki pengaruh signifikan terhadap respons gabungan berdasar metode *taguchi* dengan pendekatan GRA adalah *wire speed*. *Wire speed* yang menghasilkan nilai *Grey Relational Grade* tertinggi terhadap respons gabungan yaitu pada level 3 atau 10 m/s. *Wire speed* memiliki kontribusi sebesar 92,79% terhadap respons gabungan.

Kondisi optimal *setting* parameter proses dengan respons dimensi lebar pemotongan (*kerf*), yaitu pada kombinasi parameter kuat arus 5 ampere, voltase 6 volt dan *wire speed* 10 m/s. Hasil *setting* parameter tersebut didapatkan dimensi lebar pemotongan optimum sebesar 0,273 mm. Sedangkan hasil perkiraan kondisi optimal dapat dicapai dengan kombinasi parameter kuat arus 5 ampere, voltase 4 volt dan *wire speed* 10 m/s.

Kondisi optimal *setting* parameter proses dengan respons *material removal rate* (MRR), yaitu pada kombinasi parameter kuat arus 9 ampere, voltase 4 volt dan *wire speed* 10 m/s. Kondisi *setting* parameter tersebut menghasilkan *material removal rate* (MRR) terbesar yaitu 8,94 mm³/menit. Sedangkan hasil perkiraan kondisi optimal dapat dicapai dengan kombinasi parameter kuat arus 9 ampere, voltase 5 volt dan *wire speed* 10 m/s.

Hasil perhitungan dan optimasi didapatkan kondisi optimal *setting* parameter dengan respons gabungan yaitu pada kombinasi parameter kuat arus 7 ampere, voltase 5 volt dan *wire speed* 10 m/s. Kombinasi tersebut didapatkan nilai *Grey Relational Grade* terbesar yaitu 0,703. Sedangkan hasil perkiraan kondisi optimal dapat dicapai dengan kombinasi parameter kuat arus 7 ampere, voltase 4 volt dan *wire speed* 10 m/s.

SUMMARY

Optimization of Wire-EDM Machining Parameters on SKD 11 Tool Steel using Taguchi Method; Okik Aris Setiawan, 141910101030; 2018: 103 pages; Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Jember.

The development of manufacturing products, on form complexity and high accuracy has encouraged development of machining technology in the industrial. Many manufacturing products are currently difficult to produce using conventional machining, due to demands of complex profiles and hardness of materials. Data of National Statistics Agency at the end in 2017, stated that metal industry sector grew up 9.79% in 2016 and increased to 10.60% in the third quarter of 2017.

Wire Electrical Discharge Machining is a non-conventional machining process that is currently widely used in manufacturing industries such as medical, aircraft and automotive industries. Wire EDM process utilizes thermal energy from sparks, due to difference in voltage between electrode and conductor workpiece in a dielectric medium. These sparks are used to eroded or cut off the workpiece.

SKD 11 is a high hardness tool steel and widely used as a cutting tool, has a high worn out resistant and good machining process. The SKD 11 tool steel machining process is less likely to be done by conventional machining because the high hardness level is between 58 HRC to 63 HRC, so Wire EDM is a suitable choice. SKD 11 tool steel is generally used as a cutting knife, deep drawing molds, drawing cones, compression molding ceramic dies and injection molding materials.

The aim of this research is determining the effect of variations variables process of current, voltage and wire speed and the combination parameters that can optimization in SKD 11 tool steel Wire EDM machining process, and resulting material removal rate (MRR) and cutting width (kerf) are optimal.

The results of the experiment, process of optimization and data analysis that have been carried out using the Taguchi method on the SKD 11 tool steel Wire EDM machining process, it is known the research parameters that have a significant influence on the cutting width dimension response (kerf) are current and wire speed.

Current give contribution 89.84% and wire speed give contribution 8.26% for the response. Parameters that are very influential on material removal rate (MRR) is current, the highest average material removal rate (MRR) at 9 amperes. Current contributed 87.88% for the material removal rate response. While the parameters in the study that have a significant effect on the combined response based on the *taguchi* method with the GRA approach are wire speed. Wire speed has a significant effect on the combined response at level 3 or 10 m/s. Wire speed has a contribution of 92.79% of the response.

The optimal condition of parameter settings on cutting width dimension (kerf) response, which is the combination of 5 ampere current, 6 volt voltage and 10 m/s wire speed. The results of these parameter settings obtained optimum cutting width dimension of 0.273 mm. While the estimated optimal conditions can be achieved with a combination of 5 ampere current, 4 volt voltage and 10 m/s wire speed.

The optimal conditions of the process parameter settings on material removal rate (MRR) response, which is a combination of 9 ampere current, 4 volt voltage and 10 m/s wire speed. The parameter setting conditions produce the largest material removal rate (MRR) of $8.94 \text{ mm}^3 / \text{minute}$. While the estimation of optimal conditions can be achieved with a combination of 9 ampere of current, 5 volt voltage and 10 m/s wire speed.

The results of the calculation and optimization parameter setting conditions on combined response that is on a combination of 7 ampere current, 5 volt voltage and 10 m / s wire speed. The combination obtained the highest of Grey Relational Grade of 0.703. While the estimation of optimal conditions can be achieved with a combination of 7 ampere current, 4 volt voltage and 10 m / s wire speed.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, karunia dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Parameter Pemesinan *Wire* EDM Baja Perkakas SKD 11 Menggunakan Metode *Taguchi*”. Selawat serta salam semoga tetap tercurah kepada Nabi Muhammad SAW sebagai sumber inspirasi dan panutan umat manusia dalam menjalani kehidupan di dunia ini. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

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

1. Orang tua tercinta, Ibunda Nanik dan Ibunda Sarmi yang selalu memberikan dukungan moril serta doanya sehingga saya dapat menyelesaikan studi S1.
2. Bapak Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T. selaku dosen pembimbing utama dan Bapak Santoso Mulyadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing anggota sekaligus juga dosen pembimbing akademik penulis, yang selalu memberikan ide, saran dan motivasi serta kesediaan meluangkan waktu untuk membimbing selama penelitian dan penyusunan laporan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W., S.T., M.Eng selaku dosen penguji I dan Bapak Ir. Ahmad Syuhri, M.T. selaku dosen penguji II yang telah memberikan saran dan kritik membangun demi terselesainya skripsi ini dengan baik.
4. Kakakku Dody Amukti P., Tubagus Fitrajaya, Aditya Wisnuwardana, Nugraha Eni A.W. serta adikku tercinta Ully Khusnul K. dan Nora Pradika, yang telah memberikan motivasi tanpa henti dan selalu menjadi pelecut semangat untuk berhasil.
5. Seluruh keluarga besar Bapak Muhari dan Bapak Mudjihadi H.S. yang telah memberikan motivasi dan doa agar selalu maju dan berhasil di kemudian hari.

6. Saudaraku-saudaraku Teknik Mesin Universitas Jember khususnya angkatan 2014, yang telah memberikan pengalaman, dukungan, motivasi serta doa agar selalu berpikir maju dan berkembang.
7. Guru-guruku dari SD, SMP, SMK serta semua dosen Teknik Mesin Universitas Jember yang telah memberikan bekal ilmu yang bermanfaat untuk saya hingga menjadi seperti sekarang.
8. Seluruh teman-teman yang telah membantu penelitian dan penyusunan skripsi ini, khususnya anggota *Epson group* dan keluarga Kalimantan X/19.
9. Semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan saat melakukan penelitian maupun pengerjaan skripsi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa manusia tidak luput dari salah dan lupa, sehingga penulis menerima adanya kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga hasil dari penelitian pada skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada semua pihak.

Jember, 9 November 2018

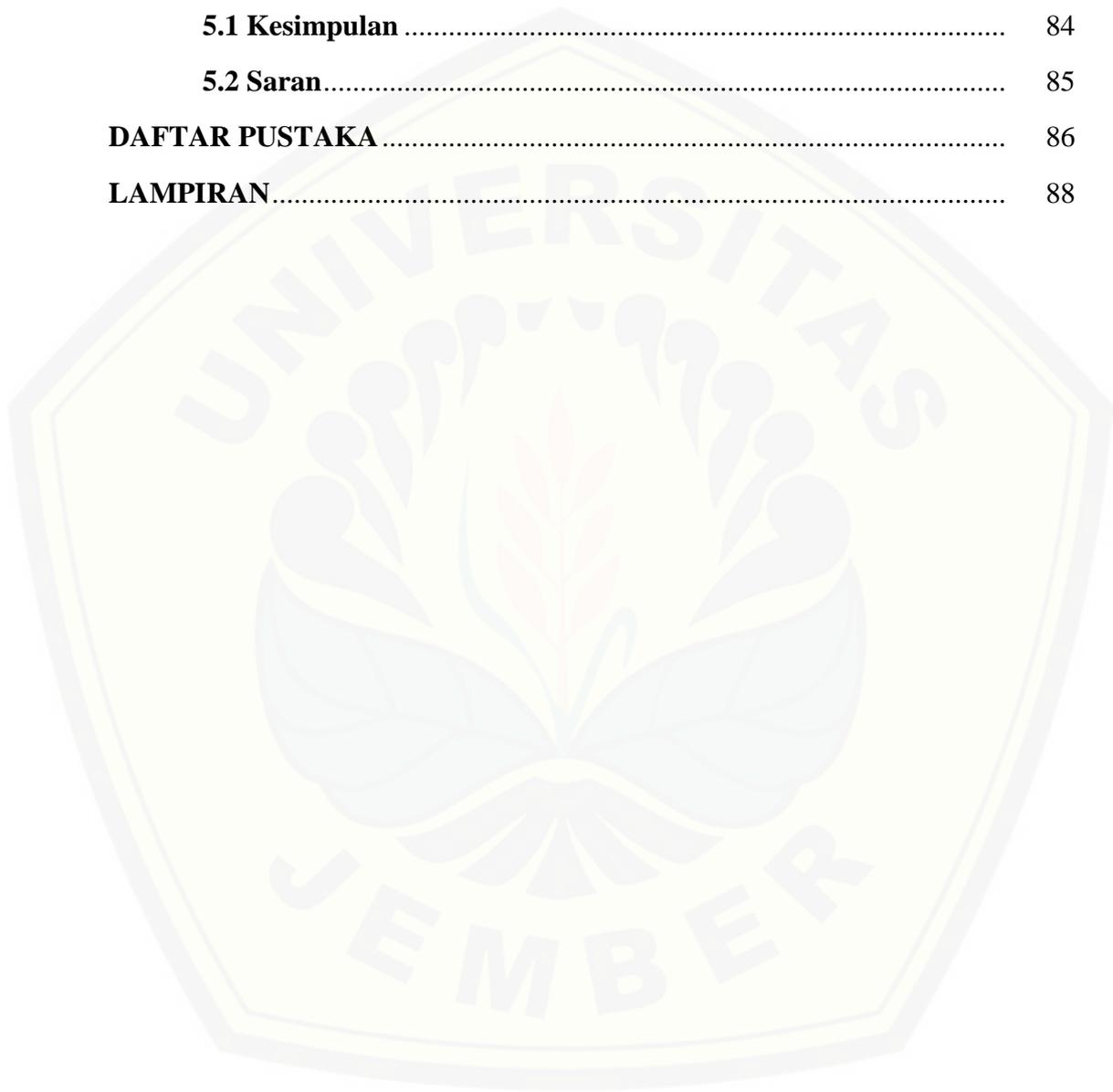
Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
HALAMAN RINGKASAN	viii
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	4
1.4.1 Tujuan	4
1.4.2 Manfaat	4
1.5 Hipotesis	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Electrical Discharge Machine (EDM)</i>	6
2.2 Klasifikasi Mesin EDM	7
2.3 <i>Wire Electrical Discharge Machine (Wire EDM)</i>	8
2.3.1 Proses Pemotongan dengan <i>Wire EDM</i>	9
2.3.2 Parameter-parameter <i>Wire EDM</i>	12
2.3.3 Kawat Elektroda <i>Wire EDM</i>	14
2.3.4 Mekanisme Pembuangan Geram.....	16

2.4 <i>Material Removal Rate (MRR)</i>	16
2.5 Lebar Pemotongan Bahan (<i>Kerf</i>).....	17
2.6 Desain Eksperimen.....	18
2.6.1 Metode <i>Taguchi</i>	18
2.6.2 Rancangan Percobaan <i>Taguchi</i>	20
2.6.2 Optimasi Multi Respons Menggunakan Pendekatan <i>Grey</i> <i>Relational Analysis</i>	30
BAB 3. METODE PENELITIAN	32
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	32
3.2 Alat dan Bahan	32
3.2.1 Alat.....	32
3.2.2 Bahan	34
3.3 Tahap Identifikasi Masalah	35
3.4 Variabel-variabel Penelitian	35
3.5 Rancangan Percobaan	37
3.5.1 Pengaturan Variabel pada Mesin Wire EDM.....	37
3.5.2 Pemilihan Matriks Ortogonal.....	38
3.5.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian	40
3.6 Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data	41
3.6.1 Pengukuran dan Pengambilan Data	41
3.6.2 Analisis Data dan Optimasi.....	42
3.7 Tahap Penarikan Kesimpulan	43
3.8 Diagram Alir Penelitian	44
BAB 4. PEMBAHASAN	46
4.1 Data Hasil Pengujian	46
4.2 Pengolahan dan Analisis Data	47
4.2.1 Pengolahan dan Analisis Data Lebar Pemotongan (<i>kerf</i>)....	47
4.2.2 Pengolahan dan Analisis Data <i>Material Removal Rate</i> (MRR).....	60

4.2.3 Optimasi Multirespons (Lebar Pemotongan dan MRR) Menggunakan Pendekatan <i>Grey Relational Analysis</i> (GRA)	73
BAB 5. PENUTUP	84
5.1 Kesimpulan	84
5.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN	88



DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Matriks ortogonal $L_9 (3^4)$	23
2.2 Tabel analisis variansi (ANOVA)	27
3.1 Spesifikasi mesin <i>Wire</i> EDM Mitsubishi tipe BA8	33
3.2 Variabel-variabel konstan	37
3.3 Variabel-variabel proses dan masing-masing level.....	38
3.4 Total derajat kebebasan variabel-variabel respons.....	38
3.5 Rancangan percobaan <i>Taguchi</i> $L_9 (3^3)$	39
3.6 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ replikasi pertama.....	39
3.7 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ replikasi kedua.....	40
3.8 Tabel hasil pengukuran setiap percobaan.....	42
4.1 Data nilai lebar pemotongan hasil pengujian	46
4.2 Data nilai <i>material removal rate</i> hasil pengujian.....	47
4.3 Data hasil perhitungan <i>S/N Ratio</i> lebar pemotongan (<i>kerf</i>).....	48
4.4 Hasil analisis varian untuk lebar pemotongan.....	52
4.5 Perhitungan efek faktor untuk <i>S/N ratio</i> lebar pemotongan.....	55
4.6 Data hasil perhitungan <i>S/N Ratio material removal rate</i> (MRR).....	61
4.7 Hasil analisis varian untuk <i>material removal rate</i> (MRR).....	65
4.8 Perhitungan efek faktor untuk <i>S/N ratio material removal rate</i> (MRR)	68
4.9 <i>S/N Ratio</i> lebar pemotongan dan <i>material removal rate</i> (MRR)	73
4.10 Normalisasi <i>S/N Ratio</i> lebar pemotongan dan <i>material removal rate</i>	74
4.11 Nilai delta lebar pemotongan dan <i>material removal rate</i>	75
4.12 Nilai gamma lebar pemotongan dan <i>material removal rate</i>	76
4.13 Nilai <i>Grey Relational Grade</i>	77
4.14 <i>Mean Square</i> dari nilai <i>Grey Relational Grade</i>	78
4.15 Nilai F dari <i>Grey Relational Grade</i>	79
4.16 Hasil analisis varian untuk <i>Grey Relational Grade</i>	79

