

25837/14/09



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

RSM

621.902

Pur

M-1

2009

TUGAS AKHIR - RM 1562

MAKSIMASI LAJU Pengerjaan Material dengan Kekasaran Permukaan sebagai Konstrain pada Proses Perautan Mesin EDM Sinking

BAGUS TRIS PURWANTO
NRP 2102 100 088

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc, PhD.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2009

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	20-8-2009
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	1732



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - RM 1562

MAXIMIZING MATERIAL REMOVAL RATE WITH SURFACE ROUGHNESS AS CONSTRAINT AT WHITTLE PROCESS OF EDM SINKING MACHINE

BAGUS TRIS PURWANTO
NRP 2102 100 088

Project Advisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc, PhD.

MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2009

**MAKSIMASI LAJU Pengerjaan Material
Dengan Kekasaran Permukaan Sebagai
Konstrains pada Proses Perawatan
Mesin EDM Sinking**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

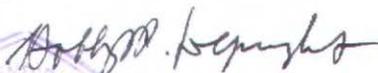
Oleh :

BAGUS TRIS PURWANTO

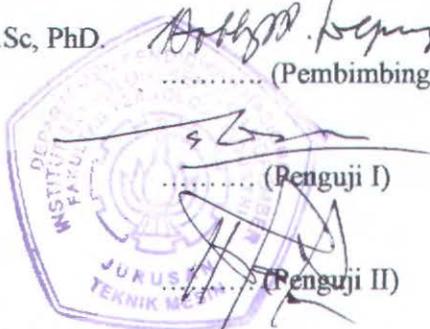
Nrp. 2102 100 088

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Bobby Oedy P. S., M.Sc, PhD.
NIP. 130 676 229


..... (Pembimbing)

2. Ir. Achmad Muljana
NIP. 130 687 429

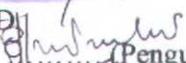


..... (Penguji I)

3. Ir. Sampurno, MT.
NIP. 131 843 902

..... (Penguji II)

4. Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, PhD
NIP. 132 086 897


..... (Penguji III)

SURABAYA
Juli, 2009

MAKSIMASI LAJU Pengerjaan Material DENGAN Kekasaran Permukaan Sebagai KONSTRAIN PADA PROSES PERAUTAN MESIN EDM SINKING

Nama Mahasiswa : Bagus Tris Purwanto
NRP : 2102 100 088
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Bobby Oedy P. S., M.Sc, PhD.

Abstrak

Nilai kekasaran permukaan yang rendah dan laju pengerjaan material yang tinggi merupakan kinerja yang ingin dicapai pada proses pengerjaan benda kerja dengan menggunakan EDM Sinking. Dengan laju pengerjaan material yang selambat mungkin, akan didapatkan kekasaran permukaan yang baik. Tetapi proses yang berjalan lambat akan berpengaruh terhadap waktu penyelesaian produk, dan juga akan meningkatkan biaya produksi yang harus dikeluarkan. Untuk mengatasi hal tersebut, maka diperlukan setting parameter proses yang menghasilkan laju pengerjaan material (MRR) yang maksimal dan kekasaran permukaan benda kerja yang minimal.

Suatu percobaan dengan rancangan Box-Behnken akan dilakukan untuk mengetahui hubungan antara respon laju pengerjaan material (MRR) dan kekasaran permukaan dengan variabel proses Pulse Current, On Time, Off Time, dan Gap-Width. Optimasi untuk mendapatkan setting variabel proses yang akan memberikan laju pengerjaan material (MRR) yang maksimal dan kekasaran permukaan yang minimal, dilakukan dengan metode response surface dan non-linear programming. Sebagai respon primer adalah laju pengerjaan material (MRR) dan sebagai respon sekunder adalah kekasaran permukaan.

Dari penelitian ini diketahui bahwa model hubungan antara parameter proses perautan terhadap laju pengerjaan dan kekasaran permukaan benda kerja berbentuk polynomial orde

kedua. Nilai laju pengerjaan maksimal yang diperoleh adalah sebesar 32.80 mm³/menit dengan kekasaran permukaan sebesar 4.94 µm. Nilai tersebut diperoleh pada pengaturan parameter Pulse Current 7 [21 A], Gap-Width 27, On Time 12 [1040 µs], dan Off Time 8 [720 µs].

Kata kunci: Maksimasi, EDM Sinking, response surface, Box-Behnken, non-linear programming.

Dosen Pembimbing : Ir. Bobby Oedy T. S., M.Sc. Ph.D.

Abstrak

Salah satu proses manufaktur yang semakin berkembang adalah proses EDM Sinking. Proses ini merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghasilkan komponen manufaktur yang akurat dengan toleransi yang ketat. Proses ini melibatkan pemrosesan material dengan menggunakan energi listrik yang menghasilkan busur listrik antara elektroda dan benda kerja. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan parameter proses EDM Sinking dengan menggunakan metode optimasi non-linear programming (NLP) dan metode optimasi permukaan respons (RSM). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kombinasi parameter proses yang optimal untuk menghasilkan komponen manufaktur yang akurat dengan toleransi yang ketat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses yang optimal adalah Pulse Current 7 [21 A], Gap-Width 27, On Time 12 [1040 µs], dan Off Time 8 [720 µs]. Nilai laju pengerjaan maksimal yang diperoleh adalah sebesar 32.80 mm³/menit dengan kekasaran permukaan sebesar 4.94 µm.

Salah satu proses manufaktur yang semakin berkembang adalah proses EDM Sinking. Proses ini merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghasilkan komponen manufaktur yang akurat dengan toleransi yang ketat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan parameter proses EDM Sinking dengan menggunakan metode optimasi non-linear programming (NLP) dan metode optimasi permukaan respons (RSM). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kombinasi parameter proses yang optimal untuk menghasilkan komponen manufaktur yang akurat dengan toleransi yang ketat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses yang optimal adalah Pulse Current 7 [21 A], Gap-Width 27, On Time 12 [1040 µs], dan Off Time 8 [720 µs]. Nilai laju pengerjaan maksimal yang diperoleh adalah sebesar 32.80 mm³/menit dengan kekasaran permukaan sebesar 4.94 µm.

MAXIMIZING MATERIAL REMOVAL RATE WITH SURFACE ROUGHNESS AS CONSTRAINT AT WHITTLE PROCESS OF EDM SINKING MACHINE

Student Name : Bagus Tris Purwanto
NRP : 2102 100 088
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Project Advisor : Ir. Bobby Oedy P. S., M.Sc, PhD.

Abstract

Several desired performances of EDM Sinking process are high material removal rate (MRR) and low surface roughness. The problem is how to set up the process variables in order to maximize material removal rate (MRR) with surface roughness as constrain.

To maximize the process, the relationship between the above mentioned EDM Sinking performances and process variables Pulse Current, Gap-Width, On Time and Off Time were determined using response surface and linear programming method. The models obtained from an experiment that conducted using Box-Behnken Design.

From this research, the second order polynomial empirical models of material removal rate and workpiece surface roughness obtained. The Maximizing was resulted the highest material removal rate (MRR) of 32.80 mm³/min and the lowest workpiece surface roughness of 4.94 μ m. These two values were obtained using level of Pulse Current of 7 [21 A], Gap-Width of 27, On Time of 12 [1040 μ s] and Off Time of 8 [720 μ s].

Keywords: Maximizing, EDM Sinking, response surface, Box-Behnken, non-linear programming.

KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini terselesaikan dengan bimbingan, dukungan, bantuan, serta kerja sama dari berbagai pihak. Untuk itu, dalam kesempatan ini dengan segala hormat dan kerendahan hati penyusun ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Bobby Oedy P. S., M.Sc, PhD., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir atas waktu, tenaga, pikiran, dedikasi, kesabaran, saran, arahan, bimbingan serta masukan-masukannya dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Achmad Muljana, selaku dosen penguji Tugas Akhir sekaligus Kepala Laboratorium Metrologi atas ijin yang diberikan dalam penggunaan peralatan di Laboratorium Metrologi dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Sampurno, MT, selaku dosen penguji Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati M.Sc.Eng, PhD., selaku dosen penguji Tugas Akhir.
5. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT, selaku Kasie Proposal dan Tugas Akhir.
6. Ibu Ir. Wyakti Mahandani, selaku dosen wali.
7. Bapak Dr. Ing Herman Sasongko, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
8. Segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin. Mas Faisal, Mas Luki, dan Mas Pur atas segala informasinya dan waktunya, Pak Matroni, Pak Gianto, Bu Sri, dll.

9. Bapakku, Ibuku, dan adekku Ita yang senantiasa memberikan segenap kasih sayang, perhatian, doa, materi, semangat, waktu dan segalanya yang tidak dapat digantikan dengan apapun.
10. Asih Ayu Sukmawati, yang selalu setia mendampingi, yang telah memberi warna, keindahan, dan semangat dalam hidupku. Terima kasih atas perhatian, cinta dan kasih sayangnya selama ini.
11. Teman-teman M-45, Rois "*rios*" (*suwon ngeprine*), Afrie "*injonk*" (*suwon bantuan lan semangate*), Deny "*cor*" (*sepurane aku siding disikan*), Eko "*komenk*", Hasan, Irham, Nawang, Lukman "*durex*", Adi "*kencretz*", Novan, *thank's guys*.
12. Rekan-rekan *Manufacture Study Club*, Popin, Abet, Dian, Linda, Vinda, dan yang lainnya yang kenal aku, terima kasih do'anya.
13. *Konco-konco* kost GW 14, Lutfi "*cinta*", Yudha "*T-Rex*", *thank's* semangat, materi, dan *do'ane* om. Pa'i (*suwon silihan laptope*), Maman (*matur suwon nasehate*), Rony "*Bargowo*", Ilham, dan Ketut, *suwon yo rek*.
14. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penyusun sebutkan satu-persatu.

Penyusun menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam Tugas Akhir ini, untuk itu, penyusun mengharapkan kritik dan saran untuk menyempurnakan Tugas Akhir ini. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juli 2009

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Batasan dan Asumsi Penelitian	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Tinjauan Umum Proses Permesinan <i>EDM</i>	7
2.2. Prinsip Kerja Dasar Pada Proses <i>EDM</i>	7
2.3. Klasifikasi Proses <i>EDM</i>	11
2.4. Elektrode (Pahat)	12
2.5. Laju Pengerjaan Material	14
2.6. Kekasaran Permukaan	15
2.7. Variabel-variabel Proses Pada <i>EDM Sinking</i>	17
2.8. Desain Eksperimen	19
2.8.1. Metode Permukaan Respon	21
2.8.2. Analisa Statik Hasil Percobaan	21
2.8.3. Optimasi Respon	28
2.8.4. Validasi Respon Optimal	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1. Diagram Alir Penelitian	31
3.2. Variabel Penelitian	33

3.3.	Karakteristik Respon Optimum	34
3.4.	Rancangan Percobaan	34
3.5.	Bahan dan Peralatan Penelitian	37
3.5.1.	Bahan Penelitian	37
3.5.2.	Peralatan Penelitian	38
3.6.	Prosedur Pelaksanaan Percobaan	40
3.7.	Pengukuran dan Pengambilan Data	41
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1.	Hasil Pengamatan	43
4.2.	Analisa Pendugaan Model	45
4.2.1.	Analisa Pendugaan Model Kekasaran Permukaan Benda Kerja	45
4.2.2.	Analisa Pendugaan Model Laju Pengerjaan Material (MRR)	48
4.3.	Plot Permukaan	52
4.3.1.	Plot Permukaan Untuk Kekasaran Permukaan	52
4.3.2.	Plot Permukaan Untuk Laju Pengerjaan Material (MRR)	58
4.4.	Pembahasan	65
4.4.1.	Analisa Variabel Proses Terhadap Kekasaran Permukaan	65
4.4.2.	Analisa Variabel Proses Terhadap Laju Pengerjaan Material (MRR)	67
4.5.	Optimasi Respon	69
4.5.1.	Penentuan Titik Maksimum pada Model MRR	70
4.5.2.	Penentuan Titik Minimum pada Model Kekasaran Permukaan	73
4.5.3.	Optimasi Dual Respon	76
4.6.	Eksperimen Konfirmasi	79
4.6.1.	Percobaan Konfirmasi Terhadap Nilai Respon Optimum	79

4.6.2. Percobaan Konfirmasi Terhadap Persamaan Empiris Perautan	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1. Kesimpulan	85
5.2. Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN-LAMPIRAN	xxv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema proses <i>EDM Sinking</i>	8
Gambar 2.2	Proses ionisasi	9
Gambar 2.3	Bagan pengelompokan proses <i>EDM</i>	11
Gambar 2.4	Pengaruh arus listrik dan frekuensi terhadap bentuk kawah	15
Gambar 2.5	Parameter kekasaran permukaan	16
Gambar 2.6	Hubungan antara <i>on-time</i> , <i>off-time</i> , <i>pulse current</i> dan <i>ignition Voltage</i>	19
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	31
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian (lanjutan)	32
Gambar 3.3	Model dan dimensi benda kerja	37
Gambar 3.4	Model dan dimensi elektroda	37
Gambar 3.5	Mesin <i>EDM Sinking</i> (pandangan atas)	38
Gambar 3.6	<i>Surface roughness tester</i> (MITUTOYO <i>Surftest-401</i>)	39
Gambar 3.7	Model benda kerja hasil perautan	41
Gambar 4.1	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Gap-Width</i> terhadap kekasaran permukaan	53
Gambar 4.2	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Gap-Width</i> terhadap kekasaran permukaan	53
Gambar 4.3	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>On Time</i> terhadap kekasaran permukaan	54
Gambar 4.4	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>On Time</i> terhadap kekasaran permukaan	54
Gambar 4.5	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Off Time</i> terhadap kekasaran permukaan	55
Gambar 4.6	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Off Time</i> terhadap kekasaran permukaan	55
Gambar 4.7	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>On Time</i> terhadap kekasaran permukaan	56
Gambar 4.8	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>On Time</i> terhadap kekasaran permukaan	56

Gambar 4.9	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>Off Time</i> terhadap kekasaran permukaan	57
Gambar 4.10	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>Off Time</i> terhadap kekasaran permukaan	57
Gambar 4.11	<i>Surface Plot</i> parameter <i>On Time</i> dan <i>Off Time</i> terhadap kekasaran permukaan	58
Gambar 4.12	<i>Contour Plot</i> parameter <i>On Time</i> dan <i>Off Time</i> terhadap kekasaran permukaan	58
Gambar 4.13	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Gap-Width</i> terhadap MRR	59
Gambar 4.14	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Gap-Width</i> terhadap MRR	60
Gambar 4.15	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>On Time</i> terhadap MRR	60
Gambar 4.16	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>On Time</i> terhadap MRR	61
Gambar 4.17	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Off Time</i> terhadap MRR	61
Gambar 4.18	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Pulse Current</i> dan <i>Off Time</i> terhadap MRR	62
Gambar 4.19	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>On Time</i> terhadap MRR	62
Gambar 4.20	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>On Time</i> terhadap MRR	63
Gambar 4.21	<i>Surface Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>Off Time</i> terhadap MRR	63
Gambar 4.22	<i>Contour Plot</i> parameter <i>Gap-Width</i> dan <i>Off Time</i> terhadap MRR	64
Gambar 4.23	<i>Surface Plot</i> parameter <i>On Time</i> dan <i>Off Time</i> terhadap MRR	64
Gambar 4.24	<i>Contour Plot</i> parameter <i>On Time</i> dan <i>Off Time</i> terhadap MRR	65
Gambar 4.25	Grafik pengaruh variabel proses terhadap kekasaran permukaan pada nilai tengah	66

Gambar 4.26	Grafik pengaruh variabel proses terhadap MRR pada nilai tengah	68
Gambar 4.27	Model maksimasi MRR dengan batas rentang parameter eksperimen	71
Gambar 4.28	Hasil perhitungan nilai optimum pada MRR dengan batas rentang parameter eksperimen ...	72
Gambar 4.29	Model minimasi kekasaran permukaan dengan batas rentang parameter eksperimen	74
Gambar 4.30	Hasil perhitungan nilai optimum pada kekasaran permukaan dengan batas rentang parameter eksperimen	75
Gambar 4.31	Model maksimum dual respon MRR dengan kendala kekasaran permukaan dan dengan batas parameter eksperimen	77
Gambar 4.32	Hasil perhitungan nilai optimum dual respon MRR dengan kendala kekasaran permukaan dan dengan batas parameter eksperimen	78

DAFTAR TABEL

Table 2.1	ANOVA	23
Table 3.1	Rancangan percobaan <i>Box-Behnken</i>	36
Table 4.1	Data hasil percobaan	44
Table 4.2	Hasil analisa regresi untuk kekasaran permukaan	45
Table 4.3	Hasil analisa regresi untuk MRR	49
Table 4.4	Hasil eksperimen konfirmasi nilai respon optimum	80
Tabel 4.5	Hasil eksperimen konfirmasi nilai respon secara acak	81

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Saat ini kemajuan teknologi industri telah berkembang sedemikian pesatnya. Salah satunya telah banyak ditemukan logam-logam baru yang memiliki tingkat kekerasan, keuletan, dan kekuatan yang lebih tinggi. Berbagai kendala akan terjadi pada saat logam-logam tersebut digunakan dalam proses pemesinan. Selain tuntutan terhadap kualitas kekasaran permukaan yang halus, ketelitian, serta kepresisian geometri produk yang tinggi menjadi salah satu tujuan utama dari proses pemesinan, bentuk-bentuk benda kerja yang semakin kompleks juga menjadi kendala tersendiri. Oleh karena itu digunakan proses pemesinan non-konvensional untuk mengatasi kendala-kendala tersebut.

Proses pemesinan non-konvensional yang banyak digunakan salah satunya adalah *Electrical Discharge Machining (EDM)*. *Electrical Discharge Machining (EDM)* merupakan proses non-konvensional, dimana prinsip kerjanya adalah dengan memanfaatkan lompatan bunga api listrik yang terjadi antara benda kerja dengan pahat (elektroda) (Pandey, 1980). Proses *EDM* ini tidak dipengaruhi oleh kekerasan, keuletan maupun kegetasan benda kerja, tetapi dipengaruhi oleh *melting point* dari benda kerja. *Electrical Discharge Machine Sinking (EDM Sinking)* adalah salah satu jenis *EDM* yang sering digunakan dalam pembuatan *cavity* untuk cetakan (*mold*), maupun untuk pembuatan dies.

Kualitas kekasaran permukaan hasil pemotongan *EDM Sinking* yang halus, dapat diperoleh dengan menjalankan laju pengerjaan material selambat mungkin. Tetapi proses yang berjalan lambat, akan berpengaruh terhadap waktu penyelesaian produk, dan akan meningkatkan biaya produksi yang harus dikeluarkan.

Besarnya laju pengerjaan material atau *Metal Removal Rate (MRR)* dan kekasaran permukaan (*surface roughness*) hasil

pemotongan *EDM Sinking* tergantung pada beberapa parameter, seperti arus listrik (*pulse current*), *On Time*, dan *Off Time* yang digunakan. Semakin besar nilai arus listrik dan *On Time* sementara nilai *Off Time* semakin kecil, akan menghasilkan laju pengerjaan material yang semakin besar. Tetapi nilai arus listrik dan *On Time* yang tinggi, sedangkan *Off Time* yang terlalu rendah, menyebabkan kualitas permukaan hasil pemotongan yang kasar (*H. Walter-Exeron 104 E Machining Technical Data Book*).

Oleh karena itu parameter proses pemotongan pada *EDM Sinking* perlu di-*setting* dengan tepat, untuk dapat menghasilkan kualitas permukaan hasil pemotongan dan laju pengerjaan material yang optimal.

Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai karakteristik dan variabel yang berpengaruh pada proses *EDM Sinking*. Atlantika (1993) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter proses terhadap *MRR* dan *surface finish* pada proses *EDM* dengan metode *response surface*, dengan kesimpulan bahwa *MRR* dan kekasaran permukaan dipengaruhi oleh arus listrik dan *On Time pulse*. Setiawan (1996) meneliti hubungan antara *pause duration*, tekanan statis pada cairan dielektrikum, *pulse duration*, dan kuat arus terhadap laju pengerjaan benda kerja dan keausan elektroda. Pada percobaan yang dilakukan oleh Setiawan, elektroda yang digunakan adalah tembaga dan kuningan sedangkan benda kerja yang digunakan adalah SKD 11. Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Setiawan adalah bahwa variabel-variabel kuat arus listrik, tekanan statis cairan dielektrikum dan *pause duration* bersifat meningkatkan laju pengerjaan benda kerja dan elektroda, sedangkan variabel *pulse duration* akan menghambat laju pengerjaan baik pada benda kerja maupun elektroda. Sapto (2001) meneliti pengaruh arus, tegangan dan *On Time* terhadap laju keausan elektroda, kekasaran permukaan dan *overcut*. Dalam percobaannya digunakan elektroda berupa tembaga dan benda kerjanya adalah SKD 11. Sapto menarik kesimpulan bahwa besarnya laju keausan elektroda, kekasaran permukaan dan

overcut dipengaruhi oleh arus listrik, *On Time pulse* dan tegangan. Ardianto (2004) meneliti pengaruh arus listrik, *On Time* dan *Off Time* terhadap *MRR* dan kekasaran permukaan yang dihasilkan. Ardianto menggunakan benda kerja berupa elektroda tembaga dan benda kerjanya adalah aluminium. Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan yang dilakukan oleh Ardianto adalah kekasaran permukaan yang dihasilkan pada proses *EDM* tergantung dari besarnya arus listrik, *On Time* dan *Off Time*. Semakin besar arus listrik dan *On Time* maka kekasaran yang terjadi akan semakin besar, sebaliknya jika *Off Time* yang digunakan semakin kecil maka kekasaran permukaan yang terjadi akan semakin rendah juga. Begitu juga *MRR* benda kerja akan berbanding lurus terhadap arus dan *On Time*, namun akan berbanding terbalik terhadap nilai *Off Time*. Vaani and Hameedullah (2005) mengoptimalkan parameter pada mesin *EDM* dengan *tool steel* yang dikeraskan sebagai benda kerja dan elektroda berupa aluminium yang dilapisi tembaga. Vaani and Hameedullah memilih parameter proses berupa *pulse On Time*, *discharge current*, *discharge voltage* dan *flushing pressure*, sedangkan variabel responnya berupa *metal removal rate (MRR)* dan *surface roughness*. Kesimpulan yang dapat diambil adalah bahwa *discharge voltage* dan *pulse On Time* akan mempengaruhi *MRR*, sedangkan *surface roughness* dipengaruhi oleh *discharge voltage*, *discharge current* dan *pulse On Time*. Behren and Ginzler (2002) meneliti tentang perbandingan pengontrolan nilai *gap-width* yang optimal, dan dari hasil percobaan yang dilakukan diperoleh pengaturan *gap-width* yang paling optimal sehingga didapatkan *MRR* benda kerja yang lebih tinggi.

