



TUGAS AKHIR (TM-091585)

**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI,
KEAUSAN TEPI PAHAT DAN KEKASARAN
PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK
MATERIAL EMS-45 DENGAN MENGGUNAKAN
METODE TAGUCHI-GRA**

**NOVI DWIJAYANTI
NRP. 2113105005**

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

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017**



FINAL PROJECT (TM-091585)

MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF THE THRUST FORCE, TORQUE, TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS OF THE DRILLING POCESS OF EMS-45 STEEL USING TAGUCHI-GRA METHOD

NOVI DWIJAYANTI
NRP. 2113105005

Academic Advisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017

**OPTIMASI MULTI RESPON GAYA TEKAN, TORSI,
KEAUSAN TEPI PAHAT DAN KEKASARAN
PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK
MATERIAL EMS-45 DENGAN MENGGUNAKAN
METODE TAGUCHI-GRA**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:
NOVI DWIJAYANTI
NRP. 2113105005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D. *Bobby P. Soepangkat*
NP. 1953 05 16 197803 1001 (Pembimbing I)
2. Ir. Winarto, DEA
NP. 1960 12 13 198811 1001 (Penguji I)
3. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NP. 1960 06 23 198803 1002 (Penguji II)
4. Dr. Ir. Bustamal Arifin Noer, M.Sc.
NP. 1959 04 03 198903 1001 (Penguji III)



SURABAYA
Juli, 2017

**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI,
KEAUSAN TEPI PAHAT DAN KEKASARAN
PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK
MATERIAL EMS-45 DENGAN MENGGUNAKAN
METODE TAGUCHI-GRA**

Nama mahasiswa : Novi Dwijayanti
NRP : 2113105005
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Proses gurdi adalah suatu proses pembuatan lubang bulat dengan bantuan mata gurdi. Penggunaan gurdi dengan pengaturan parameter yang tidak tepat akan menghasilkan geometri komponen yang memiliki tingkat kepresisian lubang yang rendah dan kekasaran lubang yang tinggi, serta dapat mempercepat laju keausan pahat. Penelitian ini digunakan untuk menentukan pengaturan faktor gurdi yang tepat untuk meminimalkan variabel respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan pada benda kerja yang dihasilkan. Oleh karena itu, penentuan pengaturan kombinasi faktor yang tepat dan pemilihan metode yang efektif perlu dilakukan untuk memenuhi karakteristik kualitas dari masing-masing respon yang diamati secara serentak.

Eksperimen yang telah dilakukan pada proses pengguridian menggunakan material baja EMS-45. Rancangan percobaan yang digunakan berupa matriks ortogonal L_{18} dengan memvariasikan jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan

sudut ujung pahat. Masing-masing variabel yang diteliti memiliki tiga level kecuali jenis pahat memiliki dua level. Percobaan dilakukan dengan dua kali replikasi. Selanjutnya metode grey relational analysis (GRA) digunakan untuk mengoptimalkan karakteristik multirespon dari hasil percobaan. Karakteristik multirespon yang digunakan adalah semakin kecil semakin baik.

Dari hasil eksperimen yang didapat, variabel proses yang memberikan persen kontribusi paling besar untuk mengurangi variansi total dari respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan secara serentak adalah variabel proses gerak makan sebesar 60,19%, kemudian kecepatan potong sebesar 21,51%, diikuti sudut ujung pahat sebesar 10,92% dan yang terakhir jenis pahat sebesar 1,5%. Pengaturan kombinasi level yang tepat untuk menurunkan respon secara serentak adalah jenis pahat menggunakan HSS, sudut ujung pahat 134°, gerak makan 0,1 mm/put dan kecepatan potong 50 m/menit.

Kata kunci: proses gurdi, Taguchi, GRA

MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF THE THRUST FORCE, TORQUE, TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS OF THE DRILLING POCCESS OF EMS-45 STEEL USING TAGUCHI-GRA METHOD

Student name : Novi Dwijayanti
NRP : 2113105005
Department : Teknik Mesin
Advisor : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Drilling process is a process of making a round hole with the help of drilling eye. The use of drilling with incorrect parameter settings will result in geometry components that have a low level of precision holes and holes roughness is high, and can accelerate the rate of tool wear. This research is used to determine the proper settings drilling factor to minimize the response variable the thrust force, torque, wear tool and surface roughness on the workpiece produced. Therefore, the determination of the appropriate combination of factors arrangement and selection of effective methods need to be done to meet the quality characteristics of each response were observed simultaneously.