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1	Mesin WIRE EDM tipe DK7625P 9
2.2	Ilustrasi proses pemotongan <i>Wire</i> EDM..... 10
2.3	Skema pemotongan pada sistem <i>Wire</i> EDM 10
2.4	Pembangkitan energi sistem <i>Wire</i> EDM..... 11
2.5	Proses loncatan bunga api listrik..... 11
2.6	Proses pengikisan dan pembersihan..... 12
2.7	Mekanisme pembuangan geram 16
2.8	Skema volume benda kerja yang terbuang saat pemotongan 17
2.9	Proses pembentukan <i>kerf</i> pada <i>Wire</i> EDM 18
3.1	Mesin <i>Wire</i> EDM Mitsubishi tipe BA8 32
3.2	Nikon <i>profile projector</i> 20..... 33
3.3	Jangka sorong digital <i>Mitutoyo</i> 34
3.4	Kawat elektroda kuningan. 35
3.5	Spesimen benda kerja 41
3.6	Diagram alir penelitian 44
4.1	<i>Main effect plot S/N Ratio</i> respons lebar pemotongan..... 44
4.2	Grafik <i>S/N Ratio</i> pada masing-masing level faktor kuat arus..... 45
4.3	Grafik <i>S/N Ratio</i> pada masing-masing level faktor voltase 45
4.4	Grafik <i>S/N Ratio</i> pada masing-masing level faktor <i>wire speed</i> 46
4.5	<i>Main effect plot S/N Ratio</i> respons <i>material removal rate</i> 47
4.6	Grafik <i>S/N Ratio</i> MRR pada masing-masing level faktor kuat arus 47
4.7	Grafik <i>S/N Ratio</i> MRR pada masing-masing level faktor voltase ... 47
4.8	Grafik <i>S/N Ratio</i> MRR pada masing-masing level faktor <i>wire speed</i> 47
4.9	Grafik <i>Grey Relational Grade</i> pada masing-masing level faktor kuat arus 47
4.10	Grafik <i>Grey Relational Grade</i> pada masing-masing level faktor voltase 47

4.11 Grafik *Grey Relational Grade* pada masing-masing level faktor *wire speed* 47



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan produk-produk manufaktur dengan kompleksitas bentuk dan tingkat akurasi tinggi, telah mendorong pengembangan teknologi pemesinan di dunia industri. Banyak produk manufaktur yang saat ini sulit untuk diproduksi dengan menggunakan pemesinan konvensional, akibat dari tuntutan profil yang rumit serta material produk yang sangat keras. Nyatanya permasalahan ini direspons dengan perkembangan proses pemesinan non konvensional yang semakin pesat dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini terlihat dari laporan survei oleh *Global Industry Analysts, Inc.* pada bulan Juli tahun 2017, yang menyatakan bahwa penjualan mesin-mesin EDM sejak tahun 2011 hingga saat ini mencapai 910 juta USD, dan diprediksi akan mencapai angka 7,5 miliar USD pada tahun 2024. Selain itu di Indonesia sendiri, sektor manufaktur saat ini menjadi penopang pertumbuhan ekonomi utamanya pada sektor industri logam. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik nasional pada tahun 2017, menyatakan bahwa sektor industri logam tumbuh hingga 9,79% pada tahun 2016 dan meningkat menjadi 10,60 % pada triwulan 3 tahun 2017 (Perkembangan industri manufaktur BPS, 2017).

Wire Electrical Discharge Machining (Wire EDM) merupakan salah satu proses pemesinan non konvensional yang saat ini banyak diaplikasikan di industri-industri medis, pesawat, otomotif dan pembuatan cetakan. Proses *Wire EDM* menggunakan energi termal dari loncatan bunga api, akibat perbedaan tegangan antara elektroda dan benda kerja yang bersifat konduktor di dalam suatu media dielektrik. Perbedaan tegangan yang tinggi tersebut akan mengakibatkan loncatan bunga api panas yang melelehkan sebagian kecil dari benda kerja. Lelehan benda kerja tersebut akan membentuk geram yang akan dibawa keluar oleh aliran cairan dielektrik dan sebagian lain akan tertinggal di permukaan benda kerja membentuk lapisan *recast*.

Baja SKD 11 merupakan salah satu baja yang memiliki tingkat kekerasan tinggi dan banyak digunakan sebagai *tools* atau alat potong. Selain itu baja SKD 11

juga memiliki sifat tahan aus yang tinggi dan memiliki sifat mampu mesin yang baik. Proses pemesinan baja SKD 11 kecil kemungkinan dilakukan dengan pemesinan konvensional karena tingkat kekerasannya yang tinggi mencapai 58-63 HRC, sehingga proses *Wire EDM* adalah salah pilihan yang cocok. Baja SKD 11 umumnya digunakan sebagai pisau potong untuk memotong pelat sampai ketebalan 3 mm, cetakan *deep drawing*, *drawing cones*, *compression moulding dies* keramik dan untuk bahan cetakan pada *injection molding*.

Kinerja yang diharapkan dari proses *Wire EDM* adalah meminimalkan waktu proses pemakanan dengan kualitas permukaan hasil pemotongan yang baik. Variabel respons yang digunakan untuk mengetahui kinerja proses *Wire EDM* kali ini adalah MRR (*material removal rate*) dan lebar pemotongan (*kerf*), hal ini dikarenakan baja SKD 11 akan digunakan sebagai alat potong yang menuntut tingkat akurasi dimensi tinggi serta permukaan potong yang halus. Maka dari itu untuk mencapai proses *Wire EDM* yang optimal, sesuai dengan hasil yang diinginkan diperlukan pengendalian level parameter yang tepat.

Penelitian proses *Wire EDM* yang dilakukan oleh Purnomo (2015) dengan menggunakan baja *Buderus 2080* dan variasi respons MRR (*material removal rate*), lebar pemotongan, kekasaran permukaan dan tebal lapisan *recast*, pada hasil studinya menyatakan bahwa parameter *on time* berpengaruh sebesar 63,2 %, *open voltage* sebesar 14,19%, *servo voltage* sebesar 6,45% dan *arc on time* sebesar 4,00%. Hasil optimal pengendalian variabel proses pada *on time* 2 μ s, *open voltage* 75 volt, *servo voltage* 30 volt dan *arc on time* sebesar 1 ampere.

Penelitian tentang pengaruh *pulse on time*, *pulse off time* dan ketebalan bahan terhadap MRR (*material removal rate*) dan kekasaran permukaan pada baja EMS 45 telah dikakukan oleh Handoko (2010). Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 level ketebalan bahan meningkatkan nilai MRR sebesar 0.14 mm^3/s dan menurunkan angka kekasaran permukaan sebesar 0.005 μm . Untuk kenaikan 1 level parameter *pulse on* meningkatkan nilai MRR sebesar 0.054 mm^3/s dan kekasaran permukaan sebesar 0.028 μm . Sedangkan untuk kenaikan 1 level parameter *pulse off* akan menurunkan MRR sebesar 0.033 mm^3/s dan kekasaran permukaan sebesar 0.05 μm .

Pathya (2017) melakukan penelitian dengan menggunakan baja AISI D2 serta variabel respons yang digunakan yaitu *recast layer* dan kekasaran permukaan. Hasil studi menyatakan bahwa parameter *on time*, *open voltage* dan *wire speed* memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap optimasi *recast layer* dan kekasaran permukaan.

Berdasarkan beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diduga bahwa parameter kuat arus, voltase dan *wire speed* akan berpengaruh besar terhadap optimasi nilai kekasaran permukaan baja SKD 11, sehingga parameter tersebut layak digunakan sebagai parameter proses pada penelitian kali ini.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Berapa besar tingkat pengaruh variabel proses kuat arus, voltase dan *wire speed* terhadap MRR (*material removal rate*) dan lebar pemotongan (*kerf*) pada proses pemesinan *Wire EDM* baja SKD 11?
2. Bagaimana menentukan kombinasi variabel proses yang paling tepat, sehingga didapatkan nilai MRR (*material removal rate*) dan lebar pemotongan (*kerf*) yang optimal pada proses pemesinan *Wire EDM* baja SKD 11?
3. Bagaimana menentukan kombinasi variabel proses yang paling tepat untuk gabungan kedua respons, sehingga didapatkan *material removal rate* maupun lebar pemotongan (*kerf*) yang optimal pada proses pemesinan *Wire EDM* baja SKD 11?

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang diterapkan agar penelitian tidak keluar dari tujuan yang diinginkan serta untuk mempermudah analisa, antara lain :

1. Tidak membahas parameter proses selain kuat arus, voltase dan *wire speed*.
2. Variabel-variabel yang tidak diteliti dianggap konstan.
3. Tidak membahas sistem elektronika dan sistem kontrol yang digunakan pada proses pemesinan *Wire EDM*.

4. Tidak membahas perubahan sifat mekanik maupun struktur mikro bahan setelah proses pemesinan.
5. Diasumsikan mesin *Wire* EDM bekerja dalam kondisi baik dan layak digunakan.
6. Diasumsikan alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak guna dan terkalibrasi.
7. Tidak membahas tentang komponen biaya pada proses pemesinan.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.4.1 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan :

1. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variabel proses kuat arus, voltase dan *wire speed* terhadap MRR (*material removal rate*) dan lebar pemotongan pada proses pemesinan *Wire* EDM baja SKD 11.
2. Untuk mengetahui kombinasi variabel proses yang paling tepat, sehingga didapatkan nilai MRR (*material removal rate*) dan lebar pemotongan yang optimal pada proses pemesinan *Wire* EDM baja SKD 11.
3. Untuk mengetahui kombinasi variabel proses yang paling tepat, sehingga didapatkan respons gabungan (*material removal rate* dan lebar pemotongan) yang optimal pada proses pemesinan *Wire* EDM baja SKD 11.

1.4.2 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat digunakan sebagai bahan rujukan dalam menentukan parameter proses yang optimal, pada pemotongan baja SKD 11 dengan menggunakan mesin *Wire* EDM.
2. Dapat digunakan sebagai bahan referensi bagi operator dalam menentukan pengaturan variabel-variabel proses yang tepat, sehingga mampu menghasilkan luaran produk dengan tingkat laju pengerjaan benda kerja ketelitian dimensi yang tinggi serta waktu proses pemesinan yang lebih singkat.

3. Dapat digunakan sebagai referensi atau rujukan penelitian lanjutan untuk pengembangan proses pemesinan *Wire EDM* sehingga menghasilkan luaran yang lebih baik dari penelitian terdahulu.

1.5 Hipotesis

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian yang dilakukan sebelumnya, hipotesis penulis adalah variabel proses kuat arus, voltase dan *wire speed* berpengaruh terhadap perubahan MRR (*material removal rate*) dan ketelitian lebar pemotongan. Kombinasi nilai kuat arus dan *wire speed* serta voltase yang tinggi, maka akan meningkatkan nilai MRR (*material removal rate*). Selain itu kombinasi nilai kuat arus dan voltase yang rendah serta *wire speed* yang tinggi, maka akan meningkatkan akurasi lebar pemotongan. Sehingga lebar celah pemotongan dapat diminimalkan, sedangkan akurasi dimensi celah yang baik yaitu mendekati diameter kawat elektroda sebesar 0,25 mm.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Electrical Discharge Machine (EDM)*

Electrical Discharge Machine atau yang biasa disingkat dengan EDM merupakan salah satu dari sekian banyak proses pemesinan non-konvensional yang sistem kerjanya memanfaatkan energi panas. Energi panas yang timbul pada proses EDM merupakan hasil dari proses loncatan bunga api listrik akibat adanya perbedaan muatan di antara elektroda dan benda kerja. Energi panas yang timbul akibat dari loncatan bunga api akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja dan elektroda, yang kemudian terbawa keluar oleh cairan dielektrik yang berada pada celah di antara benda kerja dan elektroda. Besarnya kecepatan proses pemotongan benda kerja dipengaruhi oleh temperatur leleh dari material atau benda kerja. Energi panas yang dihasilkan oleh saluran plasma antara elektroda dan benda kerja, berkisar antara 8000°C sampai 12.000°C, dan dapat mencapai hingga suhu 20.000°C (Mahardika dan Mitsui, 2008). Hal ini sangat baik untuk proses pemotongan benda kerja yang memiliki kekerasan material sangat tinggi dan sulit atau bahkan tidak mampu dikerjakan dengan proses pemesinan konvensional.

Electrical discharge machining ditemukan ketika pada tahun 1770, seorang ilmuwan Inggris Joseph P. menemukan efek pengikisan dari percikan arus listrik. Ilmuan Rusia B. Lazarenko dan N. Lazarenko pada tahun 1943 berinovasi untuk memanfaatkan efek pengikisan dari percikan arus listrik untuk membuat suatu proses yang terkontrol dalam pemesinan secara elektrik dengan menggunakan bahan bersifat konduktor. Kemudian B. Lazarenko dan N. Lazarenko melakukan penyempurnaan proses tersebut dengan cara memberikan cairan non konduktor (cairan dielektrik) pada ruang yang mengalami loncatan bunga api listrik di antara dua konduktor (Widarto, 2008). Beberapa tahun terakhir mesin EDM telah diproduksi secara pesat dengan menggunakan teknologi yang lebih maju daripada milik Lazarenko.

Electrical Discharge Machine (EDM) memiliki beberapa keunggulan dibanding dengan proses pemesinan yang lain, di antara keunggulan tersebut antara lain adalah (Pandey dan Shan, 1980):

1. Memiliki kemampuan memotong benda kerja yang sangat keras, selama benda kerja bersifat konduktor.
2. Memiliki kemampuan memotong benda kerja dengan bentuk profil yang sangat kompleks dengan tingkat keakuratan ukuran dan kualitas permukaan yang sangat baik.
3. Elektroda dengan benda kerja tidak terjadi kontak fisik, sehingga benda kerja tidak mengalami *chatter* maupun deformasi mekanik.
4. Proses pemotongan dengan menggunakan energi termal dari proses ini tidak akan menurunkan kekuatan maupun sifat mekanik yang lainnya secara signifikan.
5. Hampir semua pekerjaan pada proses pemesinan konvensional dapat dilakukan dengan proses *wire* EDM.
6. Proses pengerjaan dilakukan secara otomatis menggunakan program CNC.

2.2 Klasifikasi Mesin EDM

Dalam perkembangannya mesin EDM memiliki banyak jenis, yang pada umumnya terbagi dalam 3 jenis yaitu EDM *sinking*, EDM *cutting* dan EDM *grinding*. Penggunaan dari setiap jenis EDM tergantung pada kebutuhan proses pemesinan yang dilakukan.

a. EDM *Sinking*

Pada umumnya mesin EDM *sinking* banyak digunakan pada proses pembuatan cetakan (*dies*), hasil pemotongan akan berbentuk sesuai dengan bentuk elektroda. Beberapa mesin EDM yang masuk dalam kategori EDM *sinking* antara lain:

- 1) EDM *drilling*
- 2) EDM *die sinking*

b. EDM *Cutting*

EDM *cutting* pada umumnya digunakan pada proses pemotongan benda kerja. Proses pemesinan EDM *cutting* hampir sama dengan proses pemesinan CNC, sehingga elektroda bergerak sesuai jalur pemotongan. Beberapa jenis mesin EDM yang termasuk kategori EDM *cutting* antara lain:

- 1) EDM *slicing* dengan elektroda berupa kepingan yang diputar (*rotary disc*).
- 2) EDM *slicing* dengan elektroda berupa pita metal (*ribbon*)
- 3) Wire EDM dengan elektroda berupa kawat logam.

c. EDM *Grinding*

Proses EDM *grinding* umumnya hanya digunakan untuk mengerosi bagian permukaan benda kerja, namun tak jarang proses EDM *grinding* dilakukan untuk membentuk suatu profil. Beberapa jenis mesin EDM yang termasuk dalam kategori EDM *grinding* antara lain:

- 1) Eksternal EDM *grinding*
- 2) Internal EDM *grinding*
- 3) *Form grinding* EDM

2.3 *Wire Electrical Discharge Machine (Wire EDM)*

Wire Electrical Discharge Machine (Wire EDM) mempunyai konsep dasar yang sama dengan proses pemesinan *Electrical Discharge Machine (EDM)*, hanya bedanya proses pemesinan *Wire EDM* menggunakan elektroda berupa kawat dengan ukuran diameter tertentu (umumnya berdiameter kecil di bawah 1 mm) yang digunakan untuk memotong benda kerja. Umumnya kawat elektroda yang digunakan adalah kawat kuningan atau menggunakan kawat kuningan berlapis material tertentu. Kawat elektroda pada umumnya dihubungkan pada kutub negatif sedangkan benda kerja dihubungkan pada kutub positif. Proses pemotongan *Wire EDM* yang terjadi pada benda kerja, merupakan akibat dari loncatan bunga api listrik yang muncul di antara celah benda kerja dan kawat elektroda (Purnomo, 2015). 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, yang mana loncatan bunga api tersebut akan

menyebabkan benda kerja menjadi terbentuk sesuai dengan arah gerak elektroda (Sigit Yoewono, 2002).