Pada beberapa penelitian yang telah dijelaskan, pembahasan hanya terbatas pada bagaimana hubungan parameter-parameter hasil proses terhadap karakteristik proses *EDM Sinking*, belum dibahas bagaimana *setting* parameter atau variabel proses yang dapat menghasilkan respon yang optimal. Untuk itu perlu dikembangkan model hubungan antara variabel proses *On Time*, *Off Time*, arus listrik (*pulse current*), dan celah diantara

benda kerja dan elektroda (*gap-width*) pada mesin *EDM sinking* dengan respon yang berupa kekasaran permukaan dan *MRR* benda kerja. Untuk melakukan optimasi digunakan metode *response surface* dan *non-linear programming*, dimana rancangan percobaannya menggunakan rancangan percobaan *Box-Behnken*.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut diatas, maka rumusan masalah yang akan menjadi kajian dalam penelitian tugas akhir ini, adalah:

- Bagaimana model hubungan antara variabel-variabel proses *On Time*, *Off Time*, arus listrik (*pulse current*), dan celah diantara benda kerja dan elektroda (*gap-width*) pada mesin *EDM sinking* terhadap laju pengerjaan material (*MRR*) dan kekasaran permukaan benda kerja yang dihasilkan.
- Bagaimana *setting* yang tepat pada proses *EDM Sinking* sehingga didapat laju pengerjaan material yang maksimal dan kekasaran permukaan benda kerja yang minimal.

1.3. Batasan dan Asumsi Penelitian

Agar pembahasan lebih terarah, pada penelitian ini diberikan batasan sebagai berikut:

1. Percobaan dilakukan pada mesin *H. Walter-Exeron 104 E*.
2. Benda kerja yang digunakan adalah *HPM 38*.
3. Elektroda yang digunakan adalah *Copper (Cu)*.
4. Rangkaian listrik yang ada pada mesin *EDM Sinking* tidak dibahas.

Sedangkan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin yang digunakan memenuhi persyaratan operasional.
2. Benda kerja memiliki komposisi kimia yang homogen.

3. Proses pemesinan berjalan dengan baik.
4. Variabel lain pada proses *EDM Sinking* konstan.

1.4. Tujuan Penelitian

Dengan mengacu pada perumusan masalah diatas, maka penelitian ini bertujuan:

- Mengetahui model hubungan variabel-variabel proses *On Time*, *Off Time*, arus listrik (*pulse current*), dan celah diantara benda kerja dan elektroda (*gap-width*) serta interaksi antar variabel proses terhadap laju pengerjaan material (*MRR*) dan kekasaran permukaan benda kerja.
- Menentukan *setting* variabel proses yang tepat agar diperoleh laju pengerjaan material (*MRR*) maksimal dan kekasaran permukaan minimal dengan menggunakan metode *response surface* dan *non-linear programming*.

1.5. Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang akan dilakukan ini, diharapkan dapat memberikan manfaat terutama kepada operator mesin *EDM Sinking* mengenai *setting* yang tepat pada penggunaan HPM 38 sebagai benda kerja. Diharapkan dari *setting* mesin tersebut akan dihasilkan produk dalam waktu yang singkat dan kekasaran permukaan yang halus.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum Proses Pemesinan EDM

Proses pemesinan non-konvensional adalah proses pemotongan material tanpa menggunakan pahat, tetapi dilakukan menggunakan energi. Lahirnya proses pemesinan ini didorong oleh kebutuhan proses pemesinan yang semakin sulit diperoleh dengan proses pemesinan konvensional, kebutuhan tersebut antara lain adalah:

1. Pemotongan material logam dan non-logam baru (yang mempunyai sifat-sifat: kekuatan tinggi, kekerasan tinggi, keuletan tinggi, dan lain-lain).
2. Pemotongan dengan bentuk geometri yang ireguler atau kompleks.
3. Keperluan untuk menghindari cacat pada permukaan material akibat pemotongan dengan menggunakan cara konvensional.

Proses EDM merupakan proses pemesinan secara non-konvensional yang memanfaatkan energi termal. Energi termal pada proses EDM didapat dari proses peloncatan bunga api listrik yang terjadi secara tidak kontinu tetapi periodik pada celah diantara pahat dan benda kerja. Panas dari loncatan bunga api akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja dan elektroda, yang kemudian terbawa oleh aliran fluida yang berada pada celah antara benda kerja dan elektroda. Dengan demikian besarnya kecepatan pengerjaan benda kerja tidak dipengaruhi oleh kekerasan maupun kekuatan dari benda kerja, tetapi oleh temperatur leleh dari benda kerja itu sendiri. Hal ini menyebabkan proses EDM dapat digunakan untuk meraut yang memiliki kekerasan dan kekuatan yang sangat tinggi.

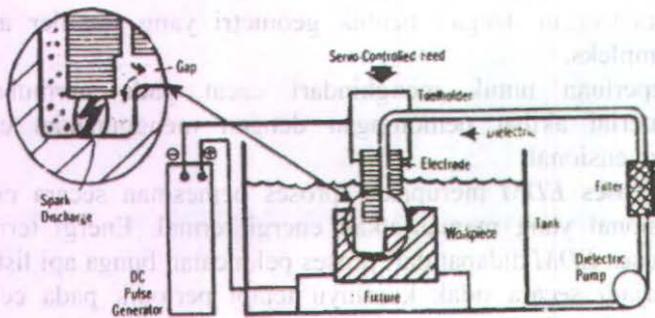
2.2. Prinsip Kerja Dasar Pada Proses EDM

Pada proses EDM *Sinking*, pahat dan benda kerja berada dalam cairan dielektrik yang pada dasarnya bersifat sebagai media

isolator. Untuk memungkinkan terjadinya loncatan bunga listrik, maka beda tegangan antara katoda dan anoda harus melampaui *dielectric break down voltage*. *Break down voltage* tergantung dari (Sommer dan Sommer, 2005):

- Jarak pada dua posisi terdekat antara elektroda dan benda kerja.
- Sifat isolator dari fluida dielektrik yang digunakan.
- Tingkat polusi yang terjadi pada celah dielektrikum tersebut.

Secara umum skema proses *EDM Sinking* ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut ini (Tlustý, 2000):

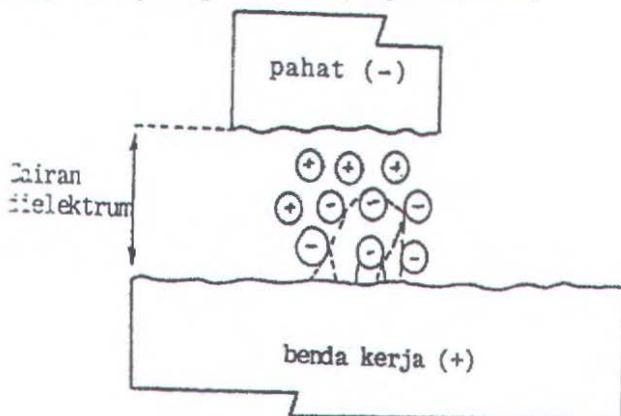


Gambar 2.1 Skema proses *EDM Sinking*

Proses terjadinya loncatan bunga api listrik diantara benda kerja dan elektroda pada proses *EDM Sinking* adalah sebagai berikut:

- Pengaruh medan listrik yang ada diantara elektroda dan benda kerja menyebabkan terjadinya pergerakan ion positif dan elektron, masing-masing menuju kutub-kutub yang berlawanan. Akhirnya terbentuklah saluran ion yang bersifat konduktif.
- Pada kondisi tersebut, maka arus listrik bisa mengalir melalui saluran ion tersebut dan terjadilah loncatan bunga

api listrik. Proses ionisasi pada proses *EDM Sinking* ditunjukkan pada gambar 2.2 (Bagiasna, 1987).



Gambar 2.2 Proses ionisasi

Proses terbentuknya saluran ion dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Dengan adanya medan listrik antara elektroda dan benda kerja, elektron-elektron bebas yang terdapat pada permukaan katoda (elektroda) akan tertarik menuju anoda (benda kerja). Didalam pergerakannya menuju anoda, maka elektron-elektron yang berenergi kinetis ini akan bertumbukan dengan molekul-molekul dielektrik.
2. Didalam proses tumbukan antara elektron bebas dengan molekul dielektrik, terjadi dua macam keadaan:
 - a. Tumbukan biasa, yang menyebabkan elektron akan berkurang energi kinetiknya.
 - b. Bila energi kinetik elektron bebas sedemikian tingginya sehingga proses tumbukan menghasilkan elektron baru yang berasal dari molekul dielektrik, maka molekul dielektrik yang telah kehilangan elektronnya akan menjadi ion yang bermuatan positif dan akan tertarik ke arah katoda.

3. Dengan adanya proses tumbukan elektron dengan molekul yang menghasilkan elektron-elektron baru dan juga membentuk ion-ion yang baru maka akhirnya terbentuklah saluran ion.
4. Dengan terbentuknya saluran ion, maka tahanan listrik pada saluran tersebut menjadi rendah sekali sehingga terjadilah pelepasan energi listrik dalam waktu yang singkat berupa loncatan bunga api listrik.

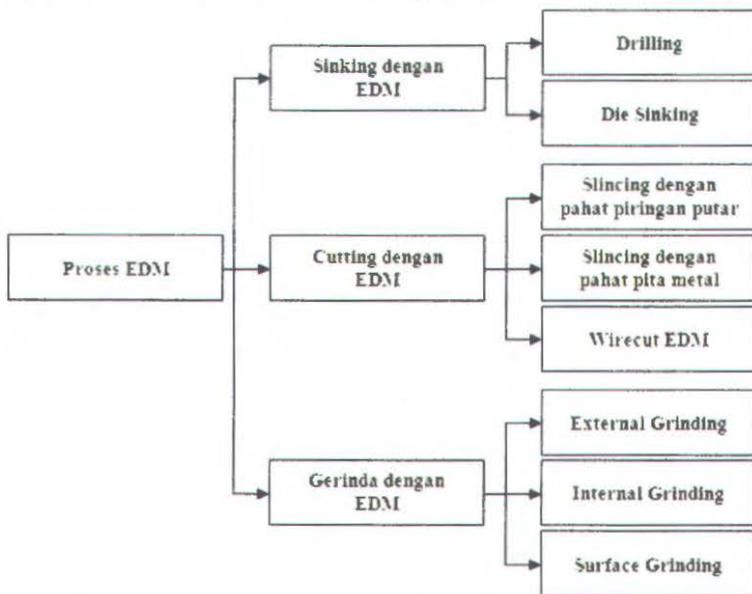
Mekanisme terjadinya proses perautan pada proses *EDM Sinking* dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Loncatan bunga api menyebabkan terjadinya pemusatan aliran elektron yang bergerak dengan kecepatan yang tinggi dan menumbuk permukaan benda kerja. Bagian yang terkena tumbukan tersebut akan menyebabkan terjadinya kenaikan temperatur. Pada kondisi tersebut tegangan akan turun dan arus naik.
2. Loncatan bunga api yang terjadi terus meningkat dan temperaturnya dapat mencapai $8000^{\circ}\text{C} - 12000^{\circ}\text{C}$. Kenaikan temperatur tersebut akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja maupun pada elektroda. Pada saat yang bersamaan terjadi juga penguapan, baik pada benda kerja, pahat maupun cairan dielektrik. Kenaikan temperatur tersebut juga menyebabkan membesarnya volume maupun tekanan selubung uap yang terjadi. Beda potensialnya akan makin turun dan arusnya makin naik.
3. Arus dan tegangan listrik putus pada saat tepat mencapai *Off Time*. Pada kondisi ini volume dan tekanan gelembung uap mencapai maksimum, begitu juga dengan volume pelelehan material yang terjadi. Pada kondisi ini pula resistensi cairan dielektrik pada celah pahat dan benda kerja akan meningkat sehingga loncatan bunga api akan terputus.
4. Berhentinya loncatan bunga api, selubung gas yang terjadi akan mengkerut dengan cepat dan menjadi vakum.
5. Penurunan temperatur yang sangat cepat terutama pada selubung gas, menyebabkan selubung gas tersebut

mengkerut dan meledak. Dengan meledaknya selubung gas tersebut menyebabkan bagian material yang meleleh akan terpecah keluar dari permukaan dan meninggalkan bekas berupa kawah-kawah halus pada permukaan material. Bagian yang terpecah ini secepatnya membeku kembali dan berbentuk partikel halus yang kemudian terbawa oleh aliran cairan dielektrik.

2.3. Klasifikasi Proses EDM

Pada umumnya proses pengerjaan dengan menggunakan EDM dapat dibagi dalam tiga kelompok, yaitu proses *sinking*, proses *cutting* dan proses *grinding*. Klasifikasi proses EDM secara keseluruhan terlihat didalam gambar 2.3 (Pandey, 1980).



Gambar 2.3 Bagan pengelompokan proses EDM

EDM Sinking adalah suatu proses *EDM* yang umumnya digunakan untuk pembuatan rongga, pada proses *molding* untuk plastik maupun pada *dies*.

2.4. Elektroda (pahat)

Secara teoritis setiap material yang bersifat konduktor listrik dapat dipergunakan sebagai elektroda pahat didalam proses *EDM*. Elektroda yang baik adalah yang memiliki temperatur *melting* yang tinggi dan tahanan listriknya rendah. Secara umum elektroda untuk *tool* pada proses *EDM* dibagi menjadi dua, yaitu kelompok metalik dan grafit. Beberapa logam dari kelompok metalik yang biasanya digunakan sebagai elektroda antara lain (Guitrau, 1997):

- *Brass/zinc*

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

- *Copper*

Copper memiliki resistensi listrik yang rendah, tetapi titik lelehnya juga rendah yaitu 1083 °C. Semakin rendah resistensi listrik yang dimiliki elektroda, maka akan menyebabkan semakin cepat laju pengerjaan benda kerja (*MRR*). Semakin tinggi titik leleh yang dimiliki elektroda, maka akan menyebabkan semakin rendah laju keausan elektroda. Umumnya dalam penggunaan *copper* sering dilakukan penambahan elemen *tellurium* antara 0.5 sampai 1%, dengan tujuan untuk mempermudah proses pemesinan dari *copper*.

- *Tungsten*

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

- *Copper Tungsten*

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

- *Silver tungsten*

Menghasilkan paduan yang memiliki resistensi yang lebih kecil dari *copper tungsten*, namun ketahanan terhadap keausannya sama. Karena mahalannya maka paduan ini digunakan hanya untuk kondisi tertentu saja.

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

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

Keuntungan:

- ✓ Metalik

Harganya murah, kekuatannya tinggi, proses pemesinannya aman, ukuran butirnya sangat kecil sehingga memungkinkan untuk proses *mirror finishing*, bersih, dapat digunakan untuk pelapisan, dapat digunakan pada proses *wirecut*.

- ✓ Grafit

Mudah untuk *dimachining*, kecepatan pengerjaan benda kerja (*MRR*) tinggi, ketahanan terhadap keausan sangat baik, dapat diabrasi dengan menggunakan mesin ultrasonik.

Kerugian:

- ✓ **Metalik**

Indeks kemampuan untuk digerinda rendah, terjadi *burr*, kecepatan proses *machining* lambat, tingkat keausannya tinggi.

- ✓ **Grafit**

Harganya mahal, debu dari hasil pengerjaannya cukup berbahaya walaupun tidak beracun, pada waktu dipotong dengan menggunakan *wirecut* akan berjalan sangat lambat, grafit adalah material yang getas sehingga harus berhati-hati sewaktu membuat pahat dengan sisi yang tajam.

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

2.5. Laju Pengerjaan Material

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

Laju pengerjaan material dapat didefinisikan sebagai besarnya volume material yang terbuang tiap satuan waktu (mm^3/min) dan dirumuskan sebagai berikut (<http://dspace.unimap.edu.my/bitstream/123456789/2397/5/Methodology.pdf>, 2007):

$$MRR = \frac{\text{Volume Material yang Terbuang}}{\text{Waktu Pengerjaan}} \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad \dots(2.1)$$

2.6. Kekasaran Permukaan

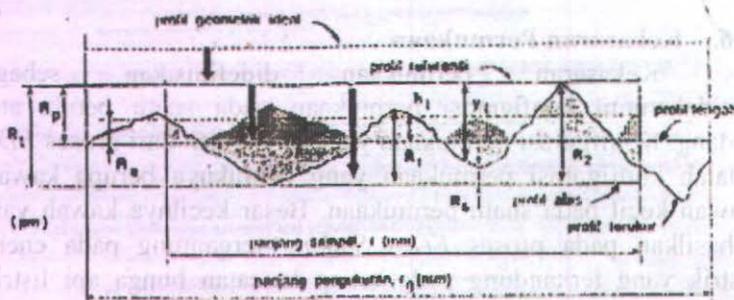
Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakaturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Konfigurasi permukaan yang dihasilkan dari proses *EDM* adalah konfigurasi permukaan yang bentuknya berupa kawah-kawah kecil pada suatu permukaan. Besar kecilnya kawah yang dihasilkan pada proses *EDM Sinking* tergantung pada energi listrik yang terkandung pada setiap loncatan bunga api listrik. Pengaruh besarnya arus dan frekuensi terhadap *surface finish* dilihat pada gambar 2.4 (Krar dan Check, 1997).



Gambar 2.4 Pengaruh arus listrik dan frekuensi terhadap bentuk kawah

Pada gambar 2.4, penggunaan arus yang lebih besar pada frekuensi yang sama akan menghasilkan kawah yang lebih besar. Dengan demikian akan menyebabkan terbentuknya permukaan yang lebih kasar dan *Metal Removal Rate (MRR)* yang lebih besar. Namun jika frekuensi yang digunakan semakin besar untuk arus konstan, akan dihasilkan *surface finish* yang lebih halus.

Profil-profil pada kekasaran permukaan dapat dilihat pada gambar 2.5 dibawah ini (Rochim, 1985):



Gambar 2.5 Parameter kekasaran permukaan

Keterangan pada gambar 2.5 adalah sebagai berikut:

1. Profil geometri ideal (*geometrical ideal profile*) adalah profil permukaan sempurna (dapat berupa garis lurus, lengkung atau busur).
2. Profil terukur (*measure profile*) adalah profil permukaan yang terukur oleh alat ukur.
3. Profil referensi/acuan/puncak (*reference profile*) adalah profil yang digunakan sebagai acuan untuk menganalisis ketidakaturan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel.
4. Profil tengah adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai ke profil terukur adalah sama dengan jumlah dari daerah-daerah dibawah profil tengah sampai ke profil terukur.
5. Profil alas adalah profil referensi yang digeser ke arah tegak lurus profil geometris ideal menyinggung titik terendah dari profil terukur.

Berdasarkan profil tersebut diatas, dapat didefinisikan parameter-parameter kekasaran permukaan sebagai berikut:

1. Kedalaman total (R_t/R_{Max}) adalah kedudukan antara profil referensi dan profil dasar.
2. Kekasaran rata-rata aritmetis (R_a) adalah harga rata-rata aritmetis dari nilai absolut jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum y (\mu m) \quad \dots(2.2)$$

3. Kekasaran puncak rata-rata (R_z) adalah harga rata-rata dari kekasaran puncak yang dihitung 5 kali berturut-turut mengikuti kedalaman puncak dengan membagi jarak panjang sampel yang sama. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_z = \sqrt{\frac{\sum y^2}{N}} \quad \dots(2.3)$$

2.7. Variabel-variabel Proses pada *EDM Sinking*.

Beberapa parameter yang ada dalam mesin *EDM sinking* H Walter Exeron 104. Adalah sebagai berikut:

1. *Pulse Current*

Pulse current menyatakan besarnya arus listrik yang mengalir. Semakin besar arus listrik yang mengalir akan memperbesar energi listrik yang dilepaskan, dengan demikian akan mengakibatkan luasan daerah benda kerja yang mampu dilelehkan semakin besar. Akibatnya *MRR* dan kekasaran permukaan yang terjadi akan semakin besar pula.

2. *Ignition Voltage*

Ignition voltage menyatakan besarnya tegangan listrik yang digunakan pada mesin *EDM Sinking*. Penggunaan tegangan listrik yang lebih tinggi akan memantapkan pelonctan bunga api.

3. *On Time*

On Time menyatakan waktu proses pembentukan saluran ion hingga terjadi loncatan bunga api. Nilai *On Time* yang tinggi akan menyebabkan terjadinya peloncatan bunga api yang lebih lama, sehingga panas yang diterima oleh benda kerja akan semakin banyak yang tentunya akan menyebabkan luasan daerah kerja yang dilelehkan semakin besar. Sehingga *MRR* yang terjadi akan meningkat serta akan meningkatkan kekasaran permukaan yang dihasilkan.