Experiments have been conducted on a drilling process using EMS-45 steel material. The experimental

design used in the form L18 orthogonal matrix by varying the type of tools, the cutting speed, feeding speed and the point angle of tools. Each of the variables studied had a three-level exception type of tool has two levels. The experiments were performed twice replication. Furthermore, the method of gray relational analysis (GRA) is used to optimize multi-response characteristics of the experimental results. Multi-response characteristics that is used is the smaller is better.

From the experimental results obtained, the process variables provide per cent contributed most to reduce the total variance of the response to the thrust force, torque, wear tool and surface roughness simultaneously is the feeding speed process variable at 60.19%, then the cutting speed by 21, 51%, followed by point angle of tools 10.92% and the latter type of tools at 1.5%. The setting is a combination of the appropriate level for simultaneously lowering response was kind of using HSS tool, point angle of tools 134°, feeding speed 0.1 mm / put and the cutting speed of 50 m / min.

Keywords: drilling process, Taguchi, GRA

KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah. Rasa syukur penulis panjatkan atas segala nikmat, petunjuk, karunia dan pertolongan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI, KEAUSAN TEPI PAHAT DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL EMS-45 DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GRA**”. Tugas Akhir ini disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

1. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
2. Bapak Ir. Winarto, DEA, bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc., dan bapak Dr. Ir. Bustanul Arifin Noer, M.Sc., sebagai dosen penguji Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT selaku dosen wali penulis, terima kasih atas bantuan dan bimbingannya selama ini.
4. Ibu Putu Dana Karningsih., P.hD yang selalu memberikan semangat selama ini.
5. Ayah, Ibu dan segenap keluarga penulis yang telah memberikan segalanya bagi penulis.
6. Staf lab manufaktur Teknik Mesin-ITS, Pak Gianto, Mas Reza, Mas Faisal.

7. Sahabat seperjuangan Hanif dan Adib, dan juga Arizky selaku penolong dalam pengerjaan tugas akhir ini.
8. Mbak Lusi, mbak Titien, mbak Ellif, mbak Ima, mbak Fitri dan mbak Rahayu yang selalu memberikan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Semua pihak yang belum disebutkan oleh penulis.

Naskah Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur.

Sebagai tanggung jawab atas segala kekurangan, penulis membuka diri untuk segala kritik dan saran yang konstruktif atas tulisan ini. Penulis juga berharap akan ada penelitian-penelitian selanjutnya yang dapat menyempurnakan dan memperbaiki segala kekurangan yang ada dalam penelitian ini. Kesempurnaan hanya milik Yang Maha Sempurna, Allah SWT.

Surabaya, Juli 2017
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.2.1 Batasan Masalah.....	3
1.2.2 Asumsi Penelitian.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Teori Penunjang	5
2.1.1 Proses Gurdi	5
2.1.2 Geometri Pahat	7
2.1.3 Gaya Pematongan Dalam Proses Gurdi.....	9
2.1.4 Keausan Pahat	13
2.1.5 Kekasaran Permukaan	16
2.1.6 Metode Taguchi.....	22
2.1.7 Prosedur Eksperimen.....	23

2.1.8 Metode GRA	31
2.1.9 Interpretasi Hasil Eksperimen.....	36
2.1.10 Eksperimen Konfirmasi	38
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	39
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	39
3.2 Variabel Penelitian	41
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	42
3.3.1 Alat penelitian	42
3.3.2 Bahan Penelitian.....	47
3.4 Pemilihan Matriks Ortogonal	49
3.5 Prosedur Percobaan	53
BAB 4 HASIL DAN ANALISA DATA.....	57
4.1 Data Hasil Pengukuran	57
4.2 Optimasi Multirespon Taguchi-GRA	59
4.2.1 Penghitungan Rasio S/N.....	59
4.2.2 Normalisasi Rasio S/N.....	61
4.2.3 Perhitungan Deviation Sequence $\Delta \mathbf{0}, \mathbf{i}(k)$	63
4.2.4 Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dan Grey Relational Grade (GRG).....	65
4.2.5 Kombinasi Variabel proses untuk Respon Optimal	66
4.2.6 Analisis Variansi dan Persen Kontribusi	69
4.2.7 Prediksi Multi Respon Optimal dan Interval Keyakinan.....	73
4.2.8 Eksperimen Konfirmasi	74