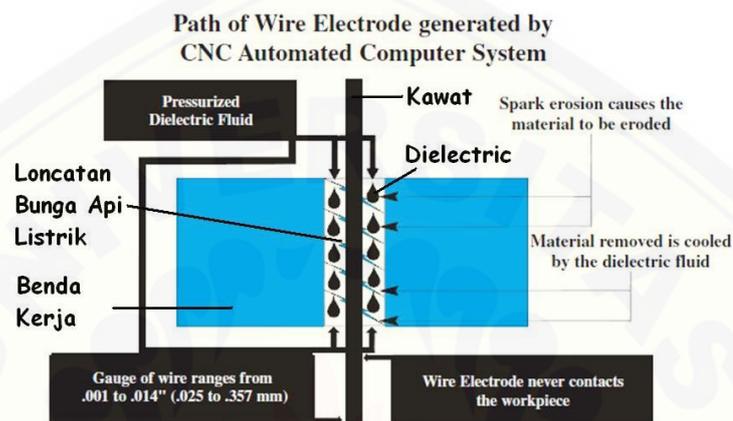
Gambar 2.1 Mesin WIRE EDM tipe DK7625P (Sumber : www.mitsubishielectric.com)

2.3.1 Proses Pemotongan dengan *Wire* EDM

Proses pemotongan *Wire* EDM menggunakan sebuah kawat elektroda (*electrode wire*) panas akibat adanya aliran energi listrik yang berubah menjadi energi panas. Hanya benda kerja yang bersifat konduktif yang mampu diproses dengan pemesinan *Wire* EDM, hal ini karena proses *Wire* EDM menggunakan listrik yang mana hanya dapat dilakukan dengan material yang memiliki sifat konduktor listrik. Energi *thermal* yang timbul pada kawat elektroda diakibatkan oleh arus DC yang terjadi di antara kawat elektroda dengan benda kerja. Proses ini sama dengan proses EDM lainnya di mana kawat elektroda sebagai kutub negatif dan benda kerja sebagai kutub positif, sehingga muatan listrik dari kutub positif akan bergerak menuju kutub negatif yang kemudian terjadi suatu loncatan bunga api dan pelelehan material.

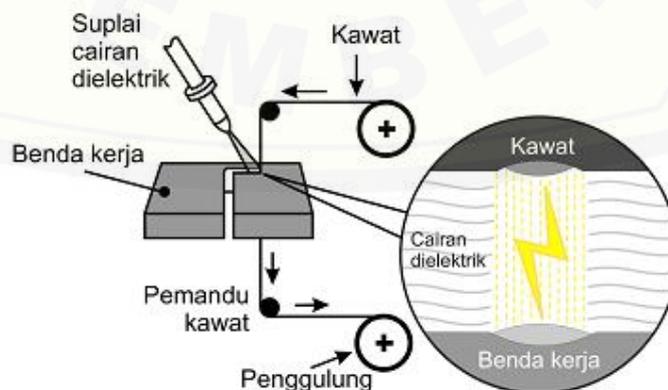
Antara kawat elektroda dan benda kerja terdapat suatu celah yang diisi oleh cairan terdeionisasi atau yang biasa disebut dengan cairan dielektrik. Cairan dielektrik mengandung mineral dan berfungsi sebagai insulator, hal tersebut akan menyebabkan kawat elektroda menjadi sangat konduktif. Untuk keperluan proses

pemesinan yang baik, konduktifitas cairan dielektrik diatur dengan proses sirkulasi cairan dielektrik pada sistem *Wire* EDM. Selain itu cairan dielektrik ini akan berfungsi sebagai pembawa kotoran hasil pelelehan benda kerja sehingga tidak mengotori benda kerja serta menjaga proses pemotongan berjalan dengan baik (Sigit Yoewono, 2002).



Gambar 2.2 Ilustrasi pemotongan *Wire* EDM (sumber :www.intellectualventureslab.com)

Pada saat sistem *Wire* EDM di aliri arus listrik, cairan dielektrik akan terdeionisasi. Selanjutnya muncul loncatan bunga api di antara kawat elektroda dan benda kerja, sehingga beberapa bagian kecil benda kerja menjadi terkikis. Bersamaan dengan proses tersebut cairan dielektrik dialirkan sebagai media pendinginan benda kerja serta untuk membersihkan hasil kikisan dari kawat elektroda maupun benda kerja.

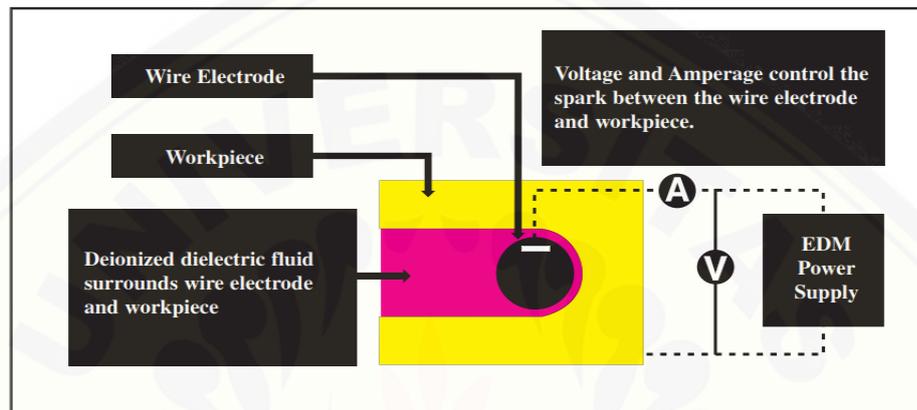


Gambar 2.3 Skema pemotongan pada sistem *Wire* EDM (sumber : Sigit Yoewono, 2002)

Langkah kerja pada proses pemotongan *Wire EDM* adalah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan sistem

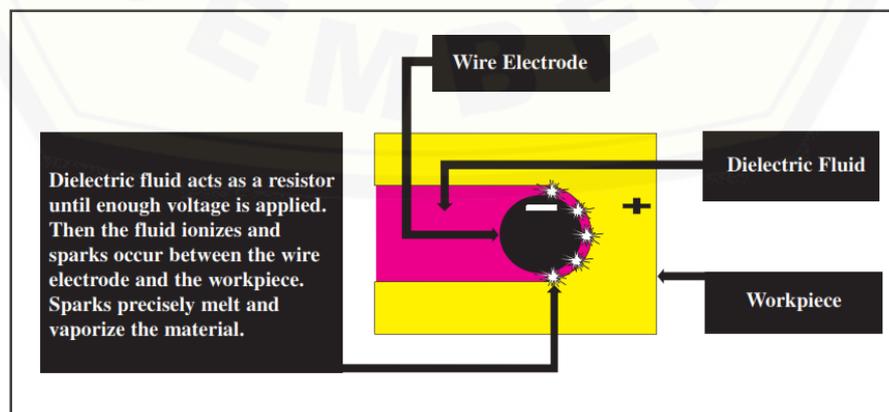
Arus listrik dibangkitkan oleh sumber tegangan sistem. Arus dialirkan menjadi 2 kutub. Kawat elektroda menjadi *anoda* (kutub negatif) sedangkan benda kerja menjadi *katoda* (kutub positif). Tahap ini juga terjadi proses deionisasi cairan dielektrik yang berguna untuk menghambat perpindahan muatan.



Gambar 2.4 Pembangkitan energi sistem *Wire EDM* (sumber : www.jacksmachine.com)

2. Loncatan bunga api listrik

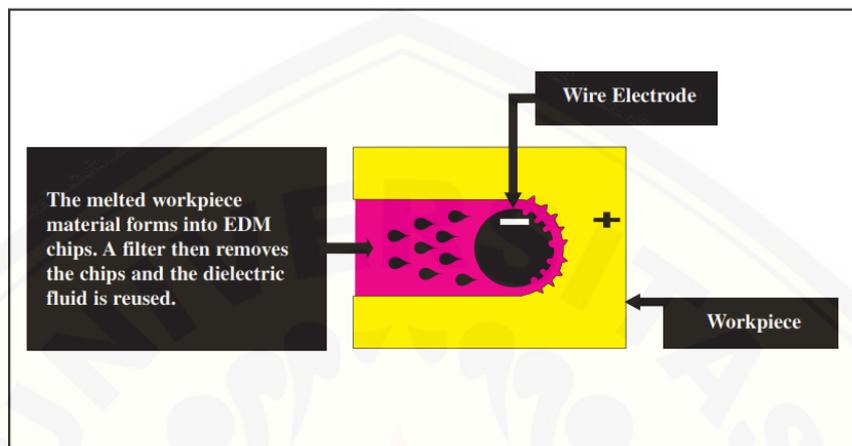
Setelah cairan dielektrik telah terionisasi sempurna maka akan terjadi loncatan bunga api listrik. Saat kawat elektroda berada cukup dekat dengan benda kerja akan terjadi loncatan bunga api (*on time*). Temperatur bunga api listrik yang sangat panas menyebabkan melelehnya sebagian kecil dari benda kerja dan juga kawat elektroda. Meledaknya selubung gas menyebabkan benda kerja dan kawat elektroda yang meleleh terpecah keluar dan membentuk geram.



Gambar 2.5 Proses loncatan bunga api listrik (sumber : www.jacksmachine.com)

3. Material terkikis menjadi geram

Benda kerja yang terkikis atau biasa disebut geram akan dibuang bersama dengan aliran cairan dielektrik. Cairan dielektrik yang telah digunakan akan diproses kembali dengan proses *filtering* agar dapat digunakan lagi.



Gambar 2.6 Proses pengikisan dan pembersihan (sumber : www.jacksmachine.com)

2.3.2 Parameter-parameter *Wire* EDM

Parameter atau variabel proses pada proses pemesinan *Wire* EDM berbeda-beda tergantung pada kemampuan mesin *Wire* EDM yang digunakan. Namun pada umumnya parameter besar arus, *pulse time*, voltase, *wire tension* selalu ada pada setiap mesin. Parameter-parameter yang dapat digunakan pada proses pemesinan *Wire* EDM menurut *Instruction Manual Book Wirecut EDM Mitsubishi BA8* adalah sebagai berikut:

a. *Power supply* (PS)

Power supply merupakan variabel yang digunakan untuk mengatur besarnya *power* atau tenaga sistem yang akan digunakan, di mana terdapat 3 macam mode *power supply* yaitu mode KH, mode RL dan mode LC.

b. *Open voltage* (OV)

Open voltage merupakan variabel yang digunakan untuk mengatur besarnya tegangan antara benda kerja dan kawat elektroda selama proses pemesinan *Wire* EDM.

c. *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.

d. *Power setting* (IP)

Power setting merupakan variabel yang mengatur jenis sumber energi pemotongan (AC atau DC) dan besarnya energi tersebut. Untuk hasil yang maksimal pada umumnya digunakan sumber tegangan DC.

e. *Wire speed* (WS)

Wire feed merupakan variabel yang digunakan untuk mengatur kecepatan pemakanan benda kerja oleh kawat elektroda dengan mengatur laju perpindahan atau pergerakan elektroda terhadap benda kerja.

f. *Servo voltage* (SV)

Servo voltage adalah variabel yang digunakan untuk menentukan respons 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*.

g. *Wire tension* (WT)

Wire tension merupakan variabel yang digunakan untuk mengatur ketegangan kawat elektroda. Ketegangan kawat elektroda dapat mempengaruhi hasil pemotongan, semakin tegang akan semakin baik hasil pemotongan namun tegangan kawat yang tinggi dapat menyebabkan kawat elektroda putus.

h. *Voltage gap* (VG)

Voltage gap merupakan variabel yang digunakan untuk menyesuaikan voltase pada celah antara elektroda dan benda kerja. *Voltage gap* diperlukan agar tidak terjadi *short circuit* pada saat proses pemotongan.

i. *Feedrate address* (FA) dan *feedrate*

Feedrate address merupakan variabel yang digunakan untuk memilih kecepatan pemakanan *servo* atau kecepatan pemakanan konstan, sedangkan *feedrate* adalah variabel yang digunakan untuk menentukan besarnya kecepatan pemakanan yang konstan.

j. *Flow balanced* (FB) dan *Liquid quantity* (LQ)

Flow balance merupakan variabel yang digunakan untuk mengatur tekanan *flushing* dari *upper* dan *lower nozzle*, sehingga aliran fluida dielektrik dapat diatur sesuai dengan keinginan. Sedangkan *liquid quantity* merupakan variabel untuk mengatur banyaknya cairan yang digunakan pada proses pemotongan.

2.3.3 Kawat Elektroda *Wire* EDM

Kawat elektroda yang digunakan pada proses pemesinan *Wire* EDM, pada umumnya menggunakan bahan kuningan. Kawat elektroda akan disuplai secara terus-menerus dari gulungan kawat atau spul. Kawat elektroda akan bergerak dalam sumbu x dan y, yang pada umumnya dikontrol dengan menggunakan CNC. Selain itu hampir semua mesin *Wire* EDM modern saat ini, kawat elektroda dapat bergerak secara independen pada sumbu z, x maupun y, sehingga memiliki kemampuan memotong bentuk kompleks. Dengan menggunakan kontrol CNC membuat proses pemesinan *Wire* EDM memiliki kemampuan untuk memotong benda kerja dengan kontur sangat rumit dan bentuk yang kompleks. Gerakan kawat elektroda yang dikontrol dengan menggunakan program CNC pada umumnya memiliki tingkat akurasi dimensi sebesar $\pm 0,02$ mm dan akan menghasilkan kehalusan permukaan $Ra < 13 \mu\text{m}$. Semakin kecil diameter kawat maka hasil permukaan yang diperoleh semakin halus (Sigit Yoewono, 2007).

Seiring dengan toleransi yang lebih ketat pada proses pemesinan *multi axis*, membuat mesin *Wire* EDM mempunyai beberapa kemampuan lebih seperti *multiheads* yang digunakan untuk memotong dua sisi secara bersamaan. Selain itu ditambahkan kemampuan mengontrol elektroda, serta fitur *threading* secara otomatis untuk mengatasi masalah kerusakan elektroda.

Jenis-jenis *Wire* EDM adalah sebagai berikut (Guitrau, 1991):

1. Kawat Tembaga (*Copper Wire*)

Jenis elektroda ini biasanya terbuat dari material tembaga murni dan pada umumnya digunakan dalam tahap awal pada proses *Wire* EDM. Elektroda kawat tembaga mempunyai ciri-ciri sebagai berikut

- Kemampuan tarik rendah dengan tingkat memulur yang tinggi, dapat menyebabkan risiko kerusakan kawat yang tinggi.
- Kondisi *flushing* yang minimal akibat dari penguapan pada suhu tinggi.
- Laju pemotongan lamban akibat dari konduktivitas bahan kawat yang tinggi.
- Pelelehan pada daerah HAZ lamban dan memiliki efisiensi yang kurang akibat adanya kalor yang terserap oleh kawat.

2. Kawat Kuningan (*Brass Wire*)

Elektroda kawat kuningan merupakan paduan dari tembaga (Cu) dan seng (Zn). Pada umumnya, kawat ini memiliki persentase Zn yang tinggi sehingga baik untuk proses pemesinan *Wire* EDM. Elektroda kawat kuningan mempunyai ciri-ciri sebagai berikut :

- Rasio paduan tembaga dan seng antara 65/35 sampai dengan 63/37, dengan kekuatan tarik maksimal 50,000 psi hingga 145,000 psi.
- Kemampuan tarik yang lebih baik dibandingkan *copper wire*
- Proses *flushing* dapat terjadi dengan baik, karena temperatur penguapan kawat kecil.

3. Kawat Kuningan Lapis Seng (*Zinc Coated Brass Core Wire*)

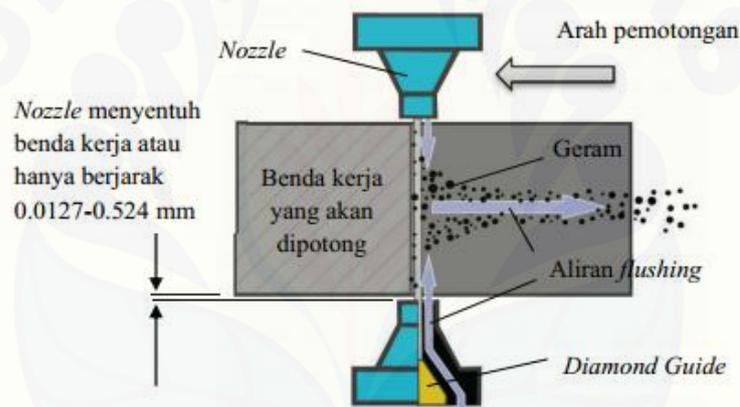
Zinc coated brass wire adalah kawat elektroda yang terbuat dari kuningan dan dilapisi oleh seng (Zn). Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan yang membutuhkan kecepatan pemotongan yang tinggi dan benda kerja yang tebal.