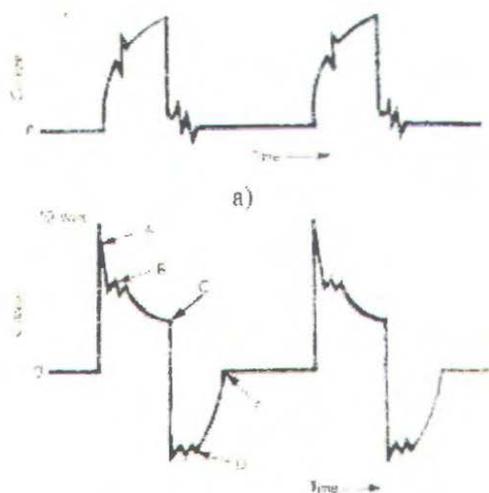
4. *Off Time*

Off Time menyatakan waktu arus listrik berhenti untuk sesaat (*pause*) sebelum loncatan bunga api listrik yang selanjutnya. Nilai *Off Time* yang rendah akan meningkatkan *machining speed*, sehingga *MRR* akan meningkat.

5. *Gap-width*

Gap-width menyatakan celah diantara benda kerja dan elektroda, lebar atau sempitnya *gap-width* akan mempengaruhi terjadinya *break down voltage*. *Gap-width* yang optimal akan menghasilkan loncatan bunga api yang stabil serta proses perautan yang efisien (Behrens and Ginzel, 2002).

Secara umum hubungan antara *On Time*, *Off Time*, *pulse current* dan *ignition voltage* dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini (Cilliers, 2002):



Gambar. 2.6 Hubungan antara *On Time*, *Off Time*, *pulse current* dan *ignition voltage*

2.8. Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan suatu metode statistik yang digunakan sebagai salah satu alat untuk meningkatkan atau melakukan perbaikan kualitas. Desain eksperimen dapat didefinisikan sebagai suatu uji atau rentetan uji dengan mengubah-ubah variabel *input* suatu proses sehingga dapat diketahui penyebab perubahan *output* (respon) agar dapat dicari *setting* variabel *input* yang dapat mengoptimalkan respon (*output*). Desain eksperimen memerlukan tahap-tahap penting yang berguna agar desain mengarah pada hasil yang diinginkan. Berikut adalah langkah-langkah melakukan desain eksperimen (Iriawan dan Astuti, 2006):

1. Mengenal Permasalahan

Tahap awal desain eksperimen adalah mengenali permasalahan. Tahap ini merupakan tahap penting sebagai permulaan suatu eksperimen. Dengan melakukan

identifikasi permasalahan, diperoleh suatu kesimpulan yang dapat menjawab segala permasalahan. Dari permasalahan yang ada kemudian dibuat suatu pernyataan yang tepat mewakili permasalahan agar memperoleh penyelesaian yang tepat.

2. Memilih Variabel Respon

Tahap kedua adalah menetapkan variabel respon. Variabel respon adalah variabel dependen, yaitu variabel yang dipengaruhi oleh level faktor atau kombinasi level faktor.

3. Menentukan Faktor dan Level

Tahap selanjutnya adalah menentukan faktor dan level faktor dalam suatu eksperimen. Peneliti harus pula menentukan cara mengendalikan faktor dan cara mengukurnya. Tahap ini memerlukan pengetahuan yang lebih mengenai permasalahan yang akan diteliti agar faktor dan level yang ditentukan tidak menyimpang jauh dari hasil yang diinginkan.

4. Memilih Metode Desain Eksperimen

Metode desain eksperimen harus disesuaikan dengan tujuan penelitian dan permasalahan yang ada. Beberapa metode desain eksperimen antara lain desain faktorial, desain *Taguchi*, dan permukaan respon. Dalam penelitian ini digunakan metode permukaan respon (*response surface*).

5. Melaksanakan Percobaan

Selama eksperimen dilakukan, proses harus diamati dengan cermat agar eksperimen berjalan sesuai rencana. Sebelum percobaan dilakukan terlebih dahulu dibuat rancangan percobaan. Dalam penelitian ini dipilih rancangan percobaan *Box-Behnken Design*.

6. Menganalisis Data

Analisis data merupakan dasar dalam membuat suatu keputusan dan pernyataan yang tepat. Analisis data pada

desain eksperimen dilakukan sesuai dengan metode yang dibuat. Salah satu tahap dalam analisis data eksperimen adalah melakukan analisis residual dan uji kecukupan model.

7. Membuat Suatu Keputusan

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

2.8.1. Metode Permukaan Respon

Metodologi permukaan respon (*response surface methodology*) adalah kumpulan dari teknik-teknik statistika dan matematika yang berguna untuk menganalisa permasalahan tentang variabel bebas yang mempengaruhi variabel tak bebas atau respon, serta bertujuan mengoptimumkan respon itu. Dengan demikian, metodologi permukaan respon dapat dipergunakan oleh peneliti untuk (Gaspersz, 1995):

1. Mencari suatu fungsi pendekatan yang cocok untuk meramalkan respon yang akan datang.
2. Menentukan nilai-nilai dari variabel bebas yang mengoptimumkan respon yang dipelajari.

2.8.2. Analisis Statistik Hasil Percobaan

Analisis statistik yang tepat sangat diperlukan untuk pengambilan keputusan. Saat ini permasalahan-permasalahan statistika tidak lagi menjadi masalah yang rumit karena seiring dengan perkembangan teknologi komputer, pekerjaan statistik sangat terbantu dengan adanya program aplikasi komputer untuk statistik. Dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak *Minitab 14* untuk membantu dalam analisa statistik.

1. Analisa Regresi

Tahap pertama dalam metode permukaan respon adalah mencari fungsi hubungan antara variabel respon dan variabel bebas yang tepat. Untuk mengetahui hubungan

tersebut biasanya dibuat model regresi. Untuk memilih model yang paling sesuai biasanya diperiksa apakah model antar variabel adalah model linier (model orde satu) atau model polinomial. Apabila dalam sistem terdapat pola tidak linier, maka model yang tepat adalah model polinomial orde tinggi. Secara umum bentuk persamaan regresi orde pertama dinyatakan sebagai berikut.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad \dots(2.4)$$

dengan:

Y = Variabel respon

β_0 = Intersep

β_i = Koefisien parameter model

X_i = Nilai koding variabel bebas

ε = Residual dengan asumsi IIDN $(0, \sigma^2)$

Untuk taksiran orde pertama adalah :

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i \quad \dots(2.5)$$

dengan :

\hat{Y} = Nilai taksiran

b_0 = Konstanta

b_i = Taksiran parameter

X_i = Variabel bebas

Sedangkan persamaan untuk model orde kedua ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad \dots(2.6)$$

$i < j$

Pendugaan untuk model orde kedua dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} X_i X_j \quad \dots(2.7)$$

$i < j$

Jika $k = 4$ penduga untuk model orde kedua menjadi

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 \\ & + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 \\ & + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad \dots(2.8) \end{aligned}$$

Untuk dapat mengestimasi kontribusi pengaruh dari setiap faktor pada respon sehingga akurasi model yang digunakan dapat ditentukan dapat digunakan analisa varians (ANOVA) yang merupakan teknik perhitungan secara kuantitatif. Tabel ANOVA ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1. ANOVA

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

Keterangan :

n_e = (banyak pengulangan) - 1

k = banyak variabel prediktor

n = banyak pengamatan

Total variasi dari data dinyatakan dengan *Total Sum Square* (SS_T). SS_T sendiri terdiri dari SS_R , yaitu total variasi dari regresi yang dihasilkan, dan SS_E , yaitu total variasi yang tidak terhitung (*error*). SS_E terbagi kedalam SS_{PE} (*pure error*), yaitu total variasi yang didapat dari replikasi dan SS_L (*lack of fit*) yang menyatakan variasi ketidakcukupan model. Harga SS_{PE} merupakan total variansi dari data yang direplikasi. Derajat kebebasan dari SS_{PE} merupakan total jumlah data yang direplikasi dan bergantung pada jumlah replikasi, sedangkan SS_L merupakan selisih SS_E dengan SS_{PE} .

2. Pengujian Model Statistik

Beberapa pengujian model statistik yang lazim digunakan adalah sebagai berikut:

a. Pengujian Kesesuaian Model

Pengujian model meliputi pengujian terhadap adanya *lack of fit* pada pendugaan model, serta pengujian koefisien determinasi (R^2)

Pengujian *Lack of fit*

Pengujian model orde satu atau orde kedua dapat dilakukan dengan menggunakan uji *lack of fit*. Tujuan pengujian *lack of fit* adalah untuk mengetahui kesesuaian model yang dihasilkan. Hipotesa dari pengujian ini adalah sebagai berikut:

H_0 : Tidak ada *lack of fit* dalam model

H_1 : Ada *lack of fit* dalam model

Statistik uji adalah:

$$F_{rasio} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad \dots(2.9)$$

Uji *lack of fit* untuk orde pertama ditunjukkan dalam Tabel 2.1. Daerah penolakan yaitu tolak H_0 apabila $F_{rasio} > F_{(\alpha; n-k-1-n_e, n_e)}$, yang berarti ada ketidaksesuaian (*lack of fit*) antara model yang diduga dengan model sebenarnya.

Pengujian Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi (R^2) adalah suatu nilai statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah ada hubungan pengaruh antara dua variabel (variabel X dan Y). Nilai koefisien determinasi menunjukkan presentase total variasi nilai variabel dependen (Y) yang dapat dijelaskan oleh persamaan regresi yang dihasilkan. Koefisien determinasi nilainya terletak antara $0 < R^2 < 1$. Semakin besar nilai R^2 , maka semakin besar pula pengaruh semua variabel X terhadap variabel Y. Misalnya R^2 dari hasil perhitungan adalah 0.87 atau 87% maka berarti total variasi nilai Y yang dapat dijelaskan oleh model persamaan regresi adalah 87% dan sisanya yaitu 13% adalah variasi nilai variabel Y yang dipengaruhi oleh variabel lain yang berada diluar model.

b. Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian koefisien regresi dapat dilakukan secara individu dan serentak.

Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Pengujian parameter secara individu digunakan untuk mengetahui seberapa besar sumbangan tiap-tiap parameter variabel bebas terhadap terjadinya

perubahan pada variabel respon Y dalam model.
Hipotesisnya adalah:

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

Statistik uji : $t = \frac{b_i}{s(b_i)}$ dengan b_i adalah taksiran β_i

sedangkan $s(b_i)$ dirumuskan dengan:

$$s(b_i) = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \quad \dots(2.10)$$

Penolakan hipotesis H_0 dilakukan jika

$$|t_{hitung}| > t_{n-k-1; \alpha/2}$$

Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesis yang digunakan dalam pengujian parameter regresi secara serentak adalah sebagai berikut:

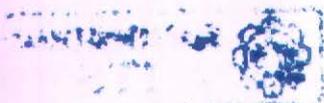
$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \beta_i \neq 0$$

Statistik uji yang digunakan:

$$F_{hitung} = MS_R / MS_E = \frac{SS_R / k}{SS_E / (N - 1 - k)} \quad \dots(2.11)$$

Penolakan hipotesis H_0 pada tingkat signifikansi α dilakukan apabila $F_{hitung} > F_{(\alpha; k, n-1-k)}$, yang berarti secara statistik variabel-variabel X memberikan sumbangan yang cukup berarti dalam model.



c. **Pemeriksaan Asumsi Residual**

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

Pengujian Independen

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

Pengujian Identik

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

Pengujian Distribusi Normal

Normal probability plot pada *software Minitab 14* menyatakan probabilitas dari residual suatu respon.

Selain itu, dengan *Kolmogorov-Smirnov normality test* juga dapat digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesa yang digunakan adalah:

H_0 : residual berdistribusi normal.

H_1 : residual tidak berdistribusi normal.

Terima H_0 apabila $P_{value} > \alpha$

2.8.3. Optimasi Respon

Dengan model yang sudah sesuai, optimasi ditujukan untuk memperoleh nilai maksimal dari laju pengerjaan pada kekasaran permukaan tertentu dengan menggunakan *non-linear programming*. Sebagai respon primer adalah laju pengerjaan dan sebagai respon sekunder adalah kekasaran permukaan. Model matematika tersebut adalah sebagai berikut:

Memaksimalkan nilai laju pengerjaan:

$$\begin{aligned} Z_{\text{primer}} = Z_p = & b_0 + b_1 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \\ & + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 \\ & + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 \\ & + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad \dots(2.12) \end{aligned}$$

dengan $Z_p = Y_{\text{Laju Pengerjaan}} = Y_{\text{MRR}}$

Sebagai kendala adalah kekasaran permukaan, yaitu:

$$\begin{aligned} Z_{\text{sekunder}} = Z_s \geq & b_0 + b_1 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \\ & + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 \\ & + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 \\ & + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad \dots(2.13) \end{aligned}$$

dengan $Z_s = Y_{\text{Kekasaran Permukaan}} = Y_{\text{KP}}$

Batasan nilai parameter proses adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} 4 \leq X_1 \leq 12 & \quad X_1 = \text{Pulse Current} \\ 27 \leq X_2 \leq 53 & \quad X_2 = \text{Gap-Width} \\ 2 \leq X_3 \leq 12 & \quad X_3 = \text{On Time} \end{aligned}$$

$$2 \leq X_4 \leq 10 \quad X_4 = \textit{Off Time}$$

Penyelesaian model matematika tersebut dilakukan dengan menggunakan program optimasi dari perangkat lunak LINGO.

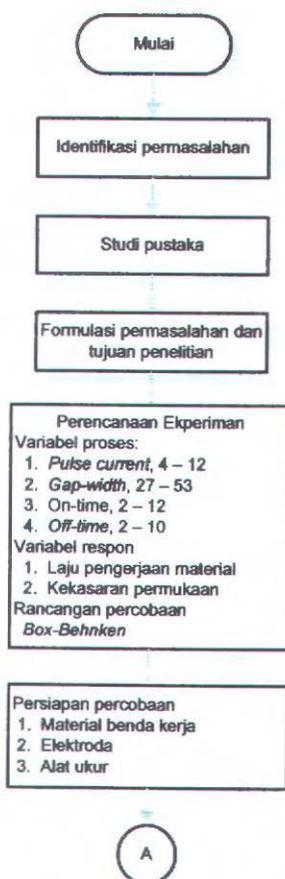
2.8.4. Validasi Respon Optimal

Validasi atau percobaan konfirmasi bertujuan untuk membuktikan apakah level-level variabel bebas yang secara perhitungan optimasi dapat menghasilkan nilai respon yang optimal, dapat menghasilkan nilai respon yang optimal atau tidak. Percobaan konfirmasi dilakukan berulang-ulang pada parameter dan level yang dihasilkan dari perhitungan optimasi.

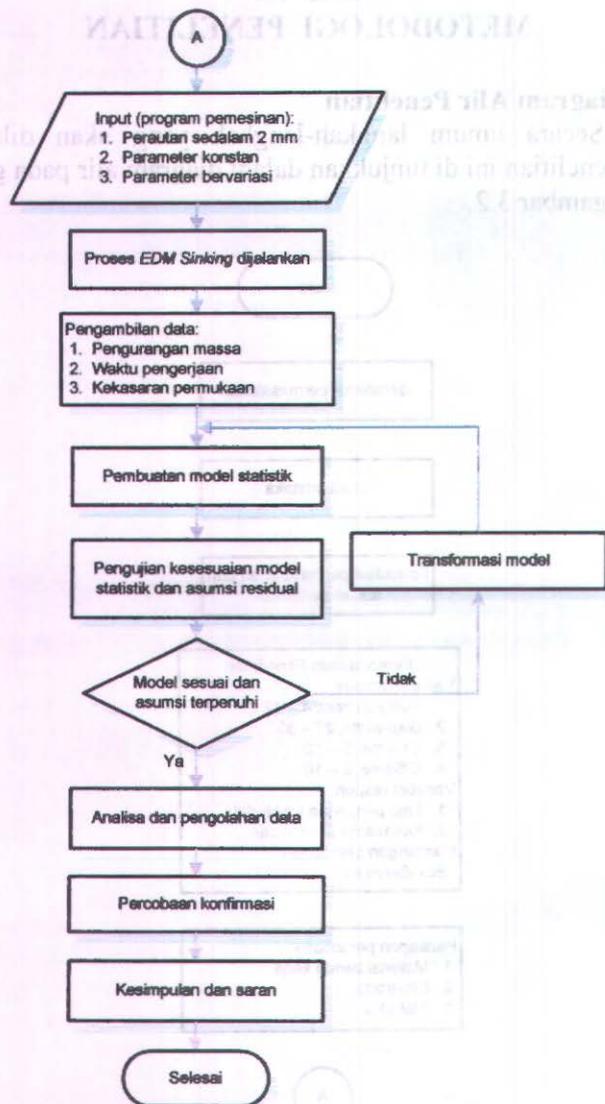
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Secara umum langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini di tunjukkan dalam diagram alir pada gambar 3.1 dan gambar 3.2.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian (lanjutan)

3.2. Variabel Penelitian

Beberapa variabel yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

1. Variabel tak bebas (respon)

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

a. Y_1 : Laju pengerjaan material benda kerja

Laju pengerjaan material benda kerja yang diamati dalam penelitian ini adalah pengurangan massa dan waktu pengerjaan material benda kerja. Nilai laju pengerjaan material benda kerja yang diinginkan dalam percobaan ini adalah sebesar mungkin.

b. Y_2 : Kekasaran permukaan benda kerja

Kekasaran permukaan benda kerja yang diharapkan dalam percobaan ini adalah sekecil mungkin.

2. Variabel proses (parameter)

Variabel proses adalah variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan. Beberapa variabel proses yang diteliti pada mesin H. Walter Exeron 104 E, antara lain:

a. Arus listrik (*pulse current*)

Arus listrik yang dihasilkan pada mesin EDM antara 0 – 45 A yang kemudian dibagi kedalam 15 level. Percobaan ini dilakukan pada interval antara level 4 hingga 12. Level 4 sebagai taraf rendah, level 8 sebagai taraf sedang dan level 12 sebagai taraf tinggi.

b. *On Time*

On Time yang dihasilkan pada mesin EDM antara 1 – 1600 μ s yang kemudian dibagi kedalam 19 level. Percobaan ini dilakukan pada interval antara level 2

hingga 12. Level 2 sebagai taraf rendah, level 7 sebagai taraf sedang dan level 12 sebagai taraf tinggi.

c. *Off Time*

Off Time yang dihasilkan pada mesin EDM antara 1 – 1600 μ s yang kemudian dibagi kedalam 19 level. Percobaan ini dilakukan pada interval antara level 2 hingga 10. Level 2 sebagai taraf rendah, level 6 sebagai taraf sedang dan level 10 sebagai taraf tinggi.

d. *Gap-width*

Gap-width dapat diatur mulai 0 hingga 99, namun dalam pengoperasian mesin disarankan diatur antara 20 hingga 60. Percobaan ini dilakukan pada interval antara 27 hingga 53. *Gap-width* 27 sebagai taraf rendah, 40 sebagai taraf sedang dan 53 sebagai taraf tinggi.

3. Variabel konstan

Variabel konstan merupakan variabel proses yang tidak diteliti. Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian.

3.3. Karakteristik Respon Optimum

Karakteristik respon optimum yang diinginkan adalah sebagai berikut ini:

- Laju pengerjaan material, yang diinginkan adalah laju pengerjaan material yang maksimum.
- Kekasaran permukaan, yang diinginkan adalah kekasaran permukaan yang minimum.