4. Kawat Tembaga Lapis Seng (*Zinc Coated Copper Core Wire*)

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

2.3.4 Mekanisme Pembuangan Geram

Pembuangan material sisa hasil pemotongan atau yang bisa disebut dengan geram (*flushing*) merupakan salah satu proses yang harus dilakukan para proses pemesinan *Wire EDM*, hal ini bertujuan agar material sisa tidak mengganggu proses pemotongan bahan selanjutnya. Proses ini dilakukan oleh cairan dielektrik yang mengalir dari dua buah *nozzle* yang berada di bagian atas dan bawah benda kerja. Pembilasan geram yang tidak sempurna akan dapat menyebabkan terjadinya penimbunan geram yang dihasilkan. Penimbunan geram tersebut akan menyebabkan loncatan bunga api menjadi tidak teratur sehingga dapat menyebabkan kawat elektroda putus (Purnomo, 2015). Proses *fluhsing* pada pemesinan *Wire EDM* ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.7 Mekanisme pembuangan geram (Sumber : Purnomo, 2015)

2.4 Material Removal Rate (MRR)

Material Removal Rate atau biasa disebut dengan laju pengerjaan bahan adalah jumlah volume benda kerja yang terbuang pada saat proses pemotongan setiap satuan waktu. Parameter tegangan gap, kuat arus dan durasi pulsa adalah parameter pemesinan yang mempengaruhi ukuran *material removal rate* (Bobbili, 2015). *Material Removal Rate* pada proses pemesinan *Wire EDM* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

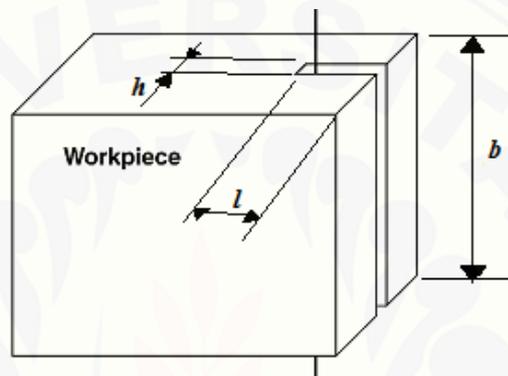
$$MRR = \frac{\text{volume material terbuang}}{\text{waktu pemotongan}} \quad (2.1)$$

$$MRR = \frac{b \times l \times h}{t}$$

Keterangan :

- b : tebal benda kerja (mm)
- h : lebar pemotongan (mm)
- l : panjang pemotongan (mm)
- t : waktu pemotongan (min)

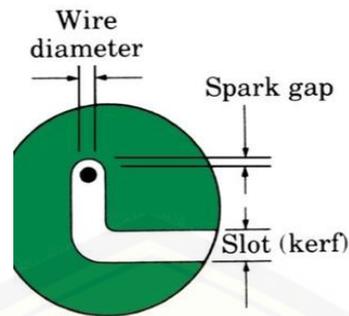
Perhitungan MRR secara sederhana ditunjukkan pada gambar berikut ini :



Gambar 2.8 Skema volume benda kerja yang terbuang saat pemotongan

2.5 Lebar Pemotongan Bahan (*Kerf*)

Lebar Pemotongan Bahan atau yang biasa disebut dengan *kerf*, adalah celah yang ditimbulkan akibat dari pemotongan oleh kawat elektroda, celah ini merupakan salah satu bagian terpenting pada proses *Wire EDM*. Benda kerja pada proses *Wire EDM* merupakan kutub positif sedangkan kawat elektroda merupakan kutub negatif yang dipisahkan oleh celah (*gap*) yang dikontrol secara kontinu agar jarak *gap* tetap terjaga. Celah tersebut diisi oleh cairan dielektrik yang berfungsi sebagai pendingin, dan pembilas yang bertugas untuk menghilangkan partikel-partikel yang terkikis (geram) di daerah pemotongan (Purnomo, 2015).



Gambar 2.9 Proses pembentukan *kerf* pada *Wire* EDM (Kanekar dan Meshram, 2015)

Ukuran celah atau *kerf* diatur oleh sistem kontrol servo agar tidak terjadi kontak fisik antara kawat elektroda dengan benda kerja yang dapat menyebabkan *short circuit* (Purnomo, 2015). Lebar celah yang dihasilkan lebih besar dari diameter elektroda kawat yang digunakan seperti ditunjukkan pada gambar 2.9. Lebar *kerf* sedapatnya dapat mendekati ukuran diameter kawat elektroda sehingga meminimalkan penyimpangan pemotongan (*overcut*). *Overcut* yang semakin kecil akan menjadikan kualitas pemotongan semakin baik, namun hal ini akan memerlukan waktu pemotongan yang lebih lama. Untuk mengetahui hasil penyimpangan pemotongan dapat dihitung dengan rumus :

$$Overcut = \frac{kerf - \varnothing \text{ kawat elektroda}}{2} \quad (2.2)$$

Keterangan :

Overcut = Penyimpangan ukuran (mm)

Kerf = Lebar pemotongan (mm)

2.6 Desain Eksperimen

2.6.1 Metode *Taguchi*

Metode *Taguchi* merupakan salah satu metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk atau proses, selain itu metode ini dapat digunakan untuk menekan sumber daya dan biaya seminimal mungkin. Metode *Taguchi* merupakan metode perancangan yang berprinsip pada perbaikan mutu dengan memperkecil akibat dari variasi tanpa menghilangkan penyebabnya. Hal ini diperoleh dengan mengoptimalkan produk luaran atau proses perancangan

yang tangguh terhadap adanya variasi pada suatu proses. Metode *Taguchi* akan digunakan untuk mencapai tujuan tersebut dengan menjadikan produk ataupun proses menjadi tidak peka terhadap berbagai faktor gangguan, seperti bahan baku, perlengkapan produksi dan manufaktur, sumber daya manusia serta kondisi-kondisi lain. Metode *Taguchi* akan menjadikan produk atau proses memiliki sifat yang kuat dan kokoh terhadap faktor-faktor gangguan tersebut.

Metode *Taguchi* menggunakan pendekatan desain eksperimen yang mampu membuat suatu proses menjadi kokoh terhadap kondisi lingkungan. Selain itu metode *Taguchi* mampu mengembangkan mutu produk yang kokoh terhadap variasi elemen, sasaran serta tujuannya. Metode *Taguchi* mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan beberapa metode desain eksperimen lainnya. Keunggulan tersebut antara lain adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

1. Dapat memperoleh suatu proses yang mampu memunculkan luaran produk yang konsisten dan tangguh terhadap variabel-variabel gangguan.
2. Lebih efisien dibanding metode lain, karena penelitian dilaksanakan dengan melibatkan banyak variabel-variabel proses dan juga menggunakan banyak level.
3. Dapat menghasilkan kesimpulan mengenai level dari variabel proses yang menunjukkan respons optimum.

Selain memiliki beberapa keunggulan, namun metode *Taguchi* memiliki struktur rancangan eksperimen yang sangat rumit sehingga penentuan rancangan eksperimen harus dilakukan secara cermat dan sesuai dengan tujuan yang diharapkan. Desain eksperimen adalah proses melakukan penilaian pada dua variabel proses atau lebih secara serempak terhadap upayanya dalam mempengaruhi keragaman hasil gabungan dari kualitas produk atau suatu proses tertentu. Agar tercapai secara efektif dan efisien, variabel proses dan level variabelnya dibuat beragam, yang selanjutnya hasil dari kombinasi variabel dapat diamati secara utuh dan juga dapat dianalisis dengan sempurna. Hasil analisis ini selanjutnya dapat digunakan untuk menjelaskan variabel-variabel proses yang memiliki pengaruh serta tindakan apa yang dapat dilakukan guna perbaikan lebih lanjut (Purnomo, 2105).

2.6.2 Rancangan Percobaan *Taguchi*

Rancangan *Taguchi* pada umumnya terbagi dalam dua tahap pokok, yang di dalamnya tercakup semua pendekatan penelitian. Tahapan-tahapan pokok tersebut adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009) :

a. Tahap Perencanaan Penelitian

Tahap perencanaan penelitian merupakan utama dan menjadi tahap penting, dikarenakan seorang peneliti harus mengetahui dengan cermat dan jelas penelitian apa yang akan dilakukan berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu. Kecermatan yang dilakukan oleh peneliti, akan menghasilkan luaran penelitian yang bermanfaat serta informasi afirmatif atau non afirmatif. Informasi afirmatif akan terjadi jika hasil penelitian memberikan tanda-tanda yang mengarah terhadap peningkatan performansi produk atau proses. Informasi non afirmatif akan terjadi jika hasil penelitian gagal memberikan tanda-tanda tentang variabel tahu faktor yang dapat mempengaruhi respons. Berikut ini adalah langkah-langkah dalam perencanaan penelitian:

1) Perumusan masalah

Rumusan masalah yang dibuat harus jelas dan terarah serta spesifik pada tujuan yang akan dicapai. Rumusan masalah harus dapat diaplikasikan ke dalam penelitian yang akan dilakukan. Selain itu pada tahapan ini peneliti harus menentukan tujuan optimalisasi dari penelitian yang dilakukan, dan menentukan karakteristik respons.

2) Penentuan tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian adalah menjawab dari permasalahan, sehingga tujuan yang ditentukan harus dapat menjawab perumusan masalah yang telah dibuat.

3) Penentuan variabel respons

Berdasarkan dari penelitian yang telah dilakukan, maka seorang peneliti dapat menentukan variabel respons yang diinginkan. Variabel respons memiliki nilai yang sangat dipengaruhi oleh variabel-variabel yang lain yaitu variabel proses dan variabel gangguan, sehingga variabel respons disebut juga sebagai variabel tak bebas.

4) Penentuan variabel proses

Variabel proses merupakan variabel yang nilainya tidak bergantung pada variabel lain, dan variabel ini dapat ditentukan oleh peneliti. Variabel - variabel yang diduga berpengaruh terhadap variabel respons yang dipilih akan ditentukan pada tahapan ini. Tidak semua variabel yang diduga memiliki pengaruh terhadap respons harus diselidiki. Sehingga penelitian dapat dilakukan dengan efektif dan efisien.

5) Pemisahan variabel proses dan variabel gangguan

Variabel-variabel yang akan diamati terbagi menjadi dua bagian yaitu, variabel proses dan variabel gangguan. Desain eksperimen *Taguchi* mengharuskan kedua variabel diidentifikasi secara jelas, karena pengaruh antara kedua variabel tersebut memiliki perbedaan. Perbedaan tersebut yaitu pada variabel proses ukurannya dapat dikendalikan, sedangkan pada variabel gangguan ukurannya tidak dapat dikendalikan.

6) Penentuan banyaknya level dan nilai level

Menentukan banyaknya level akan berpengaruh terhadap akurasi hasil serta ongkos penelitian. Artinya banyaknya level yang diteliti akan berbanding lurus dengan hasil penelitian, semakin banyak level semakin akurat hasilnya. Namun semakin banyak level akan menambah ongkos penelitian.

7) Derajat kebebasan

Derajat kebebasan digunakan untuk menggambarkan seberapa besar variabel penelitian yang akan digunakan serta seberapa banyak hasil penelitian yang dapat ditunjukkan. Penentuan derajat kebebasan dilakukan untuk memperkirakan seberapa banyak penelitian yang harus dilakukan untuk menyelidiki variabel proses. Derajat kebebasan ortogonal *array* (v_{mo}) dapat ditentukan dengan persamaan di bawah ini :

$$v_{mo} = \text{jumlah percobaan} - 1 \quad (2.3)$$

Sedangkan derajat bebas variabel proses dan level (v_{fl}) dapat ditentukan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$v_{fl} = \text{jumlah level variabel proses} - 1 \quad (2.4)$$

8) Pemilihan ortogonal *array*

Pemilihan ortogonal *array* yang tepat dan sesuai, ditentukan berdasarkan derajat bebas variabel proses serta banyaknya level. Matriks ortogonal atau ortogonal *array* mampu mengulas semua variabel proses dengan jumlah percobaan yang seminimal mungkin. Umumnya ortogonal *array* ditulis dengan format seperti di bawah ini:

$$\text{Orthogonal Array} = L_a (b^c) \quad (2.5)$$

Keterangan :

L = rancangan bujur sangkar latin atau matriks

a = banyaknya percobaan

b = banyaknya level

c = banyaknya faktor atau variabel proses

Metode *Taguchi* telah menentukan tabel *orthogonal array* yang harus digunakan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Umumnya untuk dua level dan kelipatan genap digunakan tabel *orthogonal array* L4, L8, L12, L16, dan L32 dan seterusnya. Sedangkan untuk tiga level atau level ganjil digunakan tabel *orthogonal array* yang terdiri dari L9, L18, L27 dan seterusnya. Penentuan jenis *orthogonal array* akan digunakan didasarkan pada nilai derajat bebas total. Penentuan derajat bebas berdasarkan beberapa hal berikut ini:

- a) banyaknya faktor utama yang diamati dan interaksi
- b) banyaknya level dari faktor-faktor yang diamati
- c) Tingkat akurasi percobaan atau batasan biaya penelitian

Matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ adalah salah satu contoh matriks ortogonal standar. Matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Ortogonal Array $L_9 (3^3)$

Percobaan	Parameter Proses		
	Faktor A	Faktor B	Faktor C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Sumber: Soejanto, 2009

b. Tahap Pelaksanaan

Tahap ini terdiri dari dua bagian, yaitu menentukan banyaknya pengulangan atau replikasi serta pengacakan pada saat pelaksanaan percobaan.

1) Banyaknya replikasi

Replikasi merupakan proses mengulang kembali dengan perlakuan yang sama pada kondisi yang sama pula dalam sebuah eksperimen untuk menghasilkan akurasi yang lebih baik, menurunkan tingkat penyimpangan serta mendapatkan nilai perkiraan kesalahan.

2) Pengacakan

Pengaruh variabel-variabel lain atau variabel gangguan selalu ada dalam sebuah penelitian. Pengaruh itu dapat diturunkan dengan melakukan proses pengacakan urutan percobaan. Secara umum tujuan dari proses pengacakan antara lain sebagai berikut:

- a) Meratakan pengaruh variabel gangguan yang muncul di setiap percobaan.
- b) Agar setiap bagian percobaan mendapatkan perlakuan yang sama, sehingga terjadi keseragaman pengaruh.
- c) Mendapatkan hasil percobaan yang tidak terikat satu dengan lainnya. Apabila pada proses pengulangan bertujuan untuk dilakukannya uji

signifikansi dengan akurasi yang baik, maka pengacakan memiliki tujuan untuk memberikan pembuktian (*valid*) terhadap uji signifikansi dengan mengesampingkan penyimpangan yang muncul.

c. Tahap Pengolahan Data dan Analisis

Tahap ini dilakukan dua hal utama, yaitu pengumpulan dan pengolahan data. Setelah dilakukan pengumpulan data, selanjutnya dilakukan penyusunan data, proses penghitungan serta dilakukan penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan rancangan percobaan yang ditentukan. Proses perhitungan dan pengujian data juga dilakukan pada tahapan ini.

1) *Signal to Noise Ratio (S/N Ratio)*

Signal to Noise Ratio atau yang biasa disingkat *S/N Ratio* berfungsi untuk mengetahui variabel-variabel proses yang memiliki peran dalam mengurangi variansi, mengetahui level variabel proses mana yang berpengaruh terhadap hasil eksperimen dan meminimalkan karakteristik kualitas terhadap variabel gangguan. Apabila tujuannya adalah untuk mengoptimalkan respons, maka tindakan yang perlu dilakukan yaitu mencari kombinasi variabel proses dengan nilai *S/N Ratio* terbesar di setiap levelnya. Kriteria atau ukuran *S/N Ratio* yang umumnya digunakan dalam mengoptimalkan persoalan statistik yaitu:

a) Semakin kecil semakin baik (*smaller the better*)

Semakin kecil semakin baik atau *smaller the better* merupakan karakter yang memiliki limit nilai nol dan bukan nilai negatif, sehingga nilai yang diinginkan adalah nilai yang semakin kecil atau mendekati nol. *S/N Ratio* untuk karakter kualitas *smaller the better* dirumuskan menggunakan persamaan berikut (Park, 1996):

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2.6)$$

Keterangan:

n = banyaknya data

y = data respons pengamatan ke – i

b) Tertuju pada nilai tertentu (*nominal the best*)

Nominal the best merupakan karakteristik kualitas dengan target tidak nol dan terbatas pada nilai tertentu. Sehingga nilai yang baik dan diinginkan peneliti adalah nilai yang mendekati target, sebagai contoh adalah untuk mendapatkan dimensi suatu produk yang sudah ditetapkan. *S/N Ratio* untuk karakter kualitas *nominal the best* dirumuskan menggunakan persamaan berikut (Park, 1996):

$$S/N \text{ ratio} = 10 \log \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \quad (2.7)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$$

Keterangan:

n = jumlah data

y = data respons pengamatan ke - i

μ = rata-rata

σ = standar deviasi

c) Semakin besar semakin baik (*larger the better*)

Semakin besar semakin baik atau *larger the better* merupakan karakteristik kualitas yang kontinu dan bukan nilai negatif, dengan nilai target 0 hingga nilai yang dituju. Sehingga nilai yang diharapkan adalah nilai yang sebesar mungkin. *S/N Ratio* untuk karakteristik kualitas *larger the better* dirumuskan menggunakan persamaan berikut (Park, 1996):

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2.8)$$

Keterangan:

n = jumlah data

y = data respons pengamatan ke - i

2) Analisis Variansi (ANOVA)

ANOVA atau analisis varian merupakan suatu metode atau cara yang digunakan untuk menentukan besar kecilnya pengaruh dari masing-masing parameter terhadap proses. Besar kecilnya pengaruh akan diketahui dengan membandingkan nilai jumlah kuadrat (*sum of square*) dari satu parameter terhadap keseluruhan parameter yang digunakan. Analisis varian dilakukan dengan menjabarkan semua keragaman yang ada atas unit-unit yang diteliti. Analisis varian juga melakukan pengklasifikasian data hasil percobaan menurut statistik yang sesuai dengan sumber keragaman, sehingga mampu menunjukkan pengaruh dari setiap variabel proses. Analisis variansi terbagi menjadi dua macam, yaitu analisis variansi satu arah dan dua arah. Analisis satu arah digunakan bila hanya ada 1 lever dengan 1 respons, sedang analisis dua arah digunakan apabila terdapat dua variabel proses atau lebih dengan dua level atau lebih. Analisis variansi dua arah pada metode *Taguchi* adalah data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua taraf atau lebih (Soejanto, 2009). Beberapa perhitungan atau rumus yang digunakan pada analisis variansi antara lain sebagai berikut :

a) Jumlah kuadrat total (SS_T)

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.9)$$

b) Jumlah kuadrat rata-rata/*mean* (SS_M)

$$\begin{aligned} SS_m &= n \bar{y}^2 \\ &= n \left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

c) Jumlah kuadrat faktor A (SS_A)

$$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (y_{Ai} - \bar{y})^2 \quad (2.11)$$

d) Jumlah kuadrat faktor B (SS_B)

$$SS_B = n_B \sum_{i=1}^n (y_{Bi} - \bar{y})^2 \quad (2.12)$$

e) Jumlah kuadrat faktor C (SS_C)

$$SS_C = n_C \sum_{i=1}^n (y_{Ci} - \bar{y})^2 \quad (2.13)$$

f) Jumlah kuadrat eror (SS_E)

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C \quad (2.14)$$

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C \quad (2.15)$$

Berikut ini adalah tabel ANOVA dua arah yang terdiri dari perhitungan *sum of square*, *defree of freedom*, *mean square* dan *F-Ratio* :

Tabel 2.2 Tabel analisis variansi (ANOVA)

Sumber Variasi	Sum of Square (SS)	Degree of freedom (df)	Mean Square (MS)	F ratio (F_0)
Variabel Proses A	$SS_A = nA \sum_{i=1}^n (y_{Ai} - \bar{y})^2$	dA - 1	$MS_A = \frac{SS_A}{df A}$	$\frac{MS_A}{MSE}$
Variabel Proses B	$SS_B = nB \sum_{i=1}^n (y_{Bi} - \bar{y})^2$	dB - 1	$MS_B = \frac{SS_B}{df B}$	$\frac{MS_B}{MSE}$
Variabel Proses C	$SS_C = nC \sum_{i=1}^n (y_{Ci} - \bar{y})^2$	dC - 1	$MS_C = \frac{SS_C}{df C}$	$\frac{MS_C}{MSE}$
Residual	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C$	Df - df A - df B - df C	$MSE = \frac{SSE}{df E}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	n - 1		

Sumber : Ross, 2008

Keterangan :

dA = jumlah level variabel proses A

nB = replikasi level variabel B

dB = jumlah level variabel proses B

nC = replikasi level variabel C

dC = jumlah level variabel proses C

\bar{y} = rata-rata keseluruhan

nA = replikasi level variabel A

n = total percobaan

3) Persen Kontribusi

Persen kontribusi adalah porsi setiap faktor dan atau interaksi antar faktor yang berpengaruh signifikan terhadap total keragaman yang diamati. Persen kontribusi merupakan fungsi jumlah kuadrat atau *sum of squares* dari setiap faktor yang berpengaruh signifikan. Selain itu persen kontribusi juga

mampu menggambarkan kekuatan masing-masing faktor dan atau interaksi antar faktor dalam upaya mereduksi variansi atau keragamannya. Besarnya persen kontribusi *error* diharapkan kurang dari 15%, hal ini bertujuan agar tidak adanya suatu faktor atau parameter proses berpengaruh terhadap respons yang diabaikan. Nilai MS pada analisis variansi untuk suatu faktor seperti misalkan faktor A sesungguhnya adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009) :

$$MS_A = MS'_A + MS_e \quad (2.16)$$

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A} \quad (2.17)$$

$$SS'_A = SS_A - (df_A \times MSe) \quad (2.18)$$

SS'_A merupakan jumlah kuadrat atau *sum of squares* nyata dari faktor A, df_A merupakan derajat bebas faktor A, sedangkan MSe perlu ditambahkan karena merupakan suatu error yang harus diperhitungkan. Nilai persen kontribusi sebagai persentase dari *sum of squares* nyata dari suatu faktor terhadap *sum of squares total* (SS_T) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\rho_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (2.19)$$

4) Uji Hipotesis dengan Nilai F

Proses pengujian hipotesis dengan nilai F dapat dilakukan dengan membandingkan keragaman atau variansi dari setiap faktor dan keragaman errornya. Keragaman error merupakan keragaman di masing-masing pengamatan yang muncul akibat dari faktor gangguan atau faktor yang tidak dapat dikendalikan. Nilai F hitung dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$F_{hitung} = \frac{\text{Mean Square faktor (A, B, C)}}{\text{Mean Square Error}} \quad (2.20)$$

Nilai F_{hitung} hasil perhitungan kemudian dibandingkan nilai F dari tabel pada harga *level of significant* (α) tertentu dengan derajat bebas [(df_{faktor});(df_{error})]. Secara umum, pengujian hipotesis ini digunakan pada variabel proses yang tidak diambil secara acak, dan dijabarkan sebagai berikut:

H_0 = perbedaan level tidak berpengaruh, sehingga $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j = \mu_k$

H_1 = ada pengaruh, atau sedikitnya ada satu μ yang tidak sama dengan μ lainnya.

Setelah dibandingkan maka akan diketahui hipotesis mana yang akan diterima maupun ditolak. Hipotesis H_0 akan diterima jika nilai F_{hitung} lebih kecil nilai F_{tabel} ($F_{hitung} < F_{tabel}$). Namun H_0 ditolak jika nilai F_{hitung} lebih besar dari nilai F_{tabel} ($F_{hitung} > F_{tabel}$).

Jika menggunakan perangkat lunak statistik, menolak H_0 dilakukan jika P value lebih besar daripada α (taraf signifikansi). Pada uji hipotesis ini ditentukan taraf signifikansi atau *level of signifikan* (α) adalah 0,05 atau dengan tingkat kepercayaan 95%.

5) Perkiraan Respons Optimum

Nilai prediksi respons yang paling optimum kombinasi parameter proses pada setiap level dapat diketahui menggunakan persamaan di bawah ini (Lin dan Lin, 2002):

$$\mu = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\gamma_i - \gamma_m) \quad (2.21)$$

Keterangan:

γ_m = nilai rata-rata dari keseluruhan *S/N Ratio*

γ_i = rata-rata *S/N Ratio* kondisi level optimal

q = banyaknya variabel yang berpengaruh signifikan

6) Interval Keyakinan pada Prediksi Kondisi Optimum

Interval keyakinan pada kondisi optimum prediksi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Ross, 2008):

$$CI_P = \sqrt{\frac{F_{(\alpha,1,dfE)} MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.22)$$

Keterangan:

n_{eff} = banyaknya pengamatan efektif

$$n_{eff} = \frac{\text{Jumlah total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat bebas dalam perkiraan rata-rata}} \quad (2.23)$$

μ = rata-rata *S/N Ratio* prediksi pada kondisi optimum

2.6.3 Optimasi Multi Respons Menggunakan Pendekatan *Grey Relational Analysis*

Grey Relational Analysis diambil berdasarkan teori *grey*, yang merupakan hasil penggabungan dua informasi, yaitu informasi yang pasti dan tidak pasti. Sebagai contoh warna hitam diibaratkan sebagai informasi yang tidak pasti atau belum tuntas informasinya. Sedang warna putih diibaratkan sebagai informasi yang benar-benar pasti dan jelas. Namun kadang kala informasi bisa saja berada di antara warna hitam dan warna putih yang dikenal dengan warna abu-abu (*grey*), yaitu informasi yang memiliki beberapa hal yang pasti dan juga hal yang tidak pasti (Balasubramanian dan Ganapathy, 2011). Tahapan dalam melakukan analisis menggunakan pendekatan GRA adalah sebagai berikut:

1. Menentukan dan menghitung *S/N Ratio*

Tahap pertama yang dilakukan dalam proses pendekatan dengan *Grey Relational Analysis* adalah menentukan *S/N Ratio*. Terdapat 3 kriteria dalam menghitung *S/N Ratio*, semuanya telah dijelaskan pada bagian awal. Persamaan dalam *S/N Ratio* telah dijabarkan pada persamaan 2.6 hingga persamaan 2.8.

2. Melakukan normalisasi *S/N Ratio*

Normalisasi *S/N Ratio* bertujuan untuk mentransformasikan *S/N Ratio* sehingga bernilai antara 0 sampai dengan 1. Normalisasi *S/N Ratio* dapat dihitung dengan persamaan 2.24 berikut ini:

$$x_i^*(j) = \frac{x_i(j) - \min x_i(j)}{\text{maks } x_i(j) - \min x_i(j)} \quad (2.24)$$

Keterangan :

$x_i^*(j)$ = nilai normalisasi *S/N Ratio* percobaan ke-i pada respons ke-j

$x_i(j)$ = nilai *S/N Ratio* percobaan ke-i pada respons ke-j

i = banyaknya percobaan

j = banyaknya respons

3. Menghitung nilai delta

Nilai delta adalah jarak dari $\Delta_{0i}(j)$ yang merupakan nilai mutlak dari perbedaan X_0 dan X_i pada titik j. Nilai delta dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2.25 berikut ini :

$$\Delta_{0i}(j) = |x_0^*(j) - x_i^*(j)| \quad (2.25)$$

Keterangan:

$x_0^*(j) = 1$ (diinversikan = 1, nilai paling besar normalisasi *S/N Ratio*.)

4. Menghitung nilai gamma atau *Grey Relational Coefficient* (GRC)

Nilai gamma atau *grey relational coefficient* digunakan untuk mengetahui hubungan dari *S/N Ratio* yang terbaik dengan *S/N Ratio* normalisasi aktual. Nilai gamma dihitung sesuai dengan persamaan 2.26 berikut ini :

$$\gamma_i^*(j) = \frac{\Delta \min + \zeta \Delta \max}{\Delta_{0i}(j) + \zeta \Delta \max} \quad (2.26)$$

Keterangan :

ζ = koefisien pembeda, pada umumnya diambil $\zeta = 0,5$ (Tosun, 2004)

5. Menghitung *Grey Relational Grade* (GRG)

Nilai *Grey Relational Grade* adalah bobot penjumlahan dari *grey relational coefficient*. Secara keseluruhan evaluasi karakteristik multirespons didasarkan pada nilai *Grey Relational Grade* ini. *Grey Relational Grade* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 2.27 berikut ini :

$$\Gamma_{0i}(j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{0i}(j) \quad (2.27)$$

Keterangan:

$\gamma_{0i}(j)$ = Nilai gamma masing-masing respons

6. Melakukan Analisis Variansi (ANOVA) dan Menghitung persen kontribusi

Analisis varian digunakan untuk mencari pengaruh setiap parameter terhadap suatu proses. Sedangkan persen kontribusi ini merupakan fungsi *sum of squares* dari masing-masing faktor signifikan, yang mengindikasikan kekuatan faktor dan atau interaksi antar faktor dalam mereduksi variansinya. Secara keseluruhan cara menghitung analisis varian dan persen kontribusi telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, pada persamaan 2.9 hingga persamaan 2.19.

7. Melakukan pendugaan respons yang optimum

Setelah diketahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap kedua respons, maka dilakukan pendugaan nilai respons yang paling optimal menggunakan rumus yang ada pada persamaan 2.21. Sehingga diketahui kombinasi parameter yang menghasilkan nilai respons yang paling baik.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium proses produksi Politeknik Negeri Malang, Kota Malang Jawa Timur. Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei 2018.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Peralatan-peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mesin *Wire* EDM

Mesin *Wire* EDM yang digunakan pada penelitian ini adalah Mitsubishi tipe BA8 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 Mitsubishi tipe BA8

Tabel 3.1 Spesifikasi mesin *Wire* EDM Mitsubishi tipe BA8

	Model		BA 8
Machine	Travel path (x/y/z)	mm	320 x 250 x 220
	Travel path (u/v)	mm	32 x 32
	Conic angle	o	15 (100 mm)
	Max workpiece dimensions (W x D x H)	mm	700 x 550 x 215
	Max workpiece height	kg	500
	Table diemnsions	mm	540 x 430
	Possible wire diameters	mm	0,1 – 0,3
	Wire spool reception	kg	10
	Automatic water beam thread		Yes
	Max advance (X/Y)	mm/min	1300
	Overall dimensions	mm	1550 x 2085 x 2037
	Machine weight	kg	1800
	Tank capacity	liter	350
Filter fineness	Um	3	
Filter	Filter element		2
Unit	Temperature control		Dielectric cooler
	Overall dimensions (W/D/H)	mm	792 x 1602 x 1350
	Weight unfilled	kg	280

2. Peralatan ukur dan peralatan bantu

a) *Profile Projector*

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

Gambar 3.2 Nikon *profile projector* 20

b) Jangka sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja, jangka sorong yang digunakan mempunyai kecermatan hingga 0,02 mm.



Gambar 3.3 Jangka sorong digital *Mitutoyo*

c) *Stopwatch*

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

d) Kertas gosok

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

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Benda kerja

Bahan yang digunakan adalah baja perkakas SKD 11 dengan kekerasan sebesar 58 HRC hingga 62 HRC. Panjang benda kerja adalah sebesar 400 mm, lebar 50 mm dan tebal 5 mm. Komposisi baja SKD 11 adalah *Carbon* 1.5 %, *Silicon* (Si) 0,3%, *Mangan* (Mn) 0,4%, *Cromium* (Cr) 12,0%, *Molibdenum* (Mo) 0,9%, dan *Vanadium* 0,3% (Hitachi Metal, Ltd, 2015).

2. Kawat elektroda

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



Gambar 3.4 Kawat elektroda kuningan.

3.3 Tahap Identifikasi Masalah

Pada tahap ini merupakan langkah awal yang dilakukan dalam penelitian. Tahap ini terdiri dari beberapa hal yaitu:

a. Identifikasi variabel faktor yang berpengaruh

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan informasi dan data yang berkaitan dengan tujuan penelitian. Dari identifikasi ini akan diketahui faktor-faktor yang berpengaruh terhadap proses pemotongan bahan.

b. Studi pustaka

Studi pustaka bertujuan untuk mencari informasi yang berkaitan dengan permasalahan yang diteliti berupa penelitian terdahulu, buku, jurnal, dan dari internet yang relevan dengan permasalahan yang diteliti. Tujuan dari studi pustaka ini adalah untuk memperoleh teori dan konsep yang dapat dijadikan landasan atau kerangka berpikir dalam menjelaskan permasalahan.

c. Perumusan masalah dan penentuan tujuan penelitian

Setelah mengetahui kondisi proses maka tahap selanjutnya adalah melakukan perumusan masalah dan penentuan tujuan penelitian. Perumusan masalah dan penentuan tujuan dari penelitian ini yaitu memperoleh kekasaran permukaan yang optimum dari hasil pemotongan baja SKD 11. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan produk pemotongan dengan tingkat kehalusan yang tinggi.