3.4. Rancangan Percobaan

Untuk mendapatkan nilai variabel proses yang menghasilkan laju pengerjaan dan kekasaran permukaan yang optimal dilakukan serangkaian percobaan dengan metode *response surface*, dan menggunakan rancangan percobaan *Box-Behnken* dan *non-linear programming*, dimana sebagai respon

primer adalah laju pengerjaan dan sebagai respon sekunder adalah kekasaran permukaan. Rancangan percobaan *Box-Behnken* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam tabel 3.1 berikut ini:

Persamaan transformasi

$$1. X_1 = \frac{(\text{pulse current}) - 8}{4} \quad \dots(3.1)$$

$$2. X_2 = \frac{(\text{Gap-width}) - 40}{13} \quad \dots(3.2)$$

$$3. X_3 = \frac{(\text{on-time}) - 7}{5} \quad \dots(3.3)$$

$$4. X_4 = \frac{(\text{off-time}) - 6}{4} \quad \dots(3.4)$$

Tabel 3.1 Rancangan Percobaan *Box-Behnken*

Std Order	Run Order	Taraf Parameter				Parameter				Kekasaran Permukaan	MRR
		X1	X2	X3	X4	Pulse Current	Gap-Width	On time	Off time		
10	1	1	0	-1	0	12	40	2	6		
20	2	1	0	0	1	12	40	7	10		
27	3	0	0	0	0	8	40	7	6		
21	4	0	-1	-1	0	8	27	2	6		
13	5	0	-1	0	-1	8	27	7	2		
16	6	0	1	0	1	8	53	7	10		
17	7	-1	0	0	-1	4	40	7	2		
7	8	0	0	-1	1	8	40	2	10		
23	9	0	-1	1	0	8	27	12	6		
26	10	0	0	0	0	8	40	7	6		
1	11	-1	-1	0	0	4	27	7	6		
3	12	-1	1	0	0	4	53	7	6		
14	13	0	1	0	-1	8	53	7	2		
4	14	1	1	0	0	12	53	7	6		
8	15	0	0	1	1	8	40	12	10		
5	16	0	0	-1	-1	8	40	2	2		
25	17	0	0	0	0	8	40	7	6		
15	18	0	-1	0	1	8	27	7	10		
11	19	-1	0	1	0	4	40	12	6		
6	20	0	0	1	-1	8	40	12	2		
2	21	1	-1	0	0	12	27	7	10		
18	22	1	0	0	-1	12	40	7	2		
19	23	-1	0	0	1	4	40	7	10		
22	24	0	1	-1	0	8	53	2	6		
24	25	0	1	1	0	8	53	12	6		
12	26	1	0	1	0	12	40	12	6		
9	27	-1	0	-1	0	4	40	2	6		

3.5. Bahan dan Peralatan Penelitian

3.5.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Benda kerja

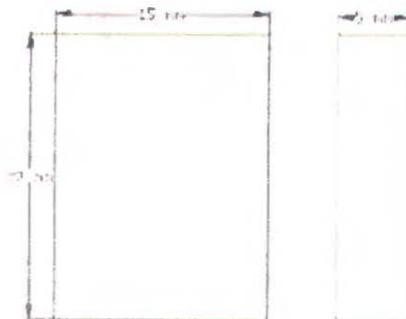
Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah HPM 38 (HITACHI) atau setara dengan SUS420J2 (JIS), 420 (AISI) atau 35CrMo17 (DIN). Baja tersebut adalah baja yang khusus digunakan untuk pembuatan *mold* untuk plastik. Bentuk dan dimensi dari benda kerja yang akan digunakan ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Model dan dimensi benda kerja

2. Elektroda

Elektroda yang digunakan sebagai pahat dalam penelitian ini adalah *copper*. Bentuk dan dimensi dari elektroda *copper* yang akan digunakan ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Model dan dimensi elektroda

3.5.2 Peralatan Penelitian

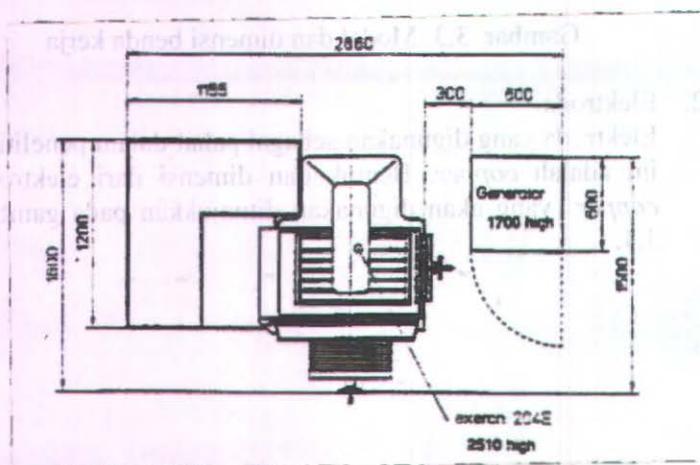
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Mesin EDM Sinking

Mesin EDM Sinking yang digunakan dalam penelitian ini adalah H. Walter-Exeron 104 E dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Dimensi : 2860 x 1800 x 2510 mm
- Arah pergerakan : X – 600 mm
Y – 350 mm
Z – 600 mm
- Fluida dielektrik : Dielektrikum IME 82
- Arus maksimum : 45 A (15 tingkat)
- On Time maksimum : 1600 μ s
- Off Time maksimum : 1600 μ s

Bentuk dan dimensi Mesin EDM Sinking ditunjukkan dengan pandangan atas pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Mesin EDM Sinking (pandangan atas)
(H. Walter-Exeron 104 E Machining Technical Data Book)

2. Peralatan ukur

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

a. Neraca Digital

Neraca digital digunakan untuk mengetahui massa elektroda, baik sebelum maupun sesudah proses perautan dengan menggunakan *EDM Sinking*. Pada penelitian ini digunakan neraca digital *Melter AE 200* dengan ketelitian 0,1 mg.

b. *Stop watch*

Stop watch digunakan untuk menghitung waktu aktual proses *die sinking*.

c. *Micrometer*

Micrometer digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja dan elektroda baik sebelum maupun sesudah proses perautan. *Micrometer* yang digunakan adalah *MITUTOYO* dengan kecermatan 0,01 mm.

d. *Surface roughness tester*

Alat ukur ini digunakan untuk mengetahui angka kekasaran permukaan produk yang dihasilkan dari suatu proses pemesinan. *Surface roughness tester* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *MITUTOYO SurfTest-401*.



Gambar 3.6 *Surface roughness tester* (MITUTOYO *SurfTest-401*)

3.6. Prosedur Pelaksanaan Percobaan

Langkah-langkah pelaksanaan percobaan sebagai berikut:

1. Penyiapan benda kerja dan elektroda, berupa penyesuaian dimensi dan memastikan tidak ada cat atau kotoran serta perataan dan penghalusan permukaan benda kerja dan elektroda, Kemudian dilakukan pengukuran dimensi dan massa benda kerja dan elektroda.
2. Pemasangan benda kerja. Benda kerja dan meja mesin dibersihkan dari minyak, kemudian benda kerja disusun pada meja mesin *EDM Sinking*. Untuk memastikan bahwa posisi benda kerja tidak berubah, maka pada tepi-tepi benda kerja yang bersentuhan dengan meja mesin diberi perekat.
3. Pemasangan elektroda pada *holder* mesin *EDM Sinking*. Untuk memastikan bahwa posisi elektroda tidak miring, maka digunakan dial indikator.
4. Penentuan titik referensi. Elektroda digerakkan ke bawah hingga permukaan benda kerja dan elektroda bersentuhan. Saat keduanya bersentuhan alarm pada mesin akan berbunyi, kemudian sumbu *Z* di-*set nol*. Setelah itu mesin diprogram untuk meraut sedalam 2 mm serta *inputkan* nilai variabel bebas pada mesin.
5. Angkat elektroda sejauh 10 mm ke atas permukaan benda kerja dan atur posisi *nozzle*.
6. Alirkan cairan dielektik kemudian jalankan mesin *EDM Sinking*.
7. Catat waktu perautan mulai terjadi *spark* yang pertama hingga mesin berhenti. Mesin akan berhenti, jika elektroda sudah bergerak ke bawah sejauh 2 mm terhadap titik referensi.
8. Matikan mesin, tunggu hingga cairan dielektrik dalam bak penampung habis kemudian ambil benda kerja dan elektroda.
9. Keringkan elektroda dan benda kerja kemudian ukur massanya.

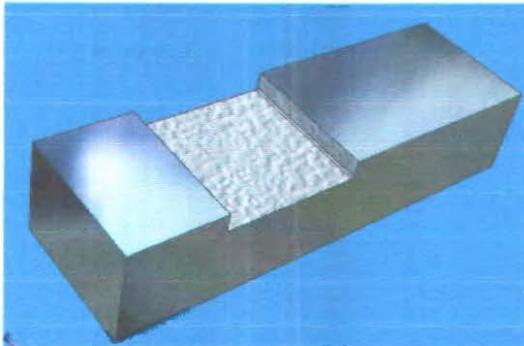
10. Ukur kedalaman hasil perautan benda kerja. Kemudian hitung nilai standar deviasi. Nilai standart deviasi akan menunjukkan nilai kepresisian hasil perautan.

3.7. Pengukuran dan Pengambilan data

Beberapa data variabel respon yang diambil dalam percobaan ini, antara lain:

1. Laju pengerjaan material benda kerja

Laju pengerjaan material benda kerja yang diamati adalah pengurangan volumetrik. Nilai pengurangan volumetrik didapat dari selisih antara massa benda kerja sebelum dan sesudah proses perautan. Pengukuran massa sebelum dan sesudah proses perautan pada benda kerja digunakan neraca digital *Melter AE 200*. Model elektroda yang telah diraut dengan menggunakan mesin *EDM Sinking* ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Model benda kerja hasil perautan

2. Kekasaran permukaan benda kerja

Data kekasaran permukaan benda kerja didapat dari pengukuran di permukaan benda kerja secara langsung.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Studi eksperimen pengaruh parameter proses terhadap MRR dan kekasaran permukaan benda kerja dilaksanakan dengan menggunakan mesin *EDM Sinking* H. Walter-Exeron 104 E. Rancangan eksperimen menggunakan *Box-Behnken Design (BBD)* dan dihitung dengan perangkat lunak MINITAB 14®. Data yang diperoleh dari penelitian ini berupa massa benda kerja dalam satuan mg, waktu pengerjaan dalam satuan menit, dan kekasaran permukaan dalam satuan μm . Pendugaan model empiris MRR dan kekasaran permukaan dari data dilakukan dengan metode respon permukaan.

4.1. Hasil Pengamatan

Setelah dilakukan proses perautan terhadap benda kerja dengan kombinasi level parameter proses perautan yang sesuai dengan rancangan eksperimen (tabel 3.1), langkah selanjutnya adalah melakukan pengukuran. Pengukuran pertama adalah pengukuran waktu pengerjaan dengan menggunakan alat ukur *stop watch*. Setelah itu dilakukan pengukuran massa benda kerja dengan menggunakan neraca digital. Pengukuran selanjutnya adalah pengukuran kekasaran permukaan benda kerja dengan menggunakan *Surface roughness tester*.

Dari hasil pengukuran yang dilakukan didapat besarnya waktu pengerjaan, massa dan kekasaran permukaan benda kerja pada masing-masing kombinasi parameter proses sesuai dengan rancangan eksperimen *Box-Behnken*. Data hasil eksperimen ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4.1 Data hasil eksperimen.

Run Order	Parameter				Kekasaran Permukaan (μm)	MRR (mm^3/min)
	Pulse Current	Gap-Width	On time	Off time		
1	12	40	2	6	7.55	12.38
2	12	40	7	10	9.15	20.39
3	8	40	7	6	3.55	41.90
4	8	27	2	6	4.95	20.80
5	8	27	7	2	7.30	32.85
6	8	53	7	10	4.90	18.53
7	4	40	7	2	6.35	15.64
8	8	40	2	10	4.75	9.74
9	8	27	12	6	7.90	36.77
10	8	40	7	6	3.45	41.31
11	4	27	7	6	5.50	22.50
12	4	53	7	6	5.20	17.34
13	8	53	7	2	5.25	28.13
14	12	53	7	6	7.70	22.40
15	8	40	12	10	5.70	27.30
16	8	40	2	2	5.25	19.90
17	8	40	7	6	3.85	38.87
18	8	27	7	10	5.60	29.80
19	4	40	12	6	5.65	18.07
20	8	40	12	2	8.05	31.69
21	12	27	7	6	10.50	35.72
22	12	40	7	2	9.40	30.03
23	4	40	7	10	4.85	14.25
24	8	53	2	6	4.25	17.35
25	8	53	12	6	5.55	26.24
26	12	40	12	6	10.30	30.66
27	4	40	2	6	4.85	7.91

4.2. Analisa Pendugaan Model

Untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel proses terhadap variabel respon pada proses perautan mesin EDM *Sinking*, data pada tabel 4.1 diolah dengan menggunakan perangkat lunak MINITAB.

4.2.1. Analisa Pendugaan Model Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Analisa yang didapatkan pada pendugaan model untuk kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil analisa regresi untuk kekasaran permukaan.

Estimated Regression Coefficients for Kekasaran Permukaan						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	3.6167	0.11110	32.553	0.000		
Pulse Current	1.8500	0.05555	33.303	0.000		
Gap-Width	-0.7417	0.05555	-13.351	0.000		
On Time	0.9625	0.05555	17.326	0.000		
Off Time	-0.5542	0.05555	-9.976	0.000		
Pulse Current*Pulse Current	2.5019	0.08333	30.577	0.000		
Gap-Width*Gap-Width	0.2929	0.08333	11.976	0.000		
On Time*On Time	0.8867	0.08333	12.201	0.000		
Off Time*Off Time	1.1517	0.08333	14.901	0.000		
Pulse Current*Gap-Width	-1.6250	0.09622	-6.496	0.000		
Pulse Current*On Time	0.4875	0.09622	5.067	0.000		
Pulse Current*Off Time	0.3125	0.09622	3.248	0.007		
Gap-Width*On Time	-0.4125	0.09622	-4.287	0.001		
Gap-Width*Off Time	0.3375	0.09622	3.508	0.004		
On Time*Off Time	-2.3625	0.09622	-4.807	0.000		
S = 0.1924 R-Sq = 99.6% R-Sq(adj) = 99.1%						
Analysis of Variance for Kekasaran Permukaan						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	102.955	102.9553	7.3539	198.59	0.000
Linear	4	62.473	62.4729	15.6182	421.76	0.000
Square	4	35.587	35.5867	8.8967	240.25	0.000
Interaction	6	4.896	4.8956	0.8159	22.03	0.000
Residual Error	12	0.444	0.4444	0.0370		
Lack-of-Fit	10	0.358	0.3577	0.0358	0.83	0.662
Pure Error	2	0.087	0.0867	0.0433		
Total	26	103.400				

Sumber: Hasil olahan perangkat lunak MINITAB.

Dari tabel 4.2, dapat diketahui bahwa besarnya variasi respon yang dapat dijelaskan oleh pendugaan model ini mencapai 99.6% dan tidak terdapat *lack of fit* yang nyata yang ditunjukkan dengan nilai $p\text{-value} > \alpha$, yaitu sebesar 0.662. Dengan kata lain pendugaan model untuk kekasaran permukaan telah sesuai.

Pendugaan model untuk kekasaran permukaan terhadap variabel proses pada tabel 4.2 dapat diuji sebagai berikut:

1. Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model diatas, maka dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji R^2

Dari analisis tabel 4.2 diketahui bahwa sebanyak 99.6% variasi respon dapat dijelaskan dengan pendugaan ini.

b. Uji *Lack of Fit*

Dalam menentukan ketepatan model diperlukan uji *lack of fit*. Uji *lack of fit* adalah uji ketepatan model menggunakan *mean square lack of fit* dan *mean square pure error* dengan nilai distribusi F.

Hipotesa untuk uji *lack of fit* dari pendugaan model kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

H_0 : tidak ada *lack of fit* pada model.

H_1 : ada *lack of fit* pada model.

Pada level pengujian dengan $\alpha = 0.05$, nilai P dari *lack of fit* adalah 0.662, yang berarti diterima. Dengan demikian tidak terjadi *lack of fit* pada pendugaan model, sehingga pendugaan model ini memenuhi.

2. Pengujian Koefisien Regresi

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, hampir seluruh parameter proses memiliki $p\text{-value} < 0.05$. Hal ini berarti variabel-variabel tersebut mempunyai

pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan.

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak dari model kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_i tidak mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

H_1 : Paling tidak ada satu β_i yang mempengaruhi kekasaran permukaan.

Dengan level pengujian $\alpha = 0.05$, nilai P pada analisa regresi = 0.000 yang berarti lebih kecil dari 0.05. Dengan demikian paling tidak ada satu β_i yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan.

Nilai P dari regresi bagian linier, kuadratik serta interaksi nilainya lebih kecil dari 0.05. Ini artinya hubungan linier, kuadratik serta interaksi dari parameter-parameter proses mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan yang dihasilkan.

3. Pengujian Asumsi Residual

Dalam menduga model diperlukan asumsi bahwa residual bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan *mean* nol pada variasi tertentu IIDN $(0, \sigma^2)$. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

a. Uji identik

Pada lampiran 8 dapat dilihat bahwa plot *residual versus fitted values*, residual tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual identik terpenuhi.

b. Uji independen

Pengamatan pada penelitian ini telah dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antar

pengamatan. Hal ini dibuktikan dari plot ACF pada lampiran 8 yang menunjukkan bahwa semua korelasi masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$.

c. Uji distribusi normal

Pada lampiran 8 dapat diketahui bahwa dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* didapatkan *p-value* > 0.15 yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0.05$, dengan kata lain residual telah berdistribusi normal.

Dengan beberapa pengujian yang telah dilakukan diatas diketahui bahwa model yang memenuhi hubungan antara variabel pemotongan yaitu *Pulse Current* (PC), *Gap-Width* (GW), *On Time* (ON), dan *Off Time* (OFF) terhadap respon kekasaran permukaan dapat dirumuskan dengan persamaan empiris berikut ini:

$$\begin{aligned} Y_{KT}(\mu m) = & 3.6167 + (1.8500 * PC) - (0.7417 * GW) + (0.9625 * ON) \\ & - (0.5542 * OFF) + (2.5019 * PC^2) + (0.2929 * GW^2) \\ & + (0.8867 * ON^2) + (1.1517 * OFF^2) - (1.6250 * (PC * GW)) \\ & + (0.4875 * (PC * ON)) + (0.3125 * (PC * OFF)) \\ & - (0.4125 * (GW * ON)) + (0.3375 * (GW * OFF)) \\ & - (2.3625 * (ON * OFF)) \end{aligned}$$

4.2.2. Analisa Pendugaan Model Laju Pengerjaan Material (MRR)

Analisa yang didapatkan pada pendugaan model untuk MRR adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil analisa regresi untuk MRR.

Estimated Regression Coefficients for MRR						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	40.696	0.7059	57.654	0.000		
Pulse Current	4.656	0.3529	13.192	0.000		
Gap-Width	-4.037	0.3529	-11.439	0.000		
On Time	6.888	0.3529	19.518	0.000		
Off Time	-3.185	0.3529	-9.025	0.000		
Pulse Current*Pulse Current	-13.203	0.5294	-23.052	0.000		
Gap-Width*Gap-Width	-0.456	0.5294	-0.616	0.000		
On Time*On Time	-5.294	0.5294	-20.333	0.000		
Off Time*Off Time	-7.934	0.5294	-15.743	0.000		
Pulse Current*Gap-Width	-0.804	0.6113	-3.336	0.006		
Pulse Current*On Time	18.030	0.6113	3.320	0.006		
Pulse Current*Off Time	-0.206	0.6113	-3.376	0.006		
Gap-Width*On Time	-0.176	0.6113	-2.894	0.013		
Gap-Width*Off Time	-0.164	0.6113	-2.678	0.020		
On Time*Off Time	10.440	0.6113	2.357	0.036		
S = 1.223 R-Sq = 99.2% R-Sq(adj) = 98.4%						
Analysis of Variance for MRR						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	2354.15	2354.15	168.153	112.50	0.000
Linear	4	1146.88	1146.88	286.721	191.82	0.000
Square	4	1125.57	1125.57	281.393	186.26	0.000
Interaction	6	81.69	81.69	13.615	9.11	0.001
Residual Error	12	17.94	17.94	1.495		
Lack-of-Fit	10	12.78	12.78	1.278	0.50	0.816
Pure Error	2	5.16	5.16	2.578		
Total	26	2372.08				

Sumber: Hasil olahan perangkat lunak MINITAB.

Dari tabel 4.3, dapat diketahui bahwa besarnya variasi respon yang dapat dijelaskan oleh pendugaan model ini mencapai 99.2% dan tidak terdapat *lack of fit* yang nyata yang ditunjukkan dengan nilai *p-value* > dari α , yaitu sebesar 0.816. Dengan kata lain pendugaan model untuk MRR telah sesuai.

Pendugaan model untuk MRR terhadap variabel proses pada tabel 4.3 dapat diuji sebagai berikut:

1. Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model diatas, maka dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji R^2

Dari analisis tabel 4.3 diketahui bahwa sebanyak 99.2% variasi respon dapat dijelaskan dengan pendugaan ini.

b. Uji *Lack of Fit*

Dalam menentukan ketepatan model diperlukan uji *lack of fit*. Uji *lack of fit* adalah uji ketepatan model menggunakan *mean square lack of fit* dan *mean square pure error* dengan nilai distribusi F.

Hipotesa untuk uji *lack of fit* dari pendugaan model kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

H_0 : tidak ada *lack of fit* pada model.

H_1 : ada *lack of fit* pada model.

Pada level pengujian dengan $\alpha = 0.05$, nilai P dari *lack of fit* adalah 0.816, yang berarti diterima. Dengan demikian tidak terjadi *lack of fit* pada pendugaan model, sehingga pendugaan model ini memenuhi.

2. Pengujian Koefisien Regresi

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Pada pengujian dengan $\alpha = 0.05$, hampir seluruh parameter proses memiliki *p-value* < 0.05 . Hal ini berarti variabel-variabel tersebut mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap MRR.

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak dari model MRR adalah sebagai berikut:

H_0 : Semua β_i tidak mempunyai pengaruh terhadap MRR.

H_1 : Paling tidak ada satu β_i yang mempengaruhi MRR.

Dengan level pengujian $\alpha = 0.05$, nilai P pada analisa regresi = 0.000 yang berarti lebih kecil dari 0.05. Dengan demikian paling tidak ada satu β_i yang berpengaruh terhadap MRR.

Nilai P dari regresi bagian linier, kuadratik serta interaksi nilainya lebih kecil dari 0.05. Ini artinya hubungan linier, kuadratik serta interaksi dari parameter-parameter proses mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap laju pengerjaan (MRR).

3. Pengujian Asumsi Residual

Dalam menduga model diperlukan asumsi bahwa residual bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan mean nol pada variasi tertentu IIDN $(0, \sigma^2)$. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

a. Uji identik

Pada lampiran 9 dapat dilihat bahwa plot *residual versus fitted values*, residual tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual identik terpenuhi.

b. Uji independen

Pengamatan pada penelitian ini telah dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antar pengamatan. Hal ini dibuktikan dari plot ACF pada lampiran 9 yang menunjukkan bahwa semua korelasi masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$.

c. Uji distribusi normal

Pada lampiran 9 dapat diketahui bahwa dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* didapatkan *p-value* > 0.15 yang berarti lebih besar dari $\alpha = 0.05$, dengan kata lain residual telah berdistribusi normal.