3.4 Variabel-variabel Penelitian

Variabel penelitian pada proses pemesinan *Wire* EDM baja SKD 11 antara lain meliputi:

a. Variabel respons (variabel tak bebas)

Variabel respons merupakan variabel yang akan diamati dalam penelitian. Nilai variabel ini dipengaruhi oleh nilai variabel-variabel proses yang telah ditentukan. Variabel respons yang digunakan pada penelitian ini adalah *Material Removal Rate* (MRR) dan akurasi atau ketelitian dimensi lebar pemotongan (*kerf*).

b. Variabel proses (variabel bebas)

Variabel proses merupakan variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan dari penelitian serta pertimbangan-pertimbangan lain. Variabel-variabel proses yang digunakan pada penelitian ini adalah kuat arus (A), Voltase (V) dan *wire speed* (WF).

c. Variabel konstan

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

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1) <i>Power supply</i> (PS) | 5) <i>Feedrate</i> (F) |
| 2) <i>Wire tension</i> (WT) | 6) <i>Feedrate addres</i> (FA) |
| 3) <i>Servo voltage</i> (SV) | 7) <i>Off time</i> (OFF) |
| 4) <i>Gap voltage</i> (VG) | 8) <i>Flow balnced</i> (FB) |

d. Variabel gangguan

Variabel gangguan adalah variabel yang memiliki pengaruh terhadap variabel respons, tetapi sangat sulit atau tidak bisa kendalikan. Variabel-variabel yang mungkin menjadi pengganggu adalah temperatur cairan dielektrik, konsentrasi partikel lain dalam cairan dielektrik dan kondisi permukaan kawat elektroda. Pengambilan data harus dilakukan dengan replikasi untuk mengatasi pengaruh variabel gangguan pada hasil penelitian.

e. Level yang digunakan

Penentuan level tahap awal ini bertujuan untuk memperoleh batasan dari variabel yang akan diamati. Level-level tersebut terdiri atas level bawah dengan kode 1, level menengah dengan kode 2, dan level atas dengan kode 3.

3.5 Rancangan Percobaan

3.5.1. Pengaturan Variabel pada Mesin Wire EDM

Pengaturan variabel-variabel pada mesin *Wire EDM* dilakukan dengan mengacu pada buku *wire cut cutting data manual*. Nilai dari variabel-variabel yang digunakan adalah untuk kawat elektroda dengan diameter 0,25 mm dan ketebalan benda kerja 5,5 mm, serta untuk kondisi pemotongan kasar, dengan menggunakan cairan dielektrik berupa air suling. Pengaturan nilai variabel-variabel konstan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel-variabel konstan

No	Variabel konstan	Nilai	Satuan
1	Ø Kawat elektroda	0,25	mm
2	<i>Power supply</i>	KH	-
3	<i>Wire tension (WT)</i>	8	g
4	<i>Servo voltage (SV)</i>	NM	volt
5	<i>Gap voltage (VG)</i>	63	volt
6	<i>Feedrate (F)</i>	5	mm/min
7	<i>Feedrate adres (FA)</i>	5,5	mm/min
8	<i>Off time (OFF)</i>	1	µs
9	<i>Flow balanced (FB)</i>	NM	-
10	<i>Liquid quantity (LQ)</i>	14	l

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

- Nilai masing-masing level mengacu pada buku *wire cut cutting data manual* dan penelitian-penelitian sebelumnya.

- Nilai pada level tersebut masih dapat digunakan pada proses pemotongan dan tidak terjadi *short circuit*. Berdasarkan pertimbangan ditentukan nilai masing-masing level dari variabel-variabel proses ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Variabel-variabel proses dan masing-masing level

No	Variabel proses	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
1	Arus	Ampere	5	7	9
2	Voltase	Volt	4	5	6
3	<i>Wire Speed</i>	mm/s	6	8	10

3.5.2. Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang akan digunakan dalam penelitian harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan variabel-variabel proses yang telah ditetapkan. Pada percobaan ini tidak terjadi interaksi antar variabel-variabel proses. Derajat kebebasan dari variabel-variabel proses tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5 dan disajikan pada Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Total derajat kebebasan variabel-variabel respons

No	Variabel proses	Jumlah level (k)	df = (k-1)
1	Arus	3	2
2	Voltase	3	2
3	<i>Wire Speed</i>	3	2
Total			6

Tabel 3.4 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan adalah enam. Maka matriks ortogonal yang sesuai untuk percobaan dengan derajat kebebasan enam menurut panduan adalah $L_9 (3^3)$. Rancangan percobaan *Taguchi* matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ ditunjukkan oleh Tabel 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3.5 Rancangan percobaan *Taguchi L₉ (3³)*

Kombinasi	Variabel		
	Arus	Voltase	Wire Speed
1	5	4	6
2	5	5	8
3	5	6	10
4	7	4	8
5	7	5	10
6	7	6	6
7	9	4	10
8	9	5	6
9	9	6	8

Pengambilan data dilakukan secara acak dengan kombinasi variabel-variabel mengacu pada rancangan percobaan sesuai dengan matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ pada Tabel 3.5. Replikasi kombinasi variabel pada percobaan dilakukan sebanyak dua kali untuk mengatasi kesalahan-kesalahan akibat variabel gangguan. Tabel 3.6 menunjukkan urutan percobaan yang sesuai dengan kombinasi matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ setelah dilakukan pengacakan untuk replikasi pertama, sedangkan untuk replikasi kedua ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.6 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ replikasi pertama

Kombinasi	Variabel		
	Arus	Voltase	Wire Speed
5	7	5	10
2	5	5	8
9	9	6	8
7	9	4	10
3	5	6	10
1	5	4	6
8	9	5	6
6	7	6	6
4	7	4	8

Tabel 3.7 Urutan percobaan matriks ortogonal $L_9 (3^3)$ replikasi kedua

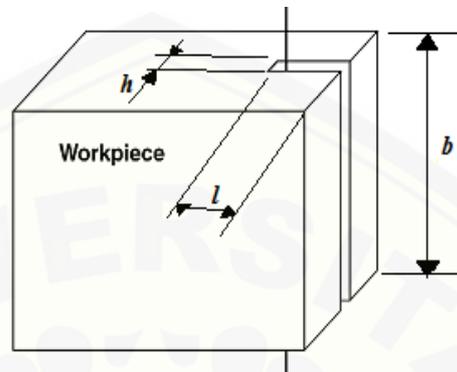
Kombinasi	Variabel		
	Arus	Voltase	Wire speed
7	9	4	10
3	5	6	10
5	7	5	10
1	5	4	6
9	9	6	8
6	7	6	6
4	7	4	8
2	5	5	8
8	9	5	6

3.5.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Berikut ini adalah langkah-langkah yang digunakan dalam pengambilan data atau prosedur melakukan eksperimen :

- 1) Membersihkan benda kerja dari kotoran-kotoran yang bersifat isolator yang dapat mengganggu proses pemotongan.
- 2) Memasang benda kerja ke meja mesin *Wire EDM* kemudian diatur kelurusannya dengan menggunakan *dial indicator*.
- 3) Mengatur titik referensi pemesian pada benda kerja sesuai dengan program CNC yang telah dibuat.
- 4) Memasang kawat elektroda *brass wire* berdiameter 0,25 mm pada mesin *Wire EDM*.
- 5) Mengatur variabel-variabel pada mesin *Wire EDM* sesuai dengan rancangan percobaan yang telah ditetapkan.
- 6) Melakukan proses pemotongan berdasarkan urutan percobaan yang telah ditentukan pada Tabel 3.6 dan 3.7.
- 7) Mencatat waktu yang dibutuhkan pada setiap proses pemotongan untuk masing-masing percobaan, yang mana digunakan untuk mengetahui *material removal rate* pada setiap pemotongan.

- 8) Melepas dan membersihkan benda kerja dari sisa cairan dielektrik yang dapat menyebabkan karat setelah proses pemotongan selesai.
- 9) Mengukur lebar celah pemotongan (*kerf*) dengan menggunakan *profile projector*.



Gambar 3.5 Spesimen benda kerja

3.6 Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data

3.6.1 Pengukuran dan Pengambilan Data

Pengukuran dan pengambilan data hasil pemotongan baja SKD 11 dengan menggunakan alat ukur yang sudah ditentukan, berikut ini parameter respons yang akan dikur:

a. Pengambilan Data Lebar Pemotongan (*Kerf*)

Pengukuran jarak pada *profile projector* dilakukan dengan menggunakan prinsip proyeksi serta pembesaran penampang benda kerja. Oleh karena itu, benda kerja yang akan diukur harus benar-benar diletakkan tegak lurus terhadap lensa pengukur. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan salah satu sisi celah pemotongan sejajar dan tepat berimpit pada salah satu sumbu referensi. Lebar pemotongan diperoleh dengan menghitung nilai pengukuran yang didapatkan dari posisi pertama dan kedua. Nilai pengukuran pada masing-masing posisi ditunjukkan oleh skala poros pengatur pergeseran yang terdapat pada *profile projector*. Untuk mendapatkan hasil yang baik pengukuran lebar pemotongan (*kerf*) dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan pada setiap lebar pemotongannya kemudian hasilnya di rata-rata.

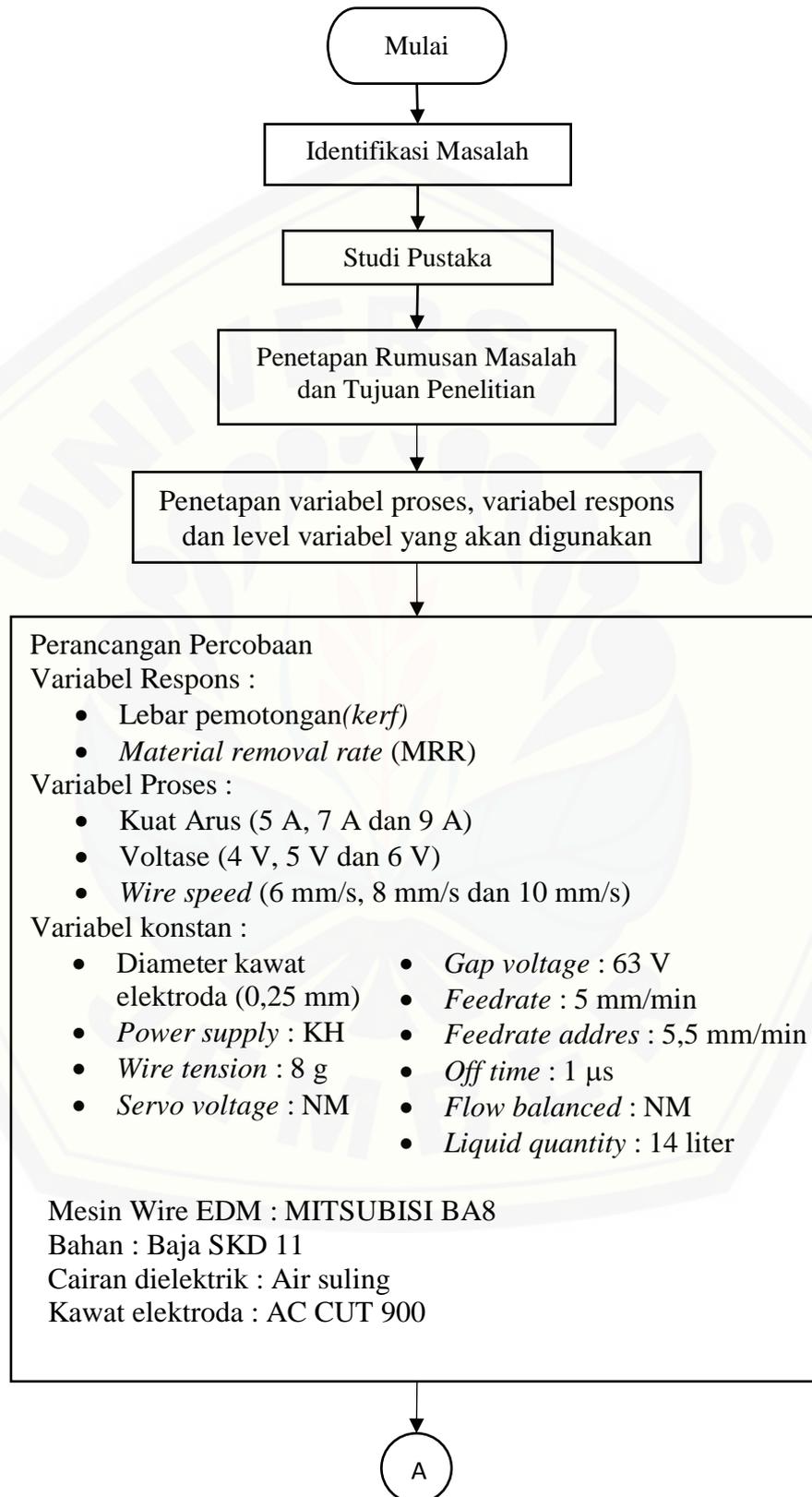
Tahapan - tahapan analisis selanjutnya yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

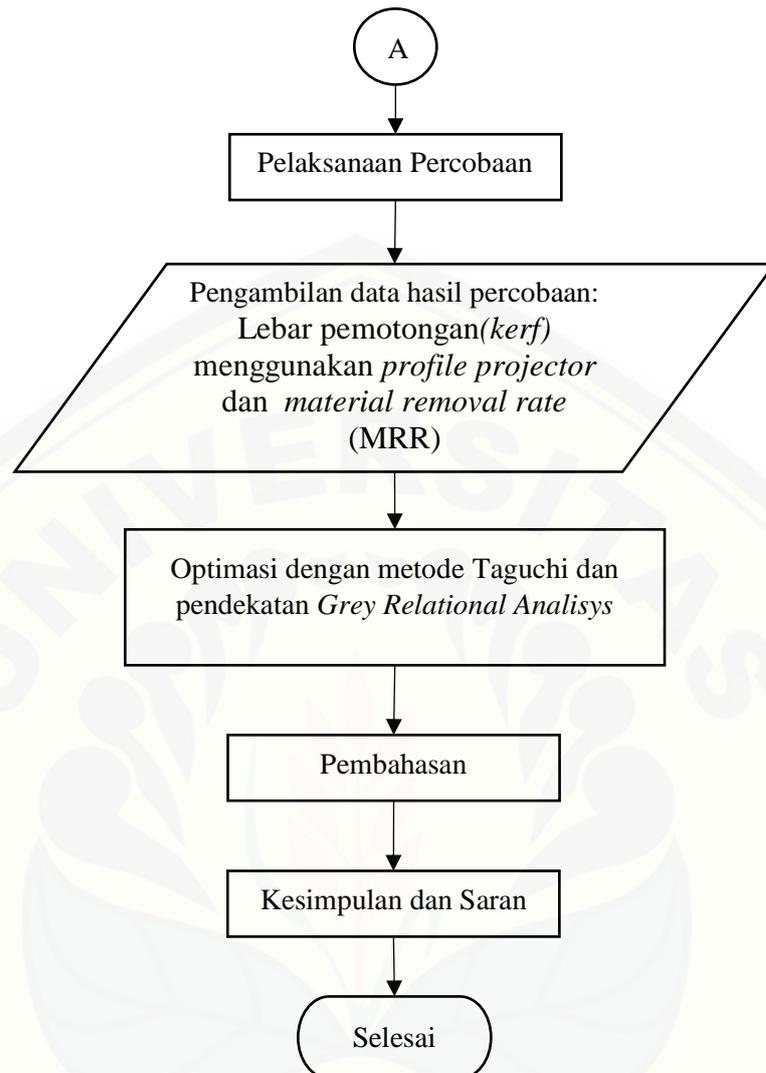
- a. Menghitung *Signal to Noise (SN Ratio)* dengan karakteristik *smaller the better* untuk ketelitian lebar pemotongan dan *larger the better* untuk *Material Removal Rate (MRR)*.
- b. Melakukan normalisasi *Signal to Noise (SN Ratio)* dari setiap data respons.
- c. Melakukan uji asumsi normalitas.
- d. Melakukan uji asumsi homogenitas.
- e. Membuat tabel analisa variansi (ANOVA).
- f. Menentukan faktor signifikan sesuai dengan hasil F-hitung pada Tabel ANOVA. Apabila terdapat faktor yang tidak signifikan, maka faktor tersebut dihilangkan kemudian dilakukan uji asumsi kembali.
- g. Menghitung persen kontribusi dari setiap masing-masing respons.
- h. Menentukan kombinasi optimal dari parameter proses.
- i. Membuat kesimpulan atas hasil analisis yang diperoleh.

3.7 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.

3.8 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan, proses optimasi, dan analisis data yang telah dilakukan menggunakan aturan-aturan dalam metode *Taguchi*, maka dapat diambil suatu kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan dan analisis data dapat diketahui bahwa pada *level of significant* (α) sebesar 5%, parameter dalam penelitian yang memiliki pengaruh signifikan terhadap respons dimensi lebar pemotongan (*kerf*) yaitu kuat arus dan *wire speed*. Secara individu kuat arus 5 ampere menghasilkan nilai dimensi lebar pemotongan terbaik. Selain itu faktor kuat arus memberikan kontribusi sebesar 89,84% sedangkan *wire speed* berkontribusi sebesar 8,26% terhadap respons lebar pemotongan. Sedangkan untuk respons *material removal rate* (MRR) pada *level of significant* (α) sebesar 5%, parameter dalam penelitian yang memiliki pengaruh signifikan terhadap *material removal rate* (MRR) yaitu faktor kuat arus. Faktor kuat arus yang menghasilkan nilai *material removal rate* (MRR) terbaik yaitu pada level 3 atau 9 ampere. Faktor kuat arus memberikan kontribusi sebesar 87,88% .
2. Berdasarkan hasil perhitungan dan optimasi didapatkan bahwa kondisi optimal *setting* parameter untuk respons dimensi lebar pemotongan (*kerf*) yaitu dengan kombinasi parameter kuat arus 5 ampere, voltase 6 volt dan *wire speed* 10 m/s. Hasil *setting* parameter tersebut didapatkan dimensi lebar pemotongan (*kerf*) optimum sebesar 0,273 mm. Sedangkan hasil perkiraan kondisi optimal dapat dicapai dengan kombinasi parameter kuat arus 5 ampere, voltase 4 volt dan *wire speed* 10 m/s. Kondisi optimal *setting* parameter untuk respons *material removal rate* (MRR) yaitu dengan kombinasi parameter kuat arus 9 ampere, voltase 4 volt dan *wire speed* 10 m/s. Hasil *setting* parameter tersebut didapatkan *material removal rate* (MRR) terbesar yaitu 8,94 mm³/menit. Sedangkan hasil perkiraan kondisi optimal dapat dicapai dengan kombinasi parameter kuat arus 9 ampere, voltase 5 volt dan *wire speed* 10 m/s.

3. Berdasarkan perhitungan dan analisis data yang telah dilakukan, diketahui bahwa pada *level of significant* (α) sebesar 5%, parameter penelitian yang memiliki pengaruh signifikan terhadap respons gabungan adalah faktor *wire speed*. Faktor *wire speed* yang memberikan pengaruh signifikan dan menghasilkan nilai *Grey Relational Grade* terbaik terhadap respons gabungan yaitu pada level 3 atau 10 m/s. Faktor *wire speed* memberikan kontribusi sebesar 92,79% terhadap respons gabungan. Kondisi optimal *setting* parameter proses pemotongan Wire EDM baja SKD 11 untuk respons gabungan yaitu dengan kombinasi parameter kuat arus 7 ampere, voltase 5 Volt dan *wire speed* 10 m/s. Hasil *setting* parameter tersebut didapatkan *Grey Relational Grade* terbesar yaitu 0,703. Sedangkan hasil perkiraan kondisi optimal dapat dicapai dengan kombinasi parameter kuat arus 7 ampere, voltase 4 volt dan *wire speed* 10 m/s. Diperkirakan nilai *Grey Relational Grade* akan meningkatkan menjadi 0,729.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis data penelitian dari hasil eksperimen penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan guna mengatasi permasalahan produksi dalam proses pemotongan dengan Wire EDM baja SKD 11 dengan bantuan perhitungan statistik. Hasil dapat digunakan sebagai salah satu rujukan dari beberapa penelitian lain, agar proses pemotongan Wire EDM baja SKD 11 dapat lebih optimal, baik itu dari sisi dimensi lebar pemotongan maupun respons *material removal rate*.
2. Jumlah parameter atau faktor dan respons dalam proses pemotongan dengan Wire EDM baja SKD 11 masih banyak yang belum dikaji, sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan agar dapat mengkaji ulang parameter-parameter yang digunakan sehingga didapatkan analisis yang lebih lengkap dan lebih baik, mengenai pengaruh faktor terhadap proses pemotongan dengan Wire EDM baja SKD 11.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. 2017. *Perkembangan Indeks Produksi Industri Manufaktur*. Jakarta: Badan Pusat Statistik
- Balasubramanian, S., Ganapathy, S. 2011. *Grey Relational Analysis to Determine Optimum Process Parameters for WEDM*. J. Engineering Science and Technol. 3 : 0975-5462
- Bobbili, Ravindranadh dkk. 2015. *Modelling and Analysis of Material Removal Rate and Surface Roughness in Wire-Cut EDM of Armour Materials*. Engineering Science and Technology, an International Journal xxx, No 1-5
- Guitrau, E. Bud. 1991. *The EDM Handbook*. Cincinnati : Hanser Gardner Publications
- Hitachi Metals. 2015. *General Catalog of YSS Tool Steels*. Hitachi Metals Ltd.
- Johnson, R.A. dan D.W. Wichern, 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis 6th Edition*. USA: Prentice Hall
- Lin, J. L. dan Lin, C. L. 2002. *The Use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process Performance with Multiple Characteristics*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42
- Lu, H.S., Chang, C.K., Hwang, N.C. dan Chung, C.T. 2009. *Grey Relational Analysis Coupled With Principal Component Analysis For Optimization Design Of The Cutting Parameters In High-Speed End Milling*. J. Mater. Process. Technol. 209: 3808-3817
- Mahardika, Muslim dan Kimityuki Mitsui. 2008. *A New Method for Monitoring Micro-Electric Discharge Machining Processes*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48
- Martowibowo, Sigit Yoewono dan Satrio P. 2002. *Study Eksperimental Hubungan Parameter Proses Pemesinan Wire EDM dengan Kekerasan Permukaan untuk Material AISI 1148*. Jurnal Teknik Mesin ITB Vol. XV No.2
- Martowibowo, Sigit Yoewono dan Adriansyah. 2007. *Optimisasi Proses Pemesinan Edm Wire Cut untuk Modus Gerak Sirkular Menggunakan Algoritma Genetik*. Jurnal Teknik Mesin Vol. 22, No. 2, Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung
- Mitsubishi Electric. 2012. *Instruction Manual Book Wirecut BA 8*. Mitsubishi Electric Europe B.V. Branch of Germany Co., Ltd.

- Pandey, P. C. dan Shan, H. S. 1980. *Modern Machining Processes*. New Delhi: Tata Mc Graw Hill Publishing Company Limited
- Park, S. H. 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering* 1st edition. London: Chapman & Hall
- Pathya dan Bobby O.P. Opanka. 2017. *Optimasi Multirespon Proses Wire-EDM Menggunakan Metode Taguchi Logika Fuzz*. Jurnal Teknik Mesin – Institut Teknologi Indonesia Vol. 1, No. 1
- Purnomo, Dhika Aditya. 2015. “*Optimasi Multi Respon pada Proses Pemesinan Wire Electrical Discharge Machining (Wedm) Baja Perkakas Buderus 2080 dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey-Fuzzy*” Tidak Diterbitkan, Thesis. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Rahmadani, Nur A. dkk. 2012. *Penerapan Pendekatan Gabungan Grey Relational Analysis (GRA) dan Principal Component Analysis (PCA) pada Metode Taguchi Multirespon*. Jurnal Sains & Seni ITS Vol. 1 No.1, ISSN: 2301-928X
- Ross, P. J. 2008. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Taiwan: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Selvam, M. Panner and P. Ranjith Kumar. 2016. *Optimization Kerf Width and Surface Roughness in Wirecut Electrical Discharge Machining Using Brass Wire*. Mechanics and Mechanical Engineering Vol. 21, No. 1 (2017) 37–55 Copyright Lodz University of Technology
- Setiawan, Handoko. 2010. *Pengaruh Pulse On, Pulse Off, dan Ketebalan Bahan Terhadap MRR dan Kekasaran Permukaan pada Proses Pemotongan Baja EMS-45 dengan Mesin Wire EDM*. Tidak Diterbitkan, Surabaya: Ubaya
- Soejanto, Iwan. 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu
- Tech Navio Infiniti Research. 2014. *Sample–Global Electrical Discharge Machine Market*. TechNavio Infiniti Research Publisher
- Tosun, N., Cogun, C., and Tosun, G. 2004. *A Study on Kerf and Material Removal Rate in Wire Elec-trical Discharge Machining based on Taguchi Method*, Journal of Materials Processing Tech-nology, 152, pp. 316 -322
- Widarto. 2008. *Teknik Pemesinan Jilid 2*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional

Lampiran A.1 Tabel Data Penelitian untuk Respons Lebar Pemotongan (*Kerf*)

Tabel A1.1 Data Penelitian Lebar Pemotongan Replikasi 1

Kom- binasi	Variabel			Hasil Pengukuran			
	Arus	Voltase	Wire Speed	Pengukuran 1 (mm)	Pengukuran 2 (mm)	Pengukuran 3 (mm)	Rata-rata (mm)
1	5	4	6	0,275	0,270	0,280	0,275
2	5	5	8	0,275	0,275	0,280	0,277
3	5	6	10	0,275	0,275	0,270	0,273
4	7	4	8	0,285	0,285	0,280	0,283
5	7	5	10	0,280	0,280	0,280	0,280
6	7	6	6	0,275	0,280	0,300	0,285
7	9	4	10	0,290	0,275	0,295	0,287
8	9	5	6	0,295	0,295	0,295	0,295
9	9	6	8	0,295	0,290	0,295	0,293

Tabel A1.2 Data Penelitian Lebar Pemotongan Replikasi 2

Kom- binasi	Variabel			Hasil Pengukuran			
	Arus	Voltase	Wire Speed	Pengukuran 1 (mm)	Pengukuran 2 (mm)	Pengukuran 3 (mm)	Rata-rata (mm)
1	5	4	6	0,280	0,275	0,275	0,277
2	5	5	8	0,275	0,280	0,280	0,278
3	5	6	10	0,275	0,275	0,275	0,275
4	7	4	8	0,285	0,280	0,275	0,280
5	7	5	10	0,275	0,280	0,280	0,278
6	7	6	6	0,280	0,280	0,285	0,282
7	9	4	10	0,290	0,290	0,290	0,290
8	9	5	6	0,295	0,295	0,295	0,295
9	9	6	8	0,290	0,295	0,295	0,293

Tabel A1.3 Data Penelitian Lebar Pemotongan Replikasi 3

Kom- binasi	Variabel			Hasil Pengukuran			
	Arus	Voltase	Wire Speed	Pengukuran 1 (mm)	Pengukuran 2 (mm)	Pengukuran 3 (mm)	Rata-rata (mm)
1	5	4	6	0,275	0,280	0,275	0,277
2	5	5	8	0,275	0,275	0,275	0,275
3	5	6	10	0,270	0,270	0,270	0,270
4	7	4	8	0,280	0,280	0,275	0,278
5	7	5	10	0,275	0,275	0,280	0,277
6	7	6	6	0,285	0,290	0,285	0,287
7	9	4	10	0,285	0,290	0,290	0,288
8	9	5	6	0,290	0,295	0,290	0,292
9	9	6	8	0,295	0,290	0,285	0,290

Lampiran A.2 Tabel Data Penelitian Untuk Respons *Material Removal Rate* (MRR)

Tabel A2.1 Data Penelitian *Material Removal Rate* Replikasi 1

Kombinasi	Variabel		Dimensi				Waktu (menit)	MRR (mm ³ /min)
	Arus	Voltase	Wire Speed	Kerf (mm)	Panjang (mm)	Tebal (mm)		
1	5	4	6	0,275	50	5,5	14,370	5,263
2	5	5	8	0,277	50	5,5	13,320	5,712
3	5	6	10	0,273	50	5,5	12,100	6,212
4	7	4	8	0,283	50	5,5	10,280	7,579
5	7	5	10	0,280	50	5,5	10,090	7,631
6	7	6	6	0,285	50	5,5	11,300	6,936
7	9	4	10	0,287	50	5,5	9,420	8,369
8	9	5	6	0,295	50	5,5	10,160	7,985
9	9	6	8	0,293	50	5,5	10,090	7,995

Tabel A2.2 Data Penelitian *Material Removal Rate* Replikasi 2

Kombinasi	Variabel		Dimensi				Waktu (menit)	MRR (mm ³ /min)
	Arus	Voltase	Wire Speed	Kerf (mm)	Panjang (mm)	Tebal (mm)		
1	5	4	6	0,277	50	5,5	13,160	5,781
2	5	5	8	0,278	50	5,5	11,590	6,604
3	5	6	10	0,275	50	5,5	11,550	6,548
4	7	4	8	0,280	50	5,5	10,280	7,490
5	7	5	10	0,278	50	5,5	9,490	8,066
6	7	6	6	0,282	50	5,5	10,220	7,579
7	9	4	10	0,290	50	5,5	9,240	8,631
8	9	5	6	0,295	50	5,5	10,140	8,000
9	9	6	8	0,293	50	5,5	10,280	7,847

Tabel A2.3 Data Penelitian *Material Removal Rate* Replikasi 3

Kombinasi	Variabel		Dimensi			Waktu (menit)	MRR (mm ³ /min)	
	Arus	Voltase	Wire Speed	Kerf (mm)	Panjang (mm)			Tebal (mm)
1	5	4	6	0,277	50	5,5	12,410	6,131
2	5	5	8	0,275	50	5,5	11,420	6,622
3	5	6	10	0,270	50	5,5	12,250	6,061
4	7	4	8	0,278	50	5,5	10,110	7,571
5	7	5	10	0,277	50	5,5	9,470	8,034
6	7	6	6	0,287	50	5,5	11,450	6,885
7	9	4	10	0,288	50	5,5	9,590	8,268
8	9	5	6	0,292	50	5,5	11,010	7,285
9	9	6	8	0,290	50	5,5	10,570	7,545

Lampiran B.1 Analisis Taguchi dan Analysis of Varian untuk Respons Lebar Pemotongan (Kerf)

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3³)

Factors: 3

Runs: 9

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	Kuat Arus	Voltase	Wire Speed
1	11,21	11,01	10,91
2	11,02	10,97	10,96
3	10,71	10,96	11,06
Delta	0,50	0,04	0,15
Rank	1	3	2

General Linear Model: SNRA versus Kuat Arus; Voltase; Wire Speed

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kuat Arus	2	0,382806	0,191403	243,91	0,004
Voltase	2	0,003375	0,001687	2,15	0,317
Wire Speed	2	0,036612	0,018306	23,33	0,041
Error	2	0,001569	0,000785		
Total	8	0,424363			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0280131	99,63%	98,52%	92,51%

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{SNRA1} = & 10,9794 + 0,2282 \text{ Kuat Arus}_5 + 0,0432 \text{ Kuat Arus}_7 \\
 & - 0,2714 \text{ Kuat Arus}_9 + 0,0272 \text{ Voltase}_4 \\
 & - 0,0108 \text{ Voltase}_5 - 0,0164 \text{ Voltase}_6 \\
 & - 0,0679 \text{ Wire Speed}_6 - 0,0174 \text{ Wire Speed}_8 \\
 & + 0,0854 \text{ Wire Speed}_{10}
 \end{aligned}$$

Lampiran B.2 Analisis Taguchi dan Analysis of Varian untuk Respons Material Removal Rate (MRR)

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3³)

Factors: 3

Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2 3

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	Kuat Arus	Voltase	Wire Speed
1	15,66	17,05	16,64
2	17,52	17,22	17,11
3	18,03	16,94	17,47
Delta	2,37	0,29	0,83
Rank	1	3	2

General Linear Model: SNRA versus Kuat Arus; Voltase; Wire Speed

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kuat Arus	2	9,3476	4,67378	153,47	0,006
Voltase	2	0,1238	0,06191	2,03	0,330
Wire Speed	2	1,0346	0,51730	16,99	0,056
Error	2	0,0609	0,03045		
Total	8	10,5669			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,174509	99,42%	97,69%	88,33%

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{SNRA1} = & 17,0707 - 1,4100 \text{ KuatArus}_5 + 0,4466 \text{ KuatArus}_7 \\
 & + 0,9635 \text{ KuatArus}_9 - 0,0162 \text{ Voltase}_4 \\
 & + 0,1511 \text{ Voltase}_5 - 0,1348 \text{ Voltase}_6 \\
 & - 0,4329 \text{ Wire Speed}_6 + 0,0378 \text{ WireSpeed}_8 \\
 & + 0,3950 \text{ WireSpeed}_{10}
 \end{aligned}$$