Dengan beberapa pengujian yang telah dilakukan diatas diketahui bahwa model yang memenuhi hubungan antara variabel pemotongan yaitu *Pulse Current* (PC), *Gap-Width* (GW), *On Time* (ON), dan *Off Time* (OFF) terhadap respon MRR dapat dirumuskan dengan persamaan empiris berikut ini:

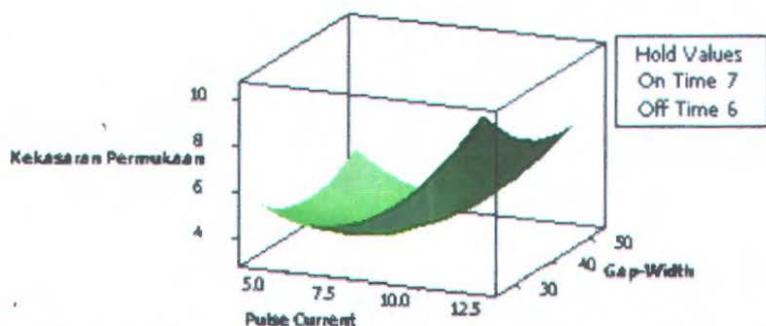
$$\begin{aligned}
 Y_{MRR}(\text{mm}^3/\text{menit}) = & 40.696 + (4.656 * PC) - (4.037 * GW) + (6.888 * ON) \\
 & - (3.185 * OFF) - (13.203 * PC^2) - (0.456 * GW^2) \\
 & - (5.294 * ON^2) - (7.934 * OFF^2) - (0.804 * (PC * GW)) \\
 & + (18.030 * (PC * ON)) - (0.206 * (PC * OFF)) \\
 & - (0.176 * (GW * ON)) - (0.164 * (GW * OFF)) \\
 & + (10.440 * (ON * OFF))
 \end{aligned}$$

4.3. Plot Permukaan

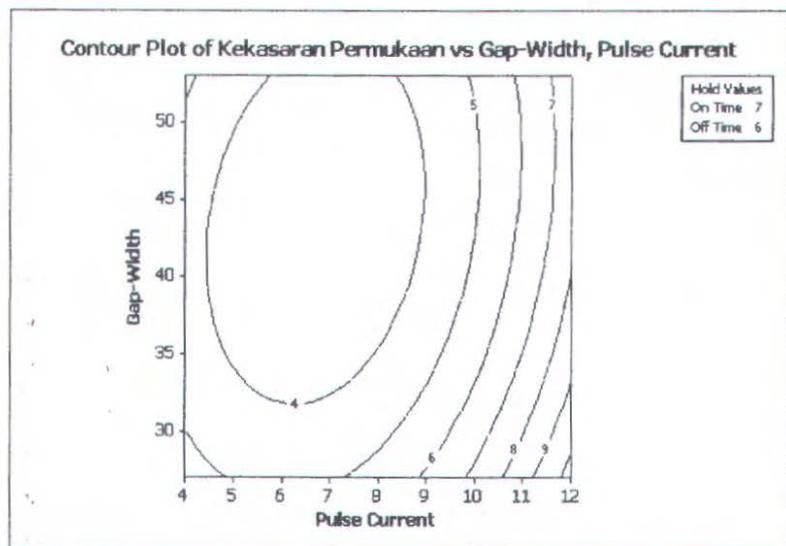
Sebelum melakukan optimasi dengan paket *response optimizer* pada *software Minitab 14*, sebenarnya titik optimal respon dapat diprediksi secara visual dengan mengamati plot permukaan dari model yang telah dibuat. Titik optimal seringkali terjadi pada daerah stasioner, baik lembah maupun puncak. Namun pada beberapa kasus, terjadi sebuah bentuk plot permukaan yang menyerupai pelana, dimana jika ditinjau dari salah satu sisi parameter tampak sebagai puncak, dan tampak sebagai lembah jika ditinjau dari sisi yang lain.

4.3.1. Plot Permukaan Untuk Kekasaran Permukaan

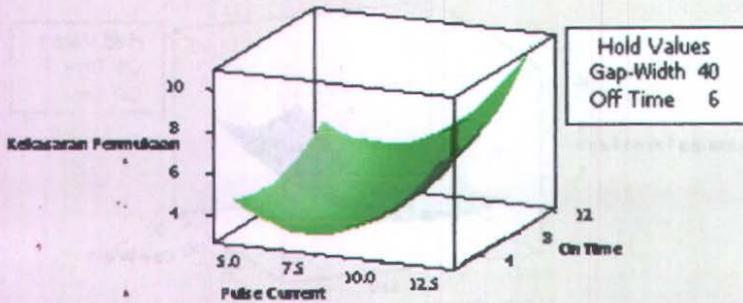
Gambar 4.1 hingga 4.12 berikut ini disajikan *surface* dan *contour plot* secara lengkap seluruh kombinasi variabel untuk respon kekasaran permukaan. Pada gambar 4.1. ditunjukkan *surface plot* parameter proses *Pulse Current* dan *Gap-Width* terhadap kekasaran permukaan yang dihasilkan pada nilai *On Time* konstan sebesar 7 dan nilai *Off Time* konstan sebesar 6. Pada grafik ini terlihat adanya titik stasioner berupa lembah. Dengan demikian pada pemilihan variabel-variabel proses perautan dengan nilai tertentu akan diperoleh kekasaran permukaan yang yang minimum. Hal yang tidak jauh berbeda terjadi pada *surface plot* variabel-variabel yang lain.



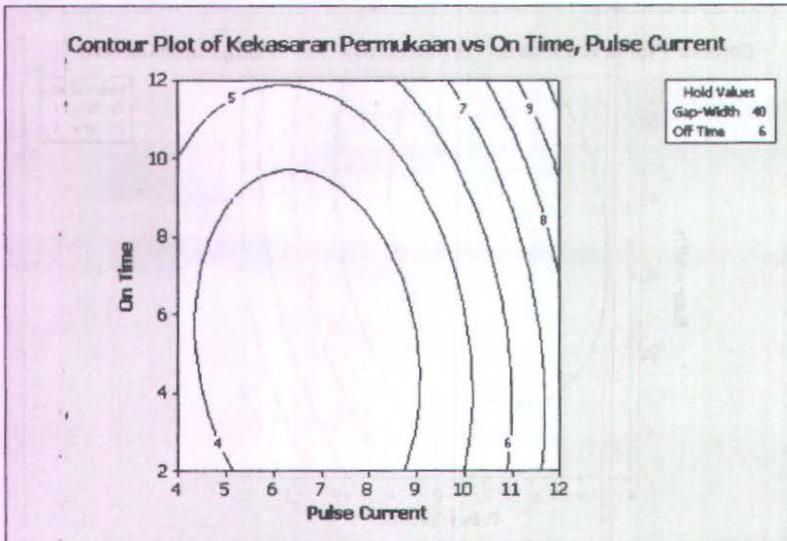
Gambar 4.1 *Surface Plot* parameter *Pulse Current* dan *Gap-Width* terhadap kekasaran permukaan



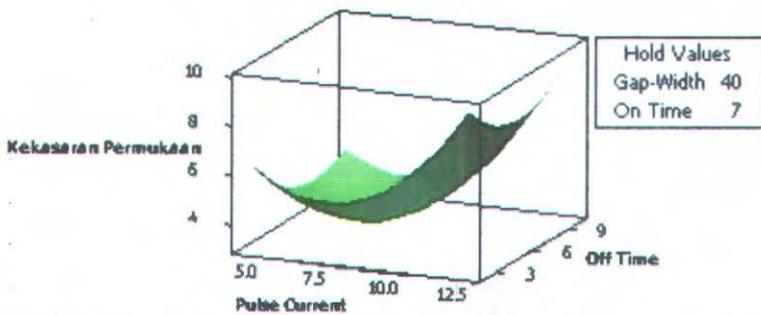
Gambar 4.2 *Contour Plot* parameter *Pulse Current* dan *Gap-Width* terhadap kekasaran permukaan



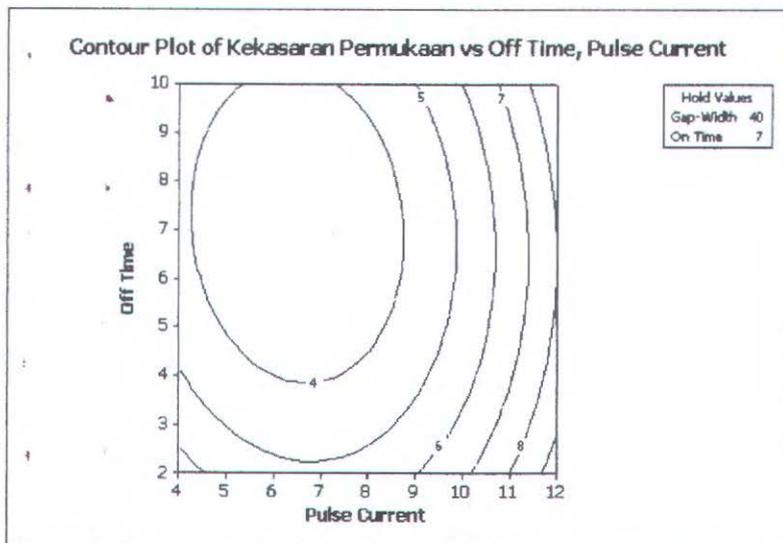
Gambar 4.3 *Surface Plot* parameter *Pulse Current* dan *On Time* terhadap kekasaran permukaan



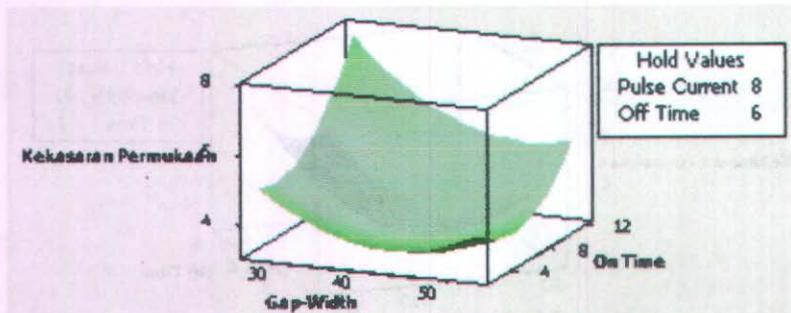
Gambar 4.4 *Contour Plot* parameter *Pulse Current* dan *On Time* terhadap kekasaran permukaan



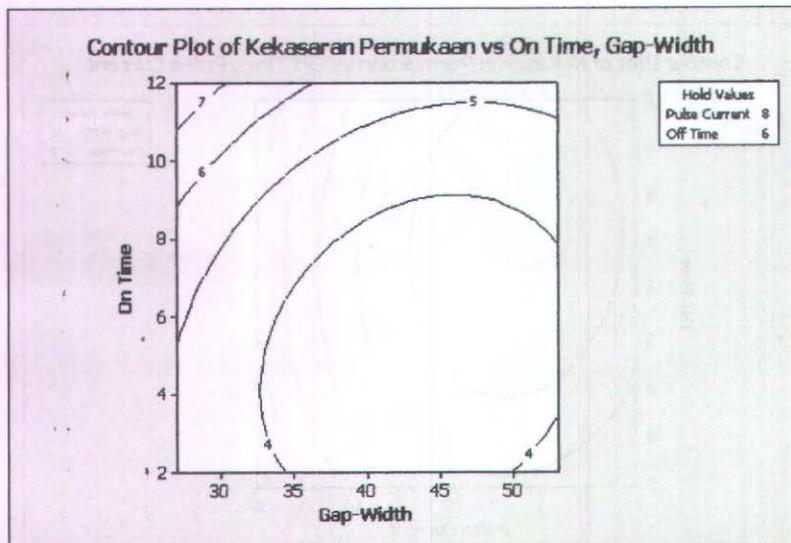
Gambar 4.5 *Surface Plot* parameter *Pulse Current* dan *OFF Time* terhadap kekasaran permukaan



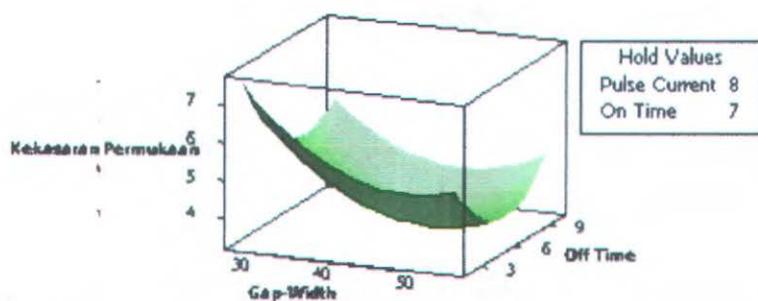
Gambar 4.6 *Contour Plot* parameter *Pulse Current* dan *OFF Time* terhadap kekasaran permukaan



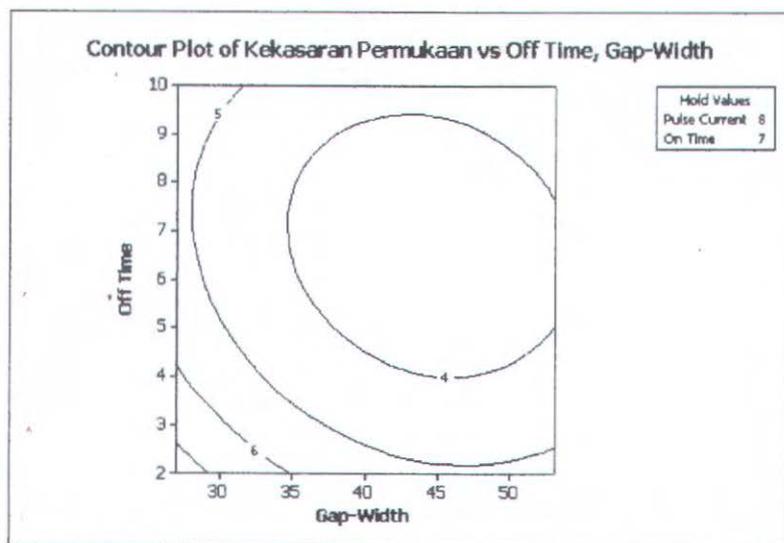
Gambar 4.7 *Surface Plot* parameter *Gap-Width* dan *On Time* terhadap kekasaran permukaan



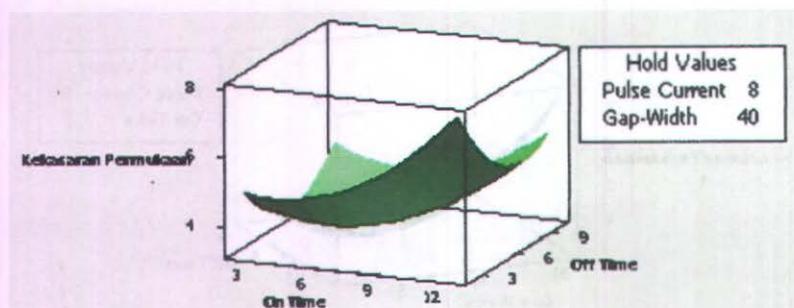
Gambar 4.8 *Contour Plot* parameter *Gap-Width* dan *On Time* terhadap kekasaran permukaan



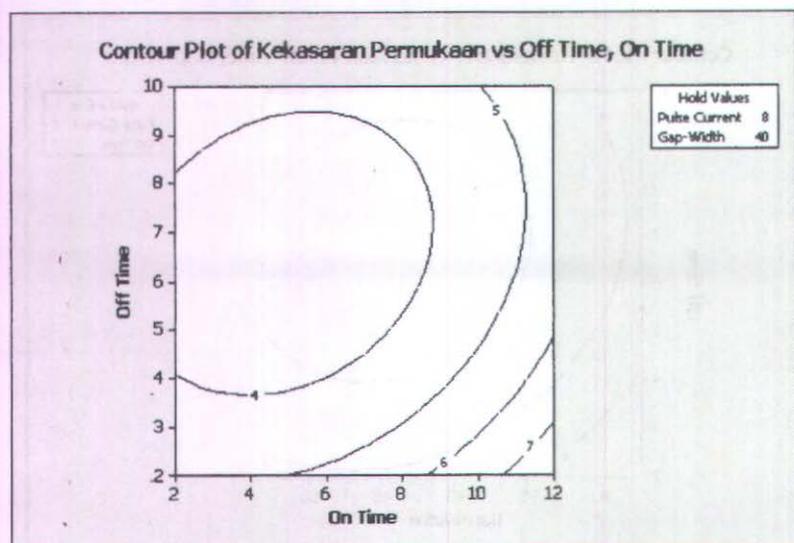
Gambar 4.9 *Surface Plot* parameter *Gap-Width* dan *Off Time* terhadap kekasaran permukaan



Gambar 4.10 *Contour Plot* parameter *Gap-Width* dan *Off Time* terhadap kekasaran permukaan



Gambar 4.11 *Surface Plot* parameter *On Time* dan *Off Time* terhadap kekasaran permukaan

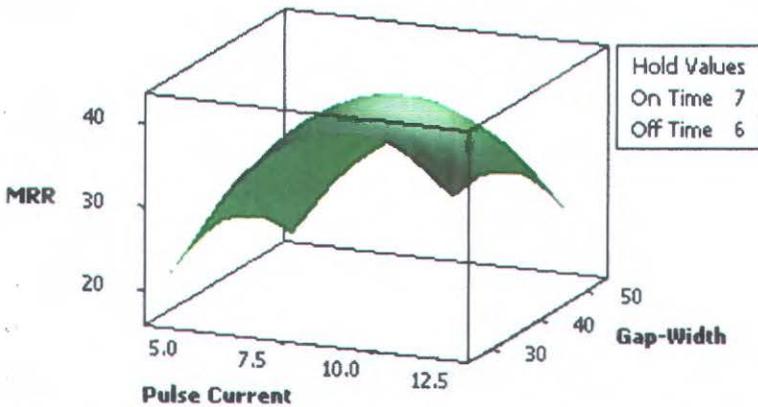


Gambar 4.12 *Contour Plot* parameter *On Time* dan *Off Time* terhadap kekasaran permukaan

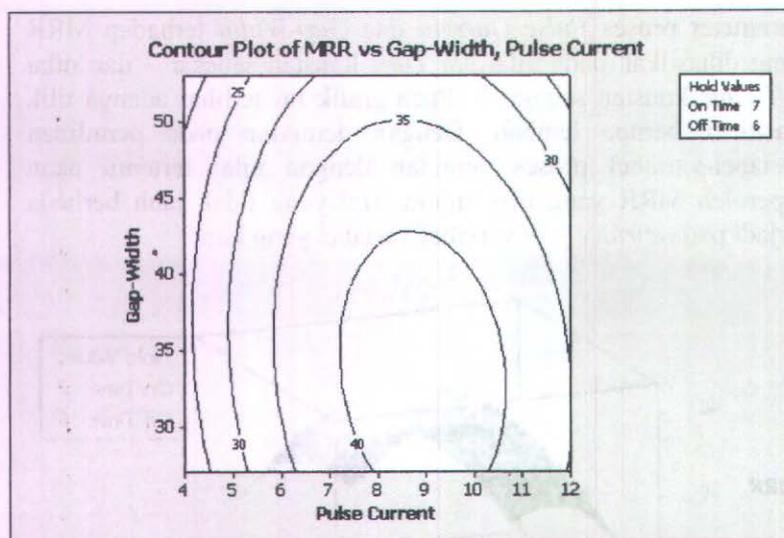
4.3.2. Plot Permukaan Untuk Laju Pengerjaan Material (MRR)

Gambar 4.13 hingga 4.24 berikut ini disajikan *surface* dan *contour plot* secara lengkap seluruh kombinasi variabel untuk respon MRR. Pada gambar 4.13 ditunjukkan *surface plot*

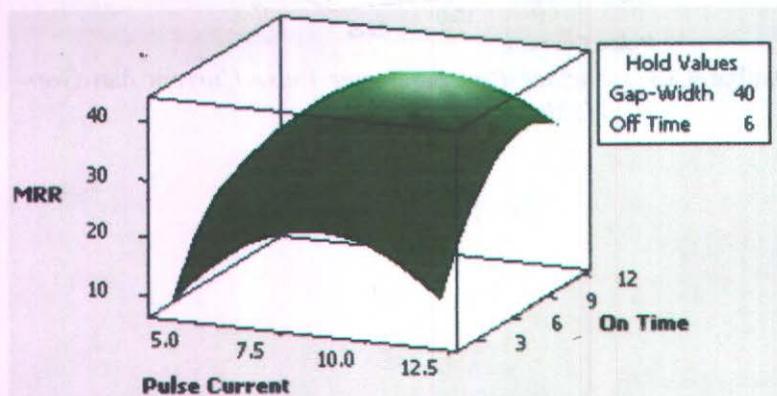
parameter proses *Pulse Current* dan *Gap-Width* terhadap MRR yang dihasilkan pada nilai *On Time* konstan sebesar 7 dan nilai *Off Time* konstan sebesar 6. Pada grafik ini terlihat adanya titik stasioner berupa lembah. Dengan demikian pada pemilihan variabel-variabel proses perautan dengan nilai tertentu akan diperoleh MRR yang maksimum. Hal yang tidak jauh berbeda terjadi pada *surface plot* variabel-variabel yang lain.