Lampiran B.3 Analisis Taguchi dan Analysis of Varian untuk Grey Relational Grade Respons Gabungan

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3³)
 Factors: 3
 Runs: 9
 Columns of L9(3⁴) array: 1 2 3

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	Kuat Arus	Voltase	Wire Speed
1	-4,468	-4,243	-5,664
2	-4,456	-4,609	-4,939
3	-4,766	-4,838	-3,087
Delta	0,310	0,596	2,577
Rank	3	2	1

General Linear Model: GRG versus A; B; C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kuat Arus	2	0,000775	0,000388	1,49	0,402
Voltase	2	0,002205	0,001103	4,23	0,191
Wire Speed	2	0,052290	0,026145	100,21	0,010
Error	2	0,000522	0,000261		
Total	8	0,055793			

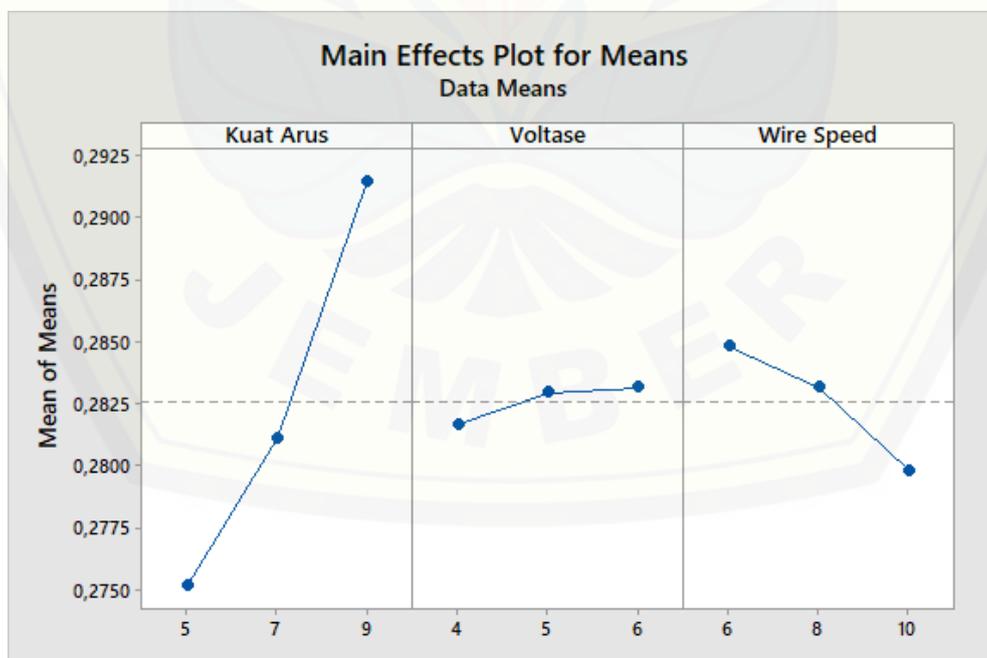
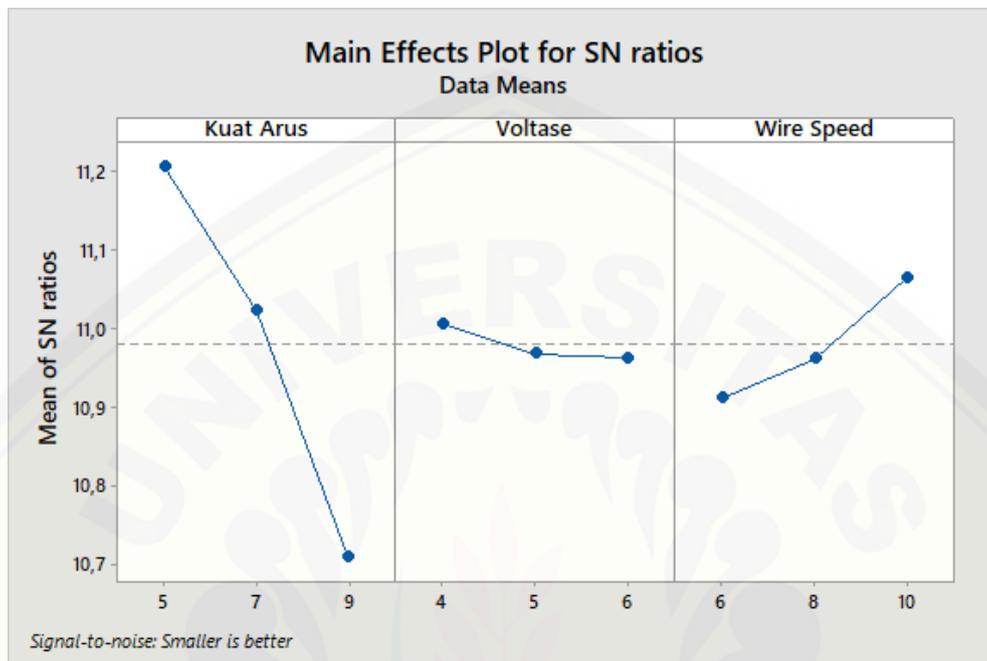
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0161527	99,06%	96,26%	81,06%

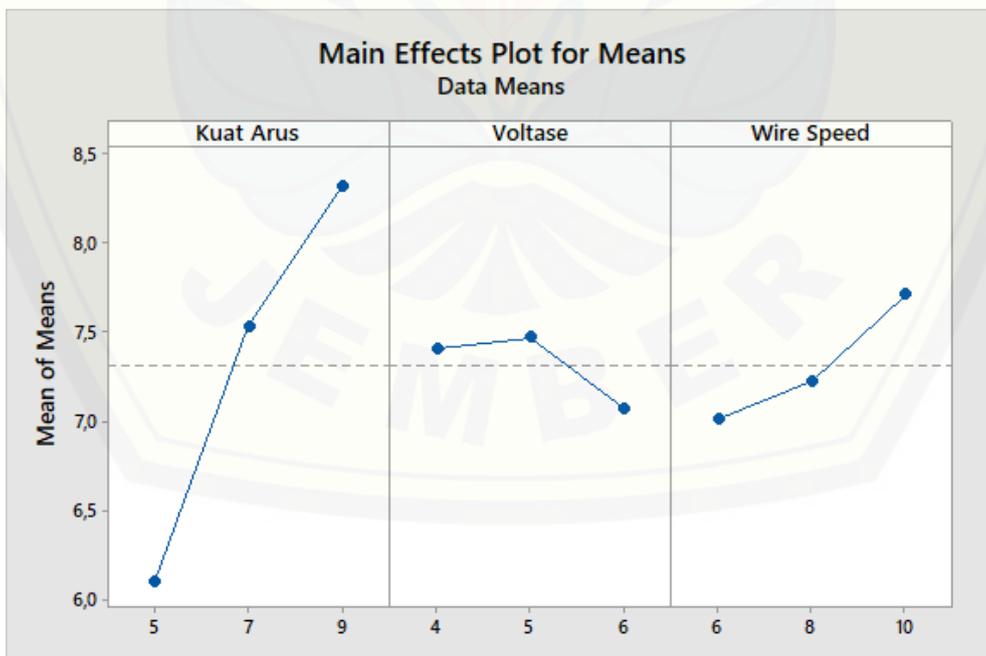
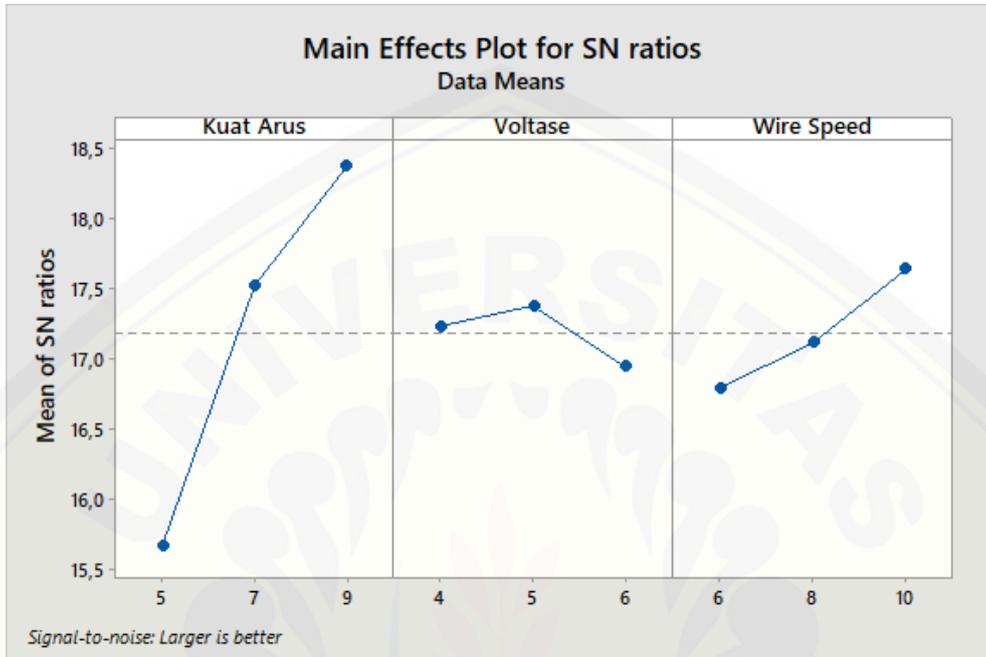
Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{GRG} = & 0,59640 + 0,00528 \text{ Kuat Arus}_5 + 0,00776 \text{ Kuat Arus}_7 \\ & - 0,01305 \text{ Kuat Arus}_9 + 0,02052 \text{ Voltase}_4 - 0,00307 \text{ Voltase}_5 \\ & - 0,01745 \text{ Voltase}_6 - 0,07516 \text{ Wire Speed}_6 - 0,02934 \text{ Wire} \\ & \text{Speed}_8 + 0,10450 \text{ Wire Speed}_{10} \end{aligned}$$

Lampiran C.1 Grafik Respons Parameter Proses untuk Lebar Pemotongan (Kerf)



Lampiran C.2 Grafik Respons Parameter Proses untuk *Material Removal Rate* (MRR)



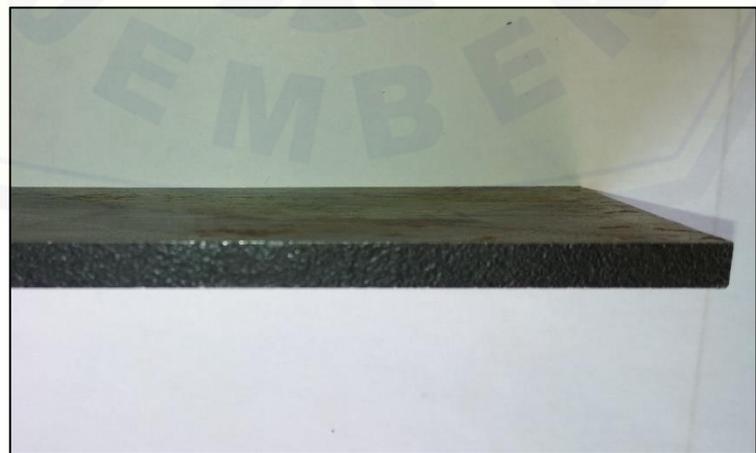
Lampiran C.3 Grafik Respons Parameter Proses untuk *Grey Relational Grade* Respons Gabungan



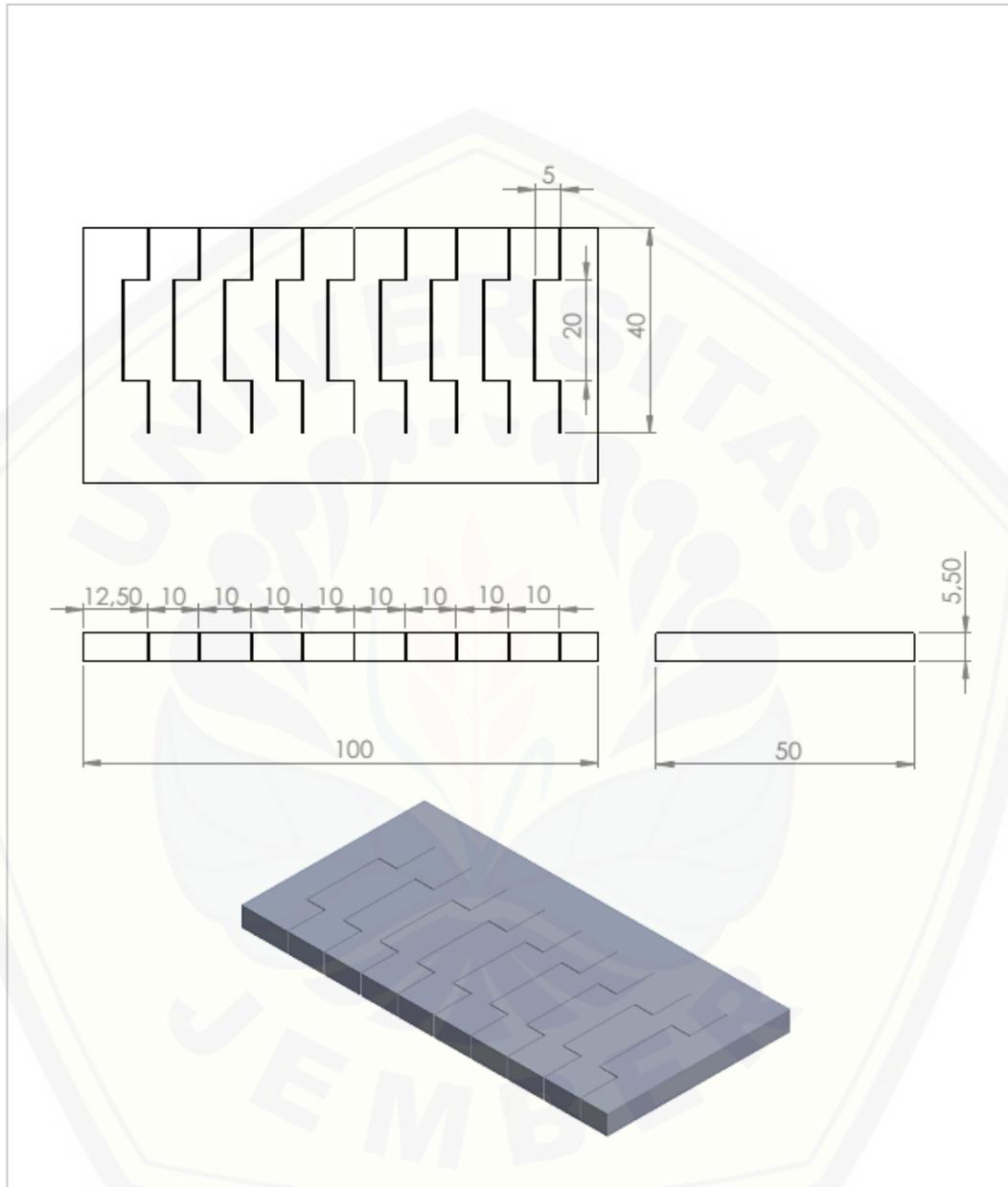
Lampiran E. Mesin Wire EDM Mitsubishi BA 8



Lampiran F. Gambar Material Baja JIS SKD 11

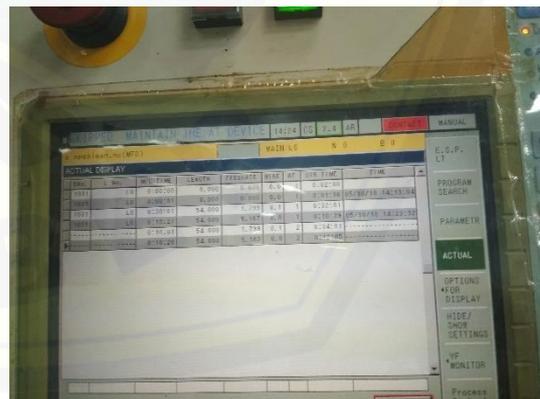


Lampiran G. Gambar Desain Pemotongan



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN: Olik Ari Setiawan	SIGNATURE	DATE	TITLE: Desain Pemotongan			
CHK'D: Saiful Mo'allil			MATERIAL: Baja JIS SKD 11		DWG NO.	A4
APP'VD:			WGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1	
MFG:						
Q.A:						

Lampiran H. Proses Pemotongan



Lampiran I. Hasil Pemotongan



Replikasi 1



Replikasi 2



Replikasi 3