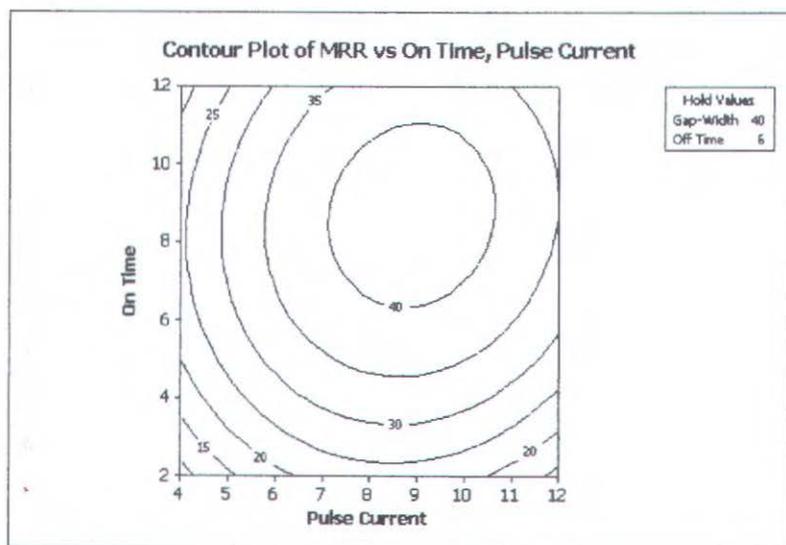
Gambar 4.13 *Surface Plot* parameter *Pulse Current* dan *Gap-Width* terhadap MRR



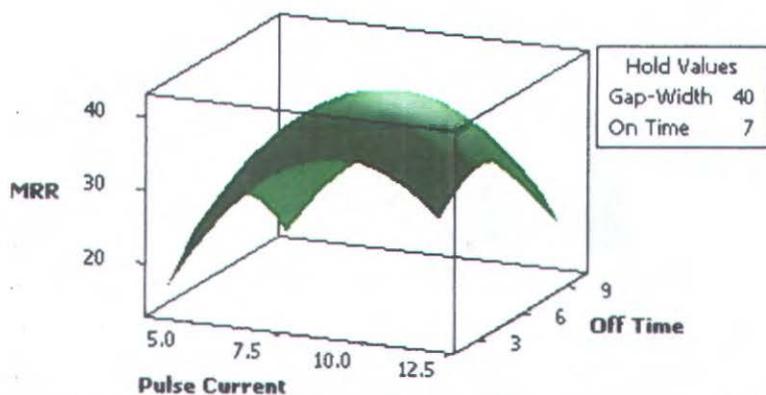
Gambar 4.14 *Contour Plot* parameter *Pulse Current* dan *Gap-Width* terhadap *MRR*



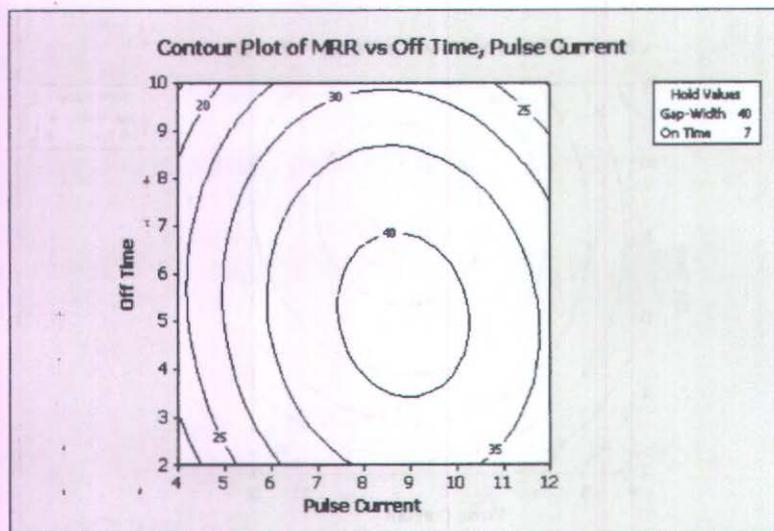
Gambar 4.15 *Surface Plot* parameter *Pulse Current* dan *On Time* terhadap *MRR*



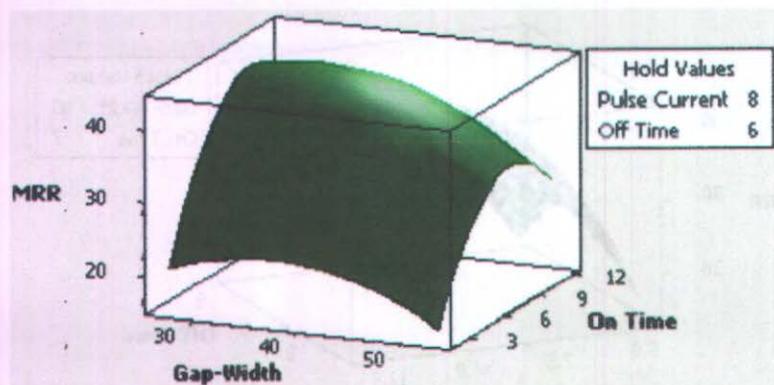
Gambar 4.16 *Contour Plot* parameter *Pulse Current* dan *On Time* terhadap MRR



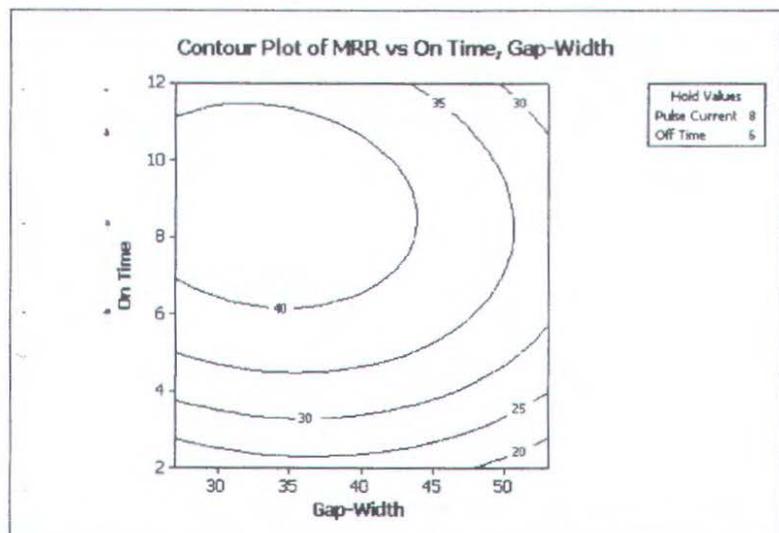
Gambar 4.17 *Surface Plot* parameter *Pulse Current* dan *OFF Time* terhadap MRR



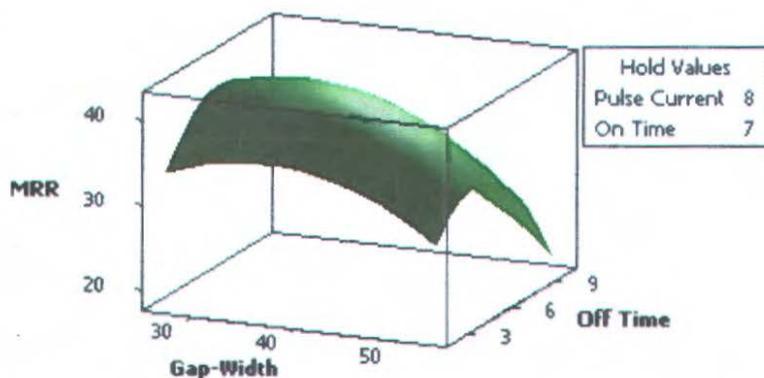
Gambar 4.18 *Contour Plot* parameter *Pulse Current* dan *OFF Time* terhadap MRR



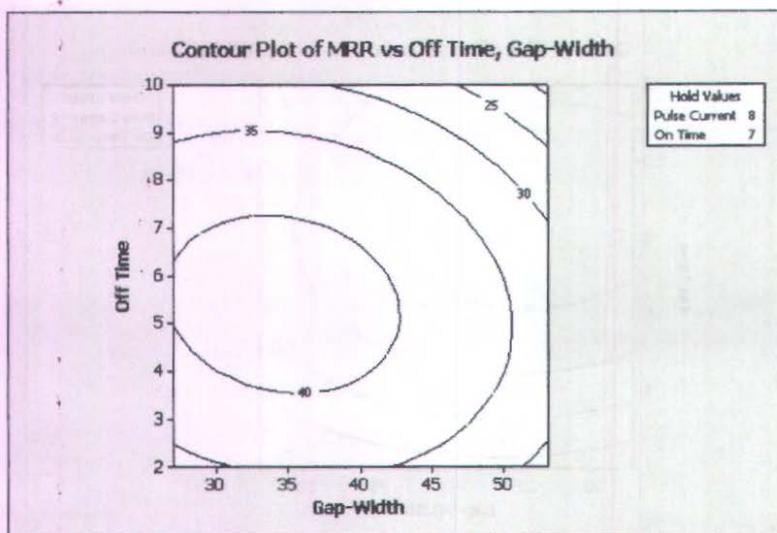
Gambar 4.19 *Surface Plot* parameter *Gap-Width* dan *On Time* terhadap MRR



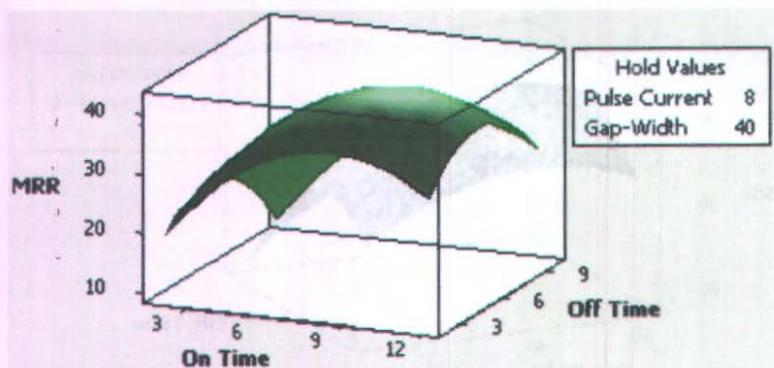
Gambar 4.20 *Contour Plot* parameter *Gap-Width* dan *On Time* terhadap MRR



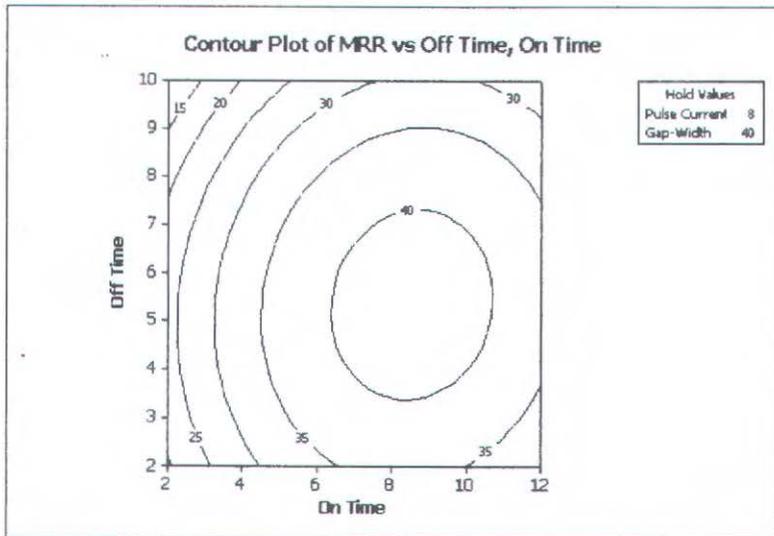
Gambar 4.21 *Surface Plot* parameter *Gap-Width* dan *Off Time* terhadap MRR



Gambar 4.22 *Contour Plot* parameter *Gap-Width* dan *Off Time* terhadap MRR



Gambar 4.23 *Surface Plot* parameter *On Time* dan *Off Time* terhadap MRR



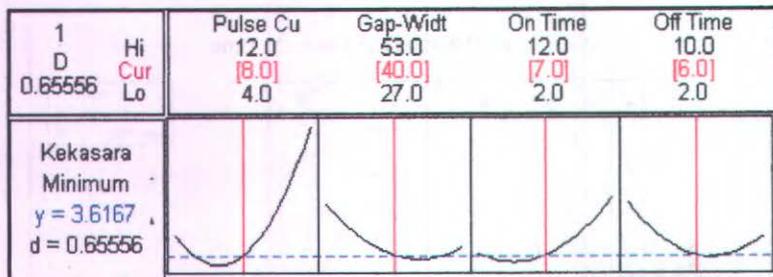
Gambar 4.24 *Contour Plot* parameter *On Time* dan *Off Time* terhadap MRR

4.4. Pembahasan

Berikut ini adalah analisa pengaruh variabel proses perautan terhadap respon beserta fenomena yang terjadi. Untuk memudahkan analisa maka dilakukan analisa pengaruh masing masing variabel proses terhadap respon pada masing-masing nilai tengah.

4.4.1. Analisa Variabel Proses Terhadap Kekasaran Permukaan

Berdasarkan analisis regresi yang telah dilakukan didapatkan persamaan empiris hubungan antara variabel proses terhadap kekasaran permukaan, dan juga didapatkan grafik hubungan variabel proses terhadap respon kekasaran permukaan yang ditunjukkan pada gambar 4.25 berikut ini:



Gambar 4.25 Grafik pengaruh variabel proses terhadap kekasaran permukaan pada nilai tengah

Analisa pengaruh masing-masing variabel proses terhadap kekasaran permukaan, beserta fenomena yang terjadi pada penelitian ini dapat disimak pada pemaparan berikut:

1. Pulse Current

Dari grafik pada gambar 4.25 dapat diketahui bahwa peningkatan nilai *Pulse Current*-nya akan diikuti oleh kenaikan nilai kekasaran permukaan. Hal ini terjadi karena *Pulse Current* menyatakan besarnya arus listrik yang mengalir, semakin besar nilai arus listrik maka *spark*-nya semakin besar pula. Sebagai akibatnya, kawah yang terjadi pada permukaan benda kerja semakin curam.

2. Gap-Width

Dari grafik pada gambar 4.25 dapat diketahui bahwa secara umum kenaikan nilai *Gap-Width* akan diikuti oleh kenaikan nilai kekasaran permukaan. Namun kenaikan ini tidaklah konstan pada setiap level. Pada level tertentu kekasaran permukaan yang terbentuk relatif tidak berubah atau bahkan turun yang kemudian naik lagi. Pada gambar 4.25, grafik *Gap-Width* menunjukkan adanya lembah. Hal ini menggambarkan adanya hubungan kuadratlik dari variabel *Gap-width* terhadap kekasaran permukaan. Hal ini terjadi karena *Gap-width* menyatakan celah diantara benda kerja dan elektroda. Dengan demikian, lebar atau sempitnya *Gap-Width* akan mempengaruhi terjadinya *break down voltage*. *Gap-*

width yang optimal akan menghasilkan loncatan bunga api yang stabil serta proses perautan yang efisien.

3. *On Time*

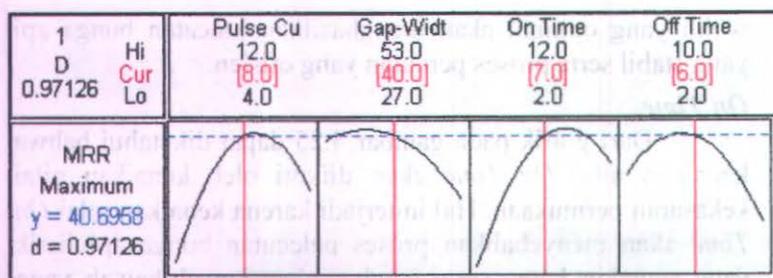
Dari grafik pada gambar 4.25 dapat diketahui bahwa kenaikan nilai *On Time* akan diikuti oleh kenaikan nilai kekasaran permukaan. Hal ini terjadi karena kenaikan nilai *On Time* akan menyebabkan proses pelepasan bunga api listrik yang semakin lama, serta pembentukan kawah-kawah yang semakin dalam, yang akhirnya menyebabkan kenaikan kekasaran permukaan.

4. *Off Time*

Dari grafik pada gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kenaikan nilai *Off Time* akan diikuti oleh penurunan nilai MRR. Hal ini terjadi karena penurunan nilai *Off Time* akan mengakibatkan *flushing* yang terlalu singkat dan kurang sempurna, sehingga lecutan bunga api listrik yang terjadi pada celah pemotongan masih menghalang partikel geram dan menjadi tidak teratur. Sebagai akibatnya kecepatan potong berkurang, sehingga waktu pengerjaan menjadi lebih lama. Dengan waktu pengerjaan yang lebih lama, maka laju pengerjaan (MRR) menurun.

4.4.2. Analisa Variabel Proses Terhadap Laju Pengerjaan Material (MRR)

Berdasarkan analisis regresi yang telah dilakukan didapatkan persamaan empiris hubungan antara variabel proses terhadap MRR dan didapatkan grafik hubungan variabel proses terhadap respon MRR yang dapat dilihat pada gambar 4.14 berikut ini:



Gambar 4.26 Grafik pengaruh variabel proses terhadap MRR pada nilai tengah

Analisa pengaruh masing-masing variabel proses terhadap MRR, beserta fenomena yang terjadi pada penelitian ini dapat disimak pada pemaparan berikut:

1. Pulse Current

Dari grafik pada gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kenaikan nilai *Pulse Current* akan diikuti oleh kenaikan nilai MRR. Hal ini terjadi karena *Pulse Current* menyatakan besarnya arus listrik yang mengalir, semakin besar nilai arus listrik maka *spark*-nya semakin besar pula. Sebagai akibatnya, kecepatan potong bertambah, sehingga waktu pengerjaan menjadi lebih singkat. Dengan waktu pengerjaan yang lebih singkat, maka laju pengerjaan (MRR) meningkat.

2. Gap-Width

Dari grafik pada gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kenaikan nilai *Gap-Width* akan diikuti oleh penurunan nilai MRR. Namun kenaikan ini tidaklah konstan pada setiap level. Pada level tertentu MRR yang terbentuk relatif tidak berubah atau bahkan naik yang kemudian turun lagi. Pada gambar 4.26, grafik *Gap-Width* menunjukkan adanya puncak. Hal ini menggambarkan adanya hubungan kuadratik dari variabel *Gap-width* terhadap MRR. Hal ini terjadi karena *Gap-width* menyatakan celah diantara benda kerja dan

elektroda. Dengan demikian lebar atau sempitnya *Gap-width* akan mempengaruhi terjadinya *break down voltage*. *Gap-width* yang optimal akan menghasilkan loncatan bunga api yang stabil serta proses perautan yang efisien.

3. *On Time*

Dari grafik pada gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kenaikan nilai *On Time* akan diikuti oleh kenaikan nilai MRR. Hal ini terjadi karena kenaikan nilai *On Time* akan menyebabkan proses pelepasan bunga api listrik yang semakin lama, serta pembentukan kawah-kawah yang semakin dalam, yang akhirnya menyebabkan kecepatan potong bertambah, sehingga waktu pengerjaan menjadi lebih singkat. Dengan waktu pengerjaan yang lebih singkat, maka laju pengerjaan (MRR) meningkat.

4. *Off Time*

Dari grafik pada gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kenaikan nilai *Off Time* akan diikuti oleh penurunan nilai MRR. Hal ini terjadi karena penurunan nilai *Off Time* akan mengakibatkan *flushing* yang terlalu singkat dan kurang sempurna, sehingga lecutan bunga api listrik yang terjadi pada celah pemotongan masih terhalang partikel geram dan menjadi tidak teratur. Sebagai akibatnya kecepatan potong berkurang, sehingga waktu pengerjaan menjadi lebih lama. Dengan waktu pengerjaan yang lebih lama, maka laju pengerjaan (MRR) menurun.

4.5. Optimasi Respon

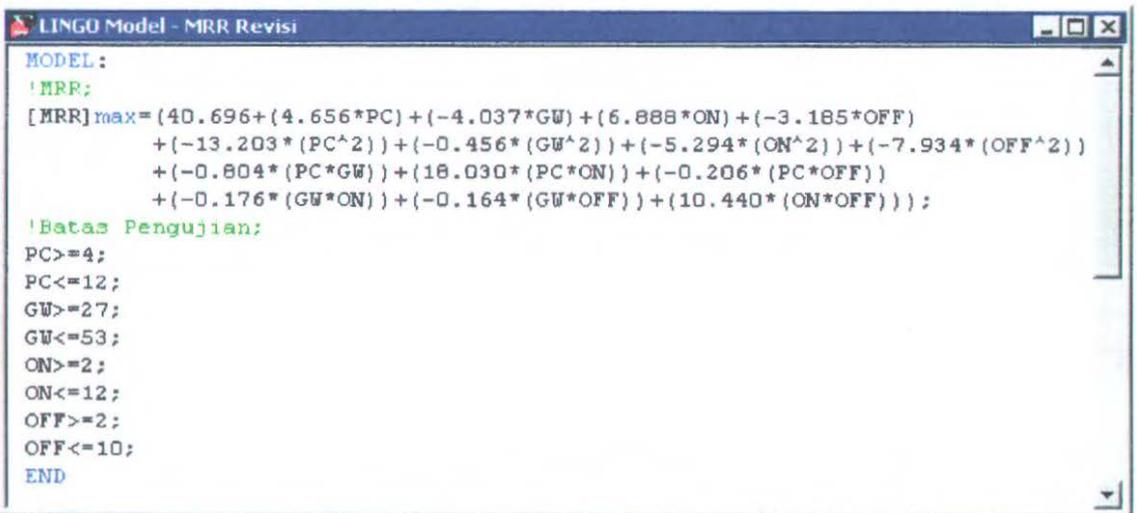
Optimasi respon dimaksudkan untuk mendapatkan komposisi parameter *Pulse Current*, *Gap-Width*, *On Time*, dan *Off Time* yang menghasilkan MRR maksimum pada kekasaran permukaan tertentu. Pencarian harga optimal respon dilakukan dengan membuat pemodelan matematik dengan memaksimalkan harga respon primer dan harga respon sekunder tertentu sebagai kendala.

Sebagai respon primer adalah MRR, dan kekasaran permukaan sebagai respon sekunder. Proses optimasi dilakukan secara bertahap. Dimulai dari penentuan nilai maksimum pada respon primer dan nilai minimum respon sekunder, dengan nilai batas parameter proses yang digunakan.

4.5.1. Penentuan Titik Maksimum pada Model MRR

Untuk mengetahui titik maksimum MRR yang terjadi pada proses perautan mesin *EDM Sinking* digunakan bantuan perangkat lunak LINGO. Model maksimasi yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.27.

Gambar 4.27 Model maksimasi MRR dengan batas rentang parameter eksperimen.



```
MODEL:
'MRR;
[MRR]max=(40.696+(4.656*PC)+(-4.037*GW)+(6.888*ON)+(-3.185*OFF)
          +(-13.203*(PC^2))+(-0.456*(GW^2))+(-5.294*(ON^2))+(-7.934*(OFF^2))
          +(-0.804*(PC*GW))+18.030*(PC*ON))+(-0.206*(PC*OFF))
          +(-0.176*(GW*ON))+(-0.164*(GW*OFF))+10.440*(ON*OFF));
'Batas Pengujian;
PC>=4;
PC<=12;
GW>=27;
GW<=53;
ON>=2;
ON<=12;
OFF>=2;
OFF<=10;
END
```

Dari hasil perhitungan tersebut selanjutnya diperoleh keluaran yang ditunjukkan pada gambar 4.28.

Solution Report - MRR Revisi

Local optimal solution found.

Objective value:	39.60169
Infeasibilities:	0.000000
Extended solver steps:	0
Total solver iterations:	10

Variable	Value	Reduced Cost
PC	7.490740	0.000000
GW	27.000000	0.000000
ON	12.000000	0.000000
OFF	7.318119	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
MRR	39.60169	1.000000
2	3.490740	0.000000
3	4.509260	0.000000
4	0.000000	-37.99573
5	26.000000	0.000000
6	10.000000	0.000000
7	0.000000	86.53919
8	5.318119	0.000000
9	2.681881	0.000000

Gambar 4.28 Hasil perhitungan nilai optimum pada MRR dengan batas rentang parameter eksperimen.

Dari hasil keluaran perhitungan pada gambar 4.28 diketahui bahwa nilai maksimum yang dapat dicapai untuk MRR adalah sebesar $39.60 \text{ mm}^3/\text{menit}$, dan diperoleh pada pengaturan parameter *Pulse Current* 7.49, *Gap-Width* 27, *On Time* 12, dan *Off Time* 7.32.

4.5.2. Penentuan Titik Minimum pada Model Kekasaran Permukaan

Untuk mengetahui titik minimum kekasaran permukaan yang terjadi pada proses perautan mesin *EDM Sinking* digunakan bantuan perangkat lunak LINGO. Model minimasi yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.29.

```

LINGO Model - Kekasaran Revisi
MODEL:
!Kekasaran Permukaan:
[Kekasaran_Permukaan] min=(3.6167+(1.8500*PC)+(0.7417*GW)+(0.9625*ON)+(-0.5542*OFF)
+(2.5019*(PC^2))+(0.2929*(GW^2))+(0.8867*(ON^2))+(1.1517*(OFF^2))
+(-1.6250*(PC*GW))+(0.4875*(PC*ON))+(0.3125*(PC*OFF))
+(-0.4125*(GW*ON))+(0.3375*(GW*OFF))+(-2.3625*(ON*OFF)));

!Batas Pengujian:
PC>=4;
PC<=12;
GW>=27;
GW<=53;
ON>=2;
ON<=12;
OFF>=2;
OFF<=10;
END

```

Gambar 4.29 Model minimasi kekasaran permukaan dengan batas rentang parameter eksperimen.

Dari hasil perhitungan tersebut selanjutnya diperoleh keluaran yang ditunjukkan pada gambar 4.30.

Solution Report - Kekasaran Revisi		
Local optimal solution found.		
Objective value:	4.641030	
Infeasibilities:	0.000000	
Extended solver steps:	0	
Total solver iterations:	14	
Variable	Value	Reduced Cost
PC	6.750082	0.000000
GW	27.000000	0.000000
ON	12.000000	0.000000
OFF	7.676608	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
KEKASARAN_PERBUKAAN	4.641030	-1.000000
2	2.750082	0.000000
3	5.249918	0.000000
4	0.000000	-1.746672
5	26.000000	0.000000
6	10.000000	0.000000
7	0.000000	3.739522
8	5.676608	0.000000
9	2.323392	0.000000

Gambar 4.30 Hasil perhitungan nilai optimum pada kekasaran permukaan dengan batas rentang parameter eksperimen.

Dari hasil keluaran perhitungan pada gambar 4.30 diketahui bahwa nilai minimum yang dapat dicapai untuk kekasaran permukaan adalah sebesar $4.64 \mu\text{m}$, dan diperoleh pada pengaturan parameter *Pulse Current* 6.75, *Gap-Width* 27, *On Time* 12, dan *Off Time* 7.68.

4.5.3. Optimasi Dual Respon

Optimasi dual respon dari MRR dilakukan dengan menggunakan pendekatan *non-linear programming*. Langkah yang dilakukan adalah dengan menggunakan model MRR sebagai target maksimum, dan model kekasaran permukaan sebagai kendala. Susunan proses optimasi dual respon yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Target: Memaksimumkan Y_{Primer}

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{Primer}} = & 40.696 + (4.656 * PC) - (4.037 * GW) + (6.888 * ON) \\
 & - (3.185 * OFF) - (13.203 * PC^2) - (0.456 * GW^2) \\
 & - (5.294 * ON^2) - (7.934 * OFF^2) - (0.804 * (PC * GW)) \\
 & + (18.030 * (PC * ON)) - (0.206 * (PC * OFF)) \\
 & - (0.176 * (GW * ON)) - (0.164 * (GW * OFF)) \\
 & + (10.440 * (ON * OFF))
 \end{aligned}$$

Dengan kendala Y_{Sekunder}

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{Sekunder}} = & 3.6167 + (1.8500 * PC) - (0.7417 * GW) \\
 & + (0.9625 * ON) - (0.5542 * OFF) + (2.5019 * PC^2) \\
 & + (0.2929 * GW^2) + (0.8867 * ON^2) + (1.1517 * OFF^2) \\
 & - (1.6250 * (PC * GW)) + (0.4785 * (PC * ON)) \\
 & + (0.3125 * (PC * OFF)) - (0.4125 * (GW * ON)) \\
 & + (0.3375 * (GW * OFF)) - (2.3625 * (ON * OFF))
 \end{aligned}$$

Batas pengujian:

$$4 \leq PC \leq 12$$

$$27 \leq GW \leq 53$$

$$2 \leq ON \leq 12$$

$$2 \leq OFF \leq 10$$

Persamaan program *non-linear* dapat diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak LINGO. Model maksimasi yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.31.

```

LINGO Model - Optimasi Revisi
MODEL:
  MRR;
  [MRR]max=(40.696+(4.656*PC)+(-4.037*GW)+(6.888*ON)+(-3.185*OFF)
    +(-13.203*(PC^2))+(-0.456*(GW^2))+(-5.294*(ON^2))+(-7.934*(OFF^2))
    +(-0.804*(PC*GW))+(18.030*(PC*ON))+(-0.206*(PC*OFF))
    +(-0.176*(GW*ON))+(-0.169*(GW*OFF))+(10.440*(ON*OFF)));
  [Kekasaran_Permukaan] 4.641030>=(3.6167+(1.8500*PC)+(-0.7417*GW)+(0.9625*ON)+(-0.5542*OFF)
    +(2.5019*(PC^2))+(0.2929*(GW^2))+(0.8867*(ON^2))+(1.1517*(OFF^2))
    +(-1.6250*(PC*GW))+(0.4875*(PC*ON))+(0.3125*(PC*OFF))
    +(-0.4125*(GW*ON))+(0.3375*(GW*OFF))+(-2.3625*(ON*OFF)));
  [Batas_Pengujian];
  PC<=4;
  PC<=12;
  GW<=27;
  GW<=53;
  ON<=2;
  ON<=12;
  OFF<=2;
  OFF<=10;
  END

```

Gambar 4.31 Model maksimum dual respon MRR dengan kendala kekasaran permukaan dan dengan batas parameter eksperimen.

Dari hasil perhitungan tersebut selanjutnya diperoleh keluaran yang ditunjukkan pada gambar 4.32.

Solution Report - Optimasi Revisi

Feasible solution found.

Objective value: 31.42913

Infeasibilities: 0.9371754E-05

Extended solver steps: 0

Total solver iterations: 325

Variable	Value	Reduced Cost
PC	6.751157	0.000000
GW	27.00000	0.000000
ON	12.00000	0.000000
OFF	7.674023	-1.327625

Row	Slack or Surplus	Dual Price
MRR	31.42913	1.000000
KEKASARAN_PERMUKAAN	-0.9371754E-05	-1360.982
3	2.751157	0.000000
4	5.248843	0.000000
5	0.000000	-2407.076
6	26.00000	0.000000
7	10.00000	0.000000
8	0.000000	5156.068
9	5.674023	0.000000
10	2.325977	0.000000

Gambar 4.32 Hasil perhitungan nilai optimum dual respon MRR dengan kendala kekasaran permukaan dan dengan batas parameter eksperimen.

Dari hasil keluaran perhitungan pada gambar 4.32 diketahui bahwa nilai maksimum yang dapat dicapai untuk MRR adalah sebesar $31.43 \text{ mm}^3/\text{menit}$, dan diperoleh pada pengaturan parameter *Pulse Current* 6.75, *Gap-Width* 27, *On Time* 12, dan *Off Time* 7.67. Selanjutnya untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang terjadi, nilai parameter proses perautan dimasukkan kedalam persamaan kekasaran permukaan (Y_{Sekunder}). Pada kondisi persamaan tersebut (Y_{Sekunder}), nilai kekasaran permukaan yang dapat diperoleh adalah $4.64 \mu\text{m}$.

Optimasi dari hasil perhitungan tersebut mempunyai kecermatan beberapa angka dibelakang koma. Hal ini tentunya harus disesuaikan dengan nilai parameter yang ada di mesin EDM *Sinking* Walter Exeron 104 E yang berupa bilangan bulat.

Penyesuaian kombinasi nilai variabel proses, menghasilkan optimasi sebagai berikut:

1. *Alternative Solution*

<i>Pulse Current</i>	= 7 [21 A]
<i>Gap-Width</i>	= 27
<i>On Time</i>	= 12 [1040 μs]
<i>Off time</i>	= 8 [720 μs]

2. *Predicted Responses*

MRR	= $32.80 \text{ mm}^3/\text{menit}$
Kekasaran permukaan	= $4.94 \mu\text{m}$

4.6. Eksperimen Konfirmasi

4.6.1. Percobaan Konfirmasi Terhadap Nilai Respon Optimum

Untuk mengetahui sejauh mana ketepatan dari nilai-nilai stasioner yang secara statistik menghasilkan nilai respon optimum, maka dilakukan validasi terhadap nilai-nilai stasioner tersebut. Tabel 4.4 menyajikan hasil dari percobaan konfirmasi, untuk data selengkapnya dapat disimak pada lampiran 9. Dari tabel tersebut terlihat bahwa lama laju pengerjaan, dan kekasaran permukaan yang dihasilkan mendekati harga perhitungan secara

teoritis. Untuk membuktikan ada atau tidak ada penyimpangan antara hasil validasi dengan hasil perhitungan optimasi teoritis, dilakukan uji *one sample t*. Hipotesa, untuk pengujian ini adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_0$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_0$$

Hipotesis awal (H_0) akan ditolak bila *p-value* kurang dari α . Sebaliknya, hipotesis awal akan gagal ditolak apabila *p-value* melebihi α . Pada pengujian ini digunakan α sebesar 5%, dengan μ_0 untuk MRR sebesar 32.80 mm³/menit dan μ_0 untuk kekasaran permukaan sebesar 4.94 μm . Hasil analisis secara lengkap untuk pengujian *one sample t* dapat disimak pada lampiran 9.

Tabel 4.4 Hasil eksperimen konfirmasi nilai respon optimum

Parameter				Respon	
Pulse Current	Gap-Width	On Time	Off Time	Kekasaran Permukaan	MRR
				(μm)	(mm ³ /menit)
7	27	12	8	4.97	32.97
				4.87	32.74
				4.90	32.76

Berikut ini hasil dari *one sample t*:

1. Kekasaran permukaan

Pada lampiran 9 diketahui bahwa *p-value* untuk kekasaran permukaan mempunyai nilai $> \alpha$, yaitu 0.463. Maka keputusannya adalah gagal menolak hipotesis awal. Artinya secara statistik dengan $\alpha = 0.05$ dapat dikatakan bahwa secara rata-rata nilai kekasaran permukaan hasil konfirmasi sama dengan persamaan prediksi.

2. Laju pengerjaan material (MRR)

Pada lampiran 9 diketahui bahwa *p-value* untuk MRR mempunyai nilai $> \alpha$, yaitu 0.781. Maka keputusannya adalah gagal menolak hipotesis awal. Artinya secara statistik dengan $\alpha = 0.05$ dapat dikatakan bahwa

secara rata-rata nilai MRR hasil konfirmasi sama dengan persamaan prediksi.

Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan antara hasil perhitungan optimasi dengan hasil percobaan konfirmasi untuk respon laju pengerjaan, dan kekasaran permukaan.

4.6.2. Percobaan Konfirmasi Terhadap Persamaan Empiris Perautan

Persamaan empiris model hubungan parameter perautan pada mesin *EDM Sinking* terhadap variabel respon perautan, dapat digunakan sebagai prediksi seberapa besar nilai respon yang dihasilkan jika mesin beroperasi pada level parameter tertentu. Tabel 4.5 menyajikan hasil percobaan pada kondisi parameter tertentu secara acak.

Tabel 4.5 Hasil eksperimen konfirmasi nilai respon secara acak

Parameter				Respon	
Pulse Current	Gap-Width	On Time	Off Time	Kekasaran Permukaan	MRR
				(μm)	(mm^3/menit)
8	27	12	6	11.00	22.63
				11.13	22.48
				11.30	22.17

1. Kekasaran permukaan

Berikut ini adalah persamaan empiris parameter perautan mesin *EDM Sinking* terhadap variabel respon kekasaran permukaan:

$$\begin{aligned} \text{Kekasaran Permukaan} = & 3.6167 + (1.8500 * \text{PC}) \\ & - (0.7417 * \text{GW}) + (0.9625 * \text{ON}) \\ & - (0.5542 * \text{OFF}) + (2.5019 * \text{PC}^2) \\ & + (0.2929 * \text{GW}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ (0.8867 * ON^2) \\
 &+ (1.1517 * OFF^2) \\
 &- (1.6250 * (PC * GW)) \\
 &+ (0.4785 * (PC * ON)) \\
 &+ (0.3125 * (PC * OFF)) \\
 &- (0.4125 * (GW * ON)) \\
 &+ (0.3375 * (GW * OFF)) \\
 &- (2.3625 * (ON * OFF))
 \end{aligned}$$

Batas pengujian:

$$4 \leq PC \leq 12$$

$$27 \leq GW \leq 53$$

$$2 \leq ON \leq 12$$

$$2 \leq OFF \leq 10$$

Nilai taraf parameter tersebut kemudian disubstitusikan kedalam persamaan kekasaran permukaan, sehingga didapat:

$$\begin{aligned}
 \text{Kekasaran Permukaan} &= 3.6167 + (1.8500 * 8) \\
 &- (0.7417 * 27) + (0.9625 * 12) \\
 &- (0.5542 * 6) + (2.5019 * 8^2) \\
 &+ (0.2929 * 27^2) + (0.8867 * 12^2) \\
 &+ (1.1517 * 6^2) \\
 &- (1.6250 * (8 * 27)) \\
 &+ (0.4785 * (8 * 12)) \\
 &+ (0.3125 * (8 * 6)) \\
 &- (0.4125 * (27 * 12)) \\
 &+ (0.3375 * (27 * 6)) \\
 &- (2.3625 * (12 * 6))
 \end{aligned}$$

$$\text{Kekasaran Permukaan} = 11.1323 \mu\text{m}$$

Kemudian dilakukan pengujian *one sample t*, dimana nilai kekasaran permukaan hasil perhitungan digunakan sebagai nilai standart pengujian. Bentuk

pengujian beserta gambar *boxplot one sample t* dapat dilihat pada lampiran 10.

Pada lampiran 10 diketahui bahwa *p-value* untuk kekasaran permukaan bernilai $> \alpha$, yaitu 0.911. Maka keputusannya adalah gagal menolak hipotesis awal. Artinya secara statistik dengan $\alpha = 0.05$ dapat dikatakan bahwa secara rata-rata nilai kekasaran permukaan hasil konfirmasi sama dengan persamaan prediksi.

2. Laju pengerjaan material (MRR)

Berikut ini adalah persamaan empiris parameter perautan mesin *EDM Sinking* terhadap variabel respon MRR:

$$\begin{aligned} \text{MRR} = & 40.696 + (4.656 * \text{PC}) - (4.037 * \text{GW}) \\ & + (6.888 * \text{ON}) - (3.185 * \text{OFF}) - (13.203 * \text{PC}^2) \\ & - (0.456 * \text{GW}^2) - (5.294 * \text{ON}^2) \\ & - (7.934 * \text{OFF}^2) - (0.804 * (\text{PC} * \text{GW})) \\ & + (18.030 * (\text{PC} * \text{ON})) - (0.206 * (\text{PC} * \text{OFF})) \\ & - (0.176 * (\text{GW} * \text{ON})) - (0.164 * (\text{GW} * \text{OFF})) \\ & + (10.440 * (\text{ON} * \text{OFF})) \end{aligned}$$

Batas pengujian:

$$4 \leq \text{PC} \leq 12$$

$$27 \leq \text{GW} \leq 53$$

$$2 \leq \text{ON} \leq 12$$

$$2 \leq \text{OFF} \leq 10$$

Nilai taraf parameter tersebut kemudian disubstitusikan kedalam persamaan MRR, sehingga didapat:

$$\begin{aligned} \text{MRR} = & 40.696 + (4.656 * 8) - (4.037 * 27) \\ & + (6.888 * 12) - (3.185 * 6) - (13.203 * 8^2) \\ & - (0.456 * 27^2) - (5.294 * 12^2) - (7.934 * 6^2) \\ & - (0.804 * (8 * 27)) + (18.030 * (8 * 12)) \\ & - (0.206 * (8 * 6)) - (0.176 * (27 * 12)) \end{aligned}$$

$$- (0.164 * (27 * 6)) + (10.440 * (12 * 6))$$

$$\text{MRR} = 22.242 \text{ mm}^3/\text{menit}$$

Kemudian dilakukan pengujian *one sample t*, dimana nilai MRR hasil perhitungan digunakan sebagai nilai standart pengujian. Bentuk pengujian beserta gambar *boxplot one sample t* dapat dilihat pada lampiran 10.

Pada lampiran 10 diketahui bahwa *p-value* untuk MRR bernilai $> \alpha$, yaitu 0.522. Maka keputusannya adalah gagal menolak hipotesis awal. Artinya secara statistik dengan $\alpha = 0.05$ dapat dikatakan bahwa secara rata-rata nilai MRR hasil konfirmasi sama dengan persamaan prediksi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian yang telah dilakukan dibatasi oleh rentang parameter percobaan, sehingga nilai setting variabel proses yang diperoleh hanya berlaku untuk interval dan level variabel-variabel proses *EDM Sinking* yang digunakan pada penelitian.

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengolahan dan analisa data penelitian, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Model matematik untuk respon kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Y_{KP}(\mu m) = & 3.6167 + (1.8500 * PC) - (0.7417 * GW) \\ & + (0.9625 * ON) - (0.5542 * OFF) \\ & + (2.5019 * PC^2) + (0.2929 * GW^2) \\ & + (0.8867 * ON^2) + (1.1517 * OFF^2) \\ & - (1.6250 * (PC * GW)) \\ & + (0.4875 * (PC * ON)) \\ & + (0.3125 * (PC * OFF)) \\ & - (0.4125 * (GW * ON)) \\ & + (0.3375 * (GW * OFF)) \\ & - (2.3625 * (ON * OFF)) \end{aligned}$$

2. Model matematik untuk respon laju pengerjaan (MRR) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Y_{MRR}(mm^3/menit) = & 40.696 + (4.656 * PC) \\ & - (4.037 * GW) + (6.888 * ON) \\ & - (3.185 * OFF) - (13.203 * PC^2) \\ & - (0.456 * GW^2) - (5.294 * ON^2) \\ & - (7.934 * OFF^2) \\ & - (0.804 * (PC * GW)) \\ & + (18.030 * (PC * ON)) \\ & - (0.206 * (PC * OFF)) \\ & - (0.176 * (GW * ON)) \\ & - (0.164 * (GW * OFF)) \\ & + (10.440 * (ON * OFF)) \end{aligned}$$

3. Pada perautan dengan kekasaran permukaan tertentu, MRR yang dihasilkan dapat dimaksimalkan dengan pemilihan parameter perautan yang tepat. Pada penelitian ini kekasaran permukaan $4.94 \mu\text{m}$ dengan MRR $32.80 \text{ mm}^3/\text{menit}$ dapat diperoleh pada pengaturan parameter *Pulse Current* 7 [21 A], *Gap-Width* 27, *On Time* 12 [1040 μs], dan *Off Time* 8 [720 μs].

5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka disarankan hal-hal sebagai berikut:

- 1) Dari empat faktor yang digunakan pada penelitian ini, pemilihan nilai dari tiap level variabel proses yang digunakan memiliki rentang yang relatif lebar. Untuk itu perlu ditetapkan rentang parameter proses yang lebih tepat agar kondisinya maksimal atau minimal dan respon yang diinginkan dapat tercapai.
- 2) Alat ukur yang digunakan hendaknya memiliki kecermatan yang tinggi, agar data hasil pengukuran lebih presisi.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlantika, J., 1993. "Analisa RMR dan Kekasaran Permukaan dengan Metode Respon Surface". **Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan**. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Gasperz, Vincent, 1995. **Teknik Analisis dalam Penelitian Percobaan**. Jilid 1 dan 2, Tarsito, Bandung.
- Guitrau, E. Bud, 1997. **The EDM Handbook**. Hanser Gardner Publications.
- H. Walter-Exeron 104 E Machining Technical Data Book**. H. Walter.
- <http://dspace.unimap.edu.my/bitstream/123456789/2397/5/Methodology.pdf>.
- Iriawan, N., dan Astuti, S. P., 2006. **Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan Minitab 14**. Edisi I, Andi Offset, Yogyakarta.
- Krar, Steve F., dan Check, Albert F., 1997. **Technology of Machine Tools**. Fifth Edition, Mc Graw-Hill.
- Mitutoyo SurfTest 401 User's Manual**. Mitutoyo.
- Pandey, P. C., 1980. **Modern Machining Processes**. Mc Graw-Hill, New Delhi.
- Rochim, Taufik, 1985. **Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometri**. ITB, Bandung.
- Sapto, Bejo T., 1996. "Optimasi Laju Keausan Elektrode, Kekasaran Permukaan dan Overcut pada Proses EDM

dengan Metode Taguchi Multi Respon”. **Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan**. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.

Setiawan, C., 1996. “Analisa RMR Benda Kerja dan Elektrode pada Proses EDM dengan Metode Fraksional Faktorial”. **Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan**. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.

Sommer, Carl, dan Sommer, Steve, 2005. **Complete EDM Handbook**. Advanced Publishing, Inc., Houston.

Thusty, George, 2000. **Manufacturing Processes and Equipment**. Prentice Hall Inc., New Jersey.

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

Lampiran 1

Interval setting parameter EDM Sinking H. Walter Exeron 104 E.

205.1

Legend of the keyboard of the generator desk

For entering the generator code

Code

The generator has a standard technology determined by the manufacturer that comprises 100 settings of the generator (= generator codes). This standard technology is designed so that it results in good average values in respect of the performance parameters such as erosion, wear and surface quality.

If the user attaches much value to one of these parameters, the generator setting has to be changed accordingly. It is, however, to be taken into consideration that on truncating a program or switching off the generator, this modified generator setting is lost and the generator takes over the original setting again.

The standard technology comprises 100 codes.

Pulse current

IP

15 current steps (0 - 15) = 0 - 45 A available
(0 - 16) = 90 A

High current step → high erosion → high roughness

Ignition current

In 6 steps up to 6 A.



That means: The higher the setting of the ignition current, the better the ignition and the more stable the operation. Hence: normal setting = position 6.

Ignition voltage

To be set in 3 steps: 100 - 150 - 250 V.



The higher the ignition voltage, the safer the ignition of the pulses.

ON time

19 steps from 1 - 1600 μ s; that means: long pulse \rightarrow high erosion \rightarrow poor electrode wear \rightarrow high roughness.



OFF time

19 steps from 1 - 1600 μ s; the relation between pulse duration and OFF time is decisive.



See for that purpose technology pages.

As a matter of principle, the OFF times have to be short for copper, for graphite they have to be long.

Short circuit voltage

0 - no short circuits are observable

99 - very sensitive reaction of the machinery,

also to slightest malfunctions

Standard value: rough-work > 50

smoothing < 50



Machine mode

Changing over the modes of operation dependent on different machining problems.



1 normal machining

2 machining of graphite

3 low wear with rough surface

4 graphite with reduced wear

Set value - Front gap between electrode and workpiece adjustable between 0 and 99.



Towards minimum high danger of short circuits,
high eroding performance.

Towards maximum unimportant short circuit tendency,
unimportant eroding performance.

Standard values: ▽ 25 - 35
▽▽ 40 - 60

Setting sensitivity

Advance: adjustable between 0 and 9
0 no advance.



The higher the setting sensitivity is set, the more quickly the adjustment reacts referring to the drive.

Standard values: ▽ 70 - 90
▽▽ 50 - 70

Lift-off distance

Jump motion

0 - no lift-off
9 - long lift-off distance



Duration of eroding

Adjustable between 0 and 9

0 - short intervals
9 - long intervals



Sparking-out time

Adjustable between 0 and 9.

The higher the setting, the better sparking-out. After reaching the preset working depth, the sparking-out begins. This process guarantees that the indicated deepness is existing everywhere.

0 - no sparking-out

9 - only another 5 % of max. sparking-out time
(only activated on CNC machines)



Changing over channels

to 1, 2 channels (4 channels optional)

HITACHI Isotropy TOOL STEEL

COMPARISON TABLE

TOOL STEEL	HITACHI	ASSAB	BOHLER	TISSEN	KRUPP	DAIDO	BUDERUS	SANYO	BRITISH	JIS	AISI	DIN
Cold work	SGT	DF2	Amullif's	2842	2510	GOA	EB2510	OK53	ED1	SKS3	O1	100MnCrW4
	CRD	XW5	Spec K (K100)	2436	2436	-	EB2080	OC11	ED3	SKD1	O3	210Cr12
	SLD	XW41	KNL ex (K110)	2379	2379	DC11	EB2379	OCM8	ED2	SKD11	O2	155CrVMo121
Flame hardening	HMD5		<i>Hitachi patented steel</i>						<i>Hitachi patented steel</i>			
Hot work	DAC	8407	Us Ultra	2344	2344	DHA	EB2344	QDA61	BH13	SKD61	H13	40CrMo5-1
High Speed Steel	YXM1	NSP41	Super Rapto (9600)	Thyrapl 3343	-	-	-	-	-	SKH 51	M2	-
	YXR3											
	YXR33											
Plastic molding	HPM36	Stavax	WKM35M	2082	2082	PAK90	EB2083	-	-	SUS420J2	420	35CrMo17
Plastic mold Prehard	HPM2217	718	K456	2312	2311	PX4	EB2311	PCM28	-	-	P20	40CrMnMo7
	CENA	-	-	-	-	NAK 80	-	-	-	-	P21MOD	-
MACHINERY STEEL	NSC	ASSAB	BOHLER	TISSEN	KRUPP	DAIDO	BUDERUS	SANYO	BRITISH	JIS	AISI	DIN
High carbon steel	NS1045	760	EMS45	1730	1191	DAK S450	EB1730	PC55	D80M46	S54C	C1045	C45W/CK45
NiCr High Tensile	NS4140	708	VON140	1225	7225	-	EB7225N	SCM410	708A42	SCM40	1410	42CrNiCo
NiCrMo High Tensile	NS4340	705	VON150	6582	5919	DAK S430	EB6582N	SCM439	823M30	SNM431	4340	34CrNiMo6
NiCrMo Prehard	E4340	705	VON150	6582	5919	DAK S430	EB6582N	SCM438	823M30	SNM431	4340	34CrNiMo6
Hollow Bar	VM312	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1518	-
STAINLESS STEEL	SANDVIK	ASSAB	BOHLER	TISSEN	KRUPP		BUDERUS		BRITISH	JIS	AISI	DIN
Chemical resistant	5R10	911	AS2W	-	-	-	-	-	-	SUS27	304	14301
	5R60	926	AS4W	-	-	-	-	-	-	SUS32	316	15CrNiMo1810
	3R60	926L	FASAMU	-	-	-	-	-	-	SUS33	316L	14404
Heat resistant	7RE10	914	Anil therm FF8	4541	4541	-	EB4641	-	314S25	SUS42	310S	15CrNiSi2520
	253MA	-	Anil therm FF	4828	4828	-	EB4828	-	-	-	-	15CrNiSi2012
ABRASION RESISTANT	Eve-Hard	Red diamond	BOHLER	TISSEN	KRUPP		BUDERUS					DIN
	EH 360	RD10	Chronit	1147	Hardox	-	-	-	-	-	-	42mHv7
	EH 400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	EH 500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WEAR PROTECT SYS	DUAPLATE											
Superseded	D 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Series II	D 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Smooth	D 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D 90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3/28/05 - 8.36 PM

Comparison Table HPM 38.

Lampiran 2

Lampiran 3

Spesifikasi MITUTOYO SurfTest-401.

DRIVING/DISPLAY UNIT 178-205 (178-215)

1) Displayable parameters

Parameter	JIS/ISO		DIN
	R	ρ	R
Ra	○		○
Rq (rms)	○		○
Rz		○	○
Rmax		○	○

2) Displayable range $\mu\text{m (in)}$

RANGE	Ra, Rq	Rz, Rmax
R	0.01 - 2.00 (1 - 100)	0.1 - 10.0 (1 - 400)
W	0.1 - 10.0 (1 - 400)	0.2 - 50.0 (1 - 2000)
L	0.2 - 50.0 (1 - 2000)	1 - 250 (1 - 10000)

3) Cutoff value and sampling length mm (inch)

λ_c	X5	X3	X1
0.25 (0.1)	1.25 (0.05)	0.75 (0.03)	0.25 (0.01)
0.8 (0.3)	4 (0.15)	2.4 (0.09)	0.8 (0.03)
2.5 (0.1)	12.5 (0.5)	7.5 (0.3)	2.5 (0.1)

4) Sampling length (L)

METRIC (mm)	0.25	0.8	2.5	8
ENGLISH (inch)	.01	.03	.1	.3

5) Traversing length

$T_{\text{min}} (\text{start up length}) + \text{sampling length}$

6) Driving speed

Measuring speed 0.5mm (0.2")/s

Return speed 1mm (0.4")/s

7) Elevation range for the detector

Coarse range 40mm (1.57")

Fine range 10mm (0.39")

8) Display

LCD

9) Power supply

Nickel cadmium storage

batteries (6 pcs)

15 hours for charging,

130mA for consumption

30 seconds for auto off

10) Operating temperature range 5°C - 40°C

11) Dimensions 204x80x100mm 1.2kg

DETECTOR No. 178-311

- (1) Detecting method: Differential inductance type
- (2) Stroke 0.3mm (0.012")
- (3) Linearity range 0.2mm (0.008")
- (4) Stylus tip Diamond
- (5) Tip shape Conical of 90°
- (6) Tip radius 5 μm (0.00020")
- (7) Measuring force 4mN (0.4gf) or less
- (8) Force variance ratio 0.008N/mm
- (9) Curvature of radius of skid 30mm (1.18")
- (10) Dimensions $\phi 14.8 \times 105\text{mm}$
(.58 x 4.13")
- (11) Weight Approx. 30g
- (12) Other Without stylus lift function

PRINTER No. 178-801

- Printing method Thermosensitive
- Character spec 5x7 dot, 2mm in height, 16 chars/line
- Printing speed Approx. 1 line/s
- Printing items Conditions set and measurements
- Paper Thermosensitive type of roll paper
- Power supply AC adapter (9VDC, 800mA)
- Weight 250g

STANDARD SET

Consisting of	Set No. **			
	178-905	178-903	178-915	178-916
178-205 Drive unit (mm)	○	○	○	○
178-215 Drive unit (mm/in)	○	○	○	○
178-311 Detector	○	○	○	○
178-601 Specimen (mm)	○	○	○	○
178-602 Specimen (mm/in)	○	○	○	○
526688* AC adapter	○	○	○	○
541108 Screw driver	○	○	○	○
200168 Key-spanner	○	○	○	○
178-801 Printer	○	○	○	○
541493 Printer paper		2	2	
995368 Connecting cable	○	○	○	○
471653 Container case	○	○	○	○

- * 526688 for 100V, 526688A for 120V, 526688D for 220V.
520088F for 240V
- ** Suffix A, D or E is needed according to an AC adapter selected.



REGIONAL HEADQUARTERS IN ASIA

MITUTOYO

ASIA PACIFIC PTE. LTD.

10, PINE HILL ROAD, #01-01/02

PSA BUILDING COMPLEX, SINGAPORE, 051

PHONE 2774224 LINE 5

FAX 2774224 LINE 5

CABLE MITUTOYO SINGAPORE

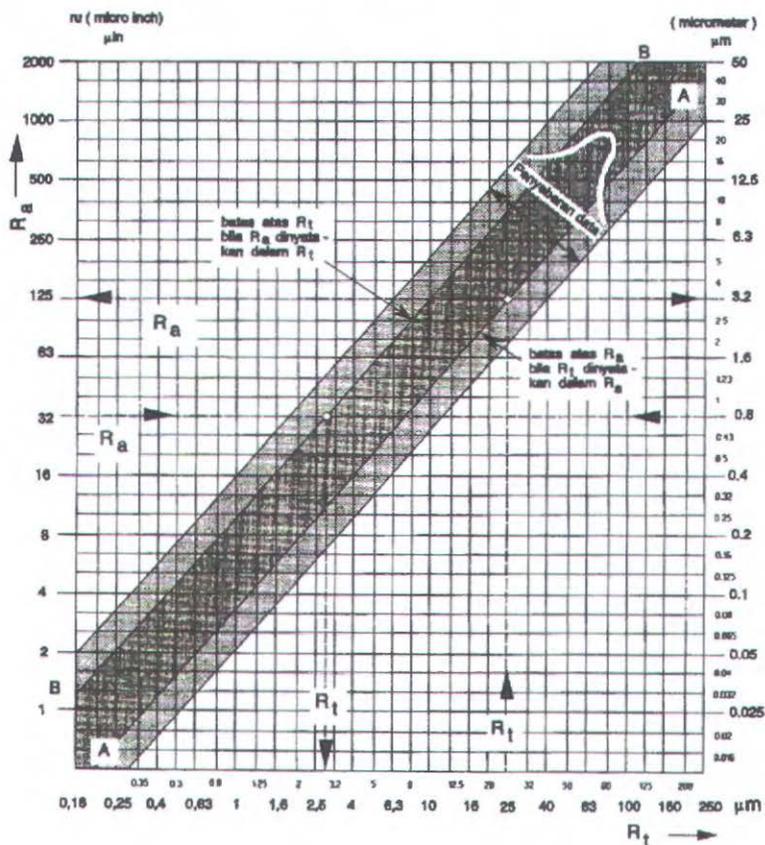
TELEX 3208

Printed in Singapore



Lampiran 4

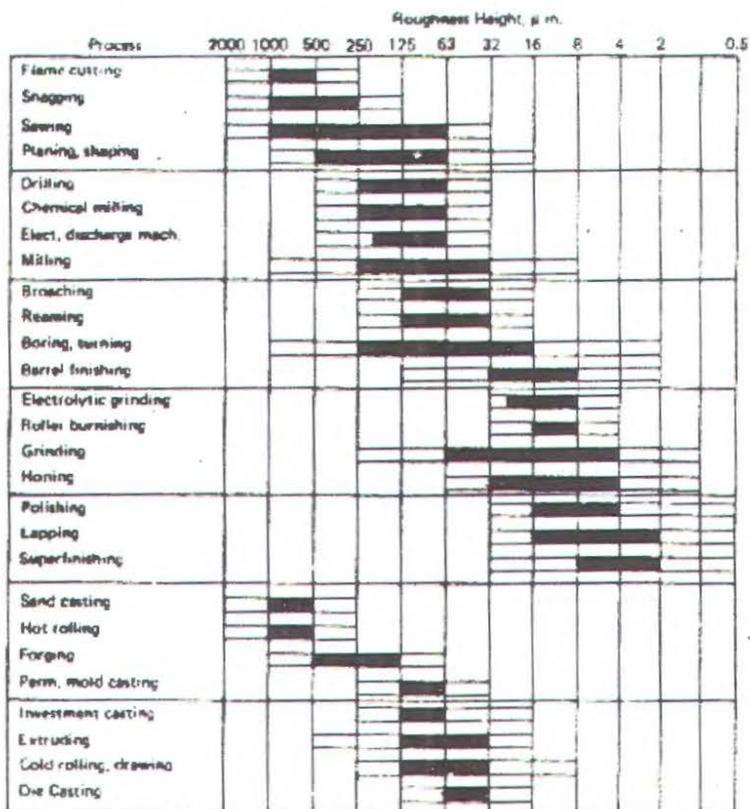
Diagram konversi R_t (μm) terhadap R_a (μm).



Lampiran 5

Surface roughness produced by common production methods.

Figure 4-57 Surface roughness produced by common production methods.
[Courtesy of ASME, ANSI Standard B46.1-1961.]



Key

■ Average application

□ Less frequent Application

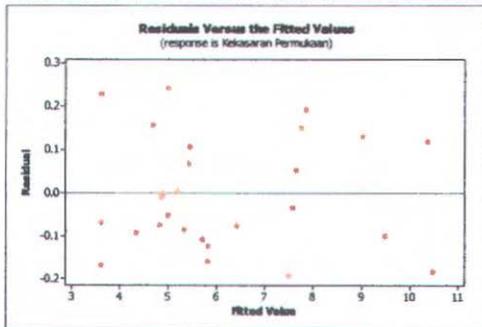
Lampiran 6

Konversi Kode Setting dengan Nilai Sebenarnya.

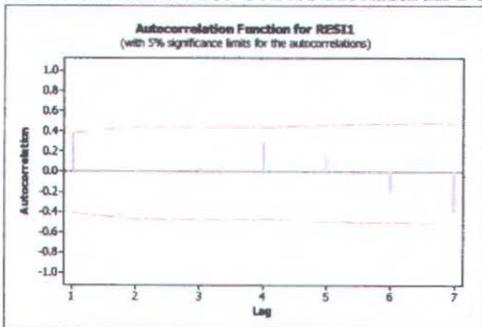
Kode	Arus (A)	On Time (μs)	Off Time (μs)
0	-	80	80
1	3	160	160
2	6	240	240
3	9	320	320
4	12	400	400
5	15	480	480
6	18	560	560
7	21	640	640
8	24	720	720
9	27	800	800
10	30	880	880
11	33	960	960
12	36	1040	1040
13	39	1120	1120
14	42	1200	1200
15	45	1280	1280
16	-	1360	1360
17	-	1440	1440
18	-	1520	1520
19	-	1600	1600

Lampiran 7

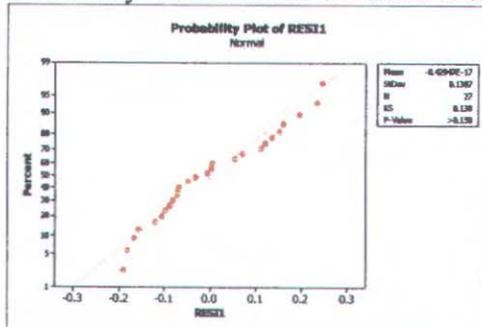
Residuals vs Fits for Kekasaran Permukaan Benda Kerja.



Autocorrelation for St Res Kekasaran Permukaan Benda Kerja

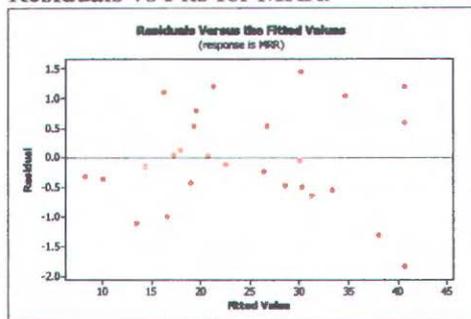


Probability Plot of St Res Kekasaran Permukaan Benda Kerja.

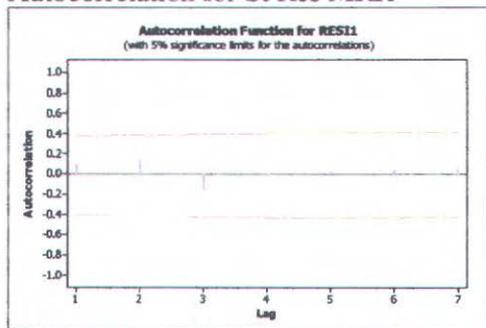


Lampiran 8

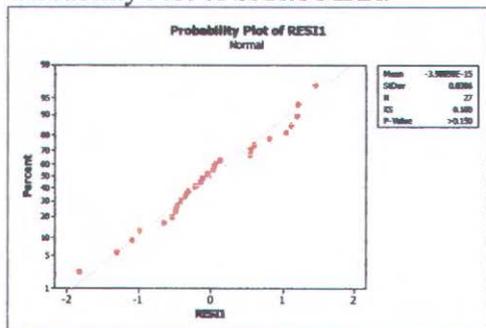
Residuals vs Fits for MRR.



Autocorrelation for St Res MRR



Probability Plot of St Res MRR.



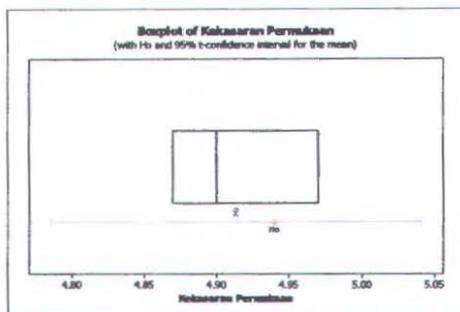
Lampiran 9

One-Sample T: Kekasaran Permukaan

Test of $\mu = 4.94$ vs not = 4.94

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Kekasaran Permuk	3	4.91333	0.05132	0.02963	(4.78586, 5.04081)	-0.90	0.463

Boxplot of Kekasaran Permukaan

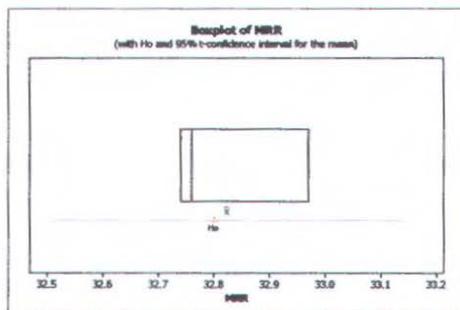


One-Sample T: MRR

Test of $\mu = 32.8$ vs not = 32.8

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
MRR	3	32.8233	0.1274	0.0736	(32.50668, 33.1398)	0.32	0.781

Boxplot of MRR



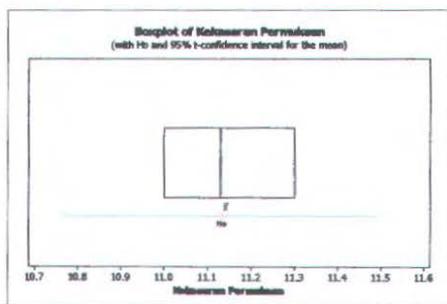
Lampiran 10

One-Sample T: Kekasaran Permukaan

Test of $\mu = 11.1323$ vs not = 11.1323

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Kekasaran Permuk	3	11.1433	0.1504	0.0869	(10.7696, 11.5171)	0.13	0.911

Boxplot of Kekasaran Permukaan



One-Sample T: MRR

Test of $\mu = 22.531$ vs not = 22.531

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
MRR	3	22.4267	0.2346	0.1354	(21.8439, 23.0094)	-0.77	0.522

Boxplot of MRR