4.2.9 Pengaruh Variabel proses yang Signifikan Terhadap GRG.....	78
4.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Respon Individu.....	79
4.3.1 Pengaruh Variabel Proses terhadap Gaya Tekan	80
4.3.2 Pengaruh Variabel Proses terhadap Torsi	81
4.3.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Keausan Tepi Pahat	81
4.3.4 Pengaruh Variabel Proses terhadap kekasaran Permukaan	82
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA	

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses gurdi (Rochim, 1993)	5
Gambar 2.2 Nama-nama bagian pahat gurdi dengan sarung tirusnya (Widarto, 2008)	8
Gambar 2.3a). Teori pemotongan geram b). Lingkaran Gaya Pemotongan (Lingkaran Merchan c).Penampang geram (Rochim, 1993).....	9
Gambar 2.4 Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993).....	11
Gambar 2.5 Kurva keausan pahat potong (Rochim, 1993)	14
Gambar 2.6 Daerah pengukuran keausan tepi pahat (Lee <i>et al.</i> , 1998).....	15
Gambar 2.7 Keausan tepi pahat bubut (Astakhov, 2004)	16
Gambar 2.8 Bentuk kekasaran dan penggelombangan pada permukaan.....	17
Gambar 2.9 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 1993)	17
Gambar 2.10 Penyimpangan rata-rata aritmatika (Sato, 2000)	18
Gambar 2.11 Langkah-langkah proses optimasi.....	32
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	39
Gambar 3.2 Mesin CNC <i>milling</i> Emco VMS-200.....	42
Gambar 3.3 Dinamometer tipe 9272.....	43
Gambar 3.4 Akuisisi data tipe 5697A.....	43
Gambar 3.5 <i>Charge amplifier</i> type 5070A	44
Gambar 3.6 Compaq presario CQ35-336TX	44
Gambar 3.7 Nikon <i>measurescope</i>	45
Gambar 3.8 Mistar insut	45
Gambar 3.9 <i>Drillholder</i> untuk mencekam pahat	46
Gambar 3.10 Mitutoyo <i>surfrest</i> SJ-310.....	46
Gambar 3. 11 <i>Precision drill grinder</i>	47

Gambar 3.12 a.) Pahat HSS M2 b.) Pahat HSS M35 (cobalt)	48
Gambar 3.13 Baja EMS-45	49
Gambar 3.14 Dimensi benda kerja.....	49
Gambar3.15Pemasangan benda kerja pada dinamometer	53
Gambar 3.16 Pemasangan instrumentasi dinamometer...	54
Gambar 4.1 Grafik Nilai Rata-Rata GRG pada Masing-Masing Level Variabel Proses	68
Gambar 4.2 Plot Interval Keyakinan Hasil Optimasi dan Eksperimen Konfirmasi	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batas keausan kritis (Rochim, 1993)	14
Tabel 2.2 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran (Rochim, 1993).....	20
Tabel 2.3 Nilai Kekasaran yang dicapai oleh Beberapa Pengerjaan	21
Tabel 2.4 Tabel Analisis Variansi.....	28
Tabel 2.5 Penempatan Rasio S/N.....	33
Tabel 2.6 Tabel Respon <i>Grey Reasoning Grade</i>	36
Tabel 3.1 Total derajat kebebasan variabel proses dan levelnya	50
Tabel 3.2 Rancangan percobaan Taguchi	51
Tabel 3.3 Variabel proses dan levelnya	51
Tabel 3.4 Tampilan data hasil eksperimen	52
Tabel 4.1 Data hasil eksperimen.....	58
Tabel 4.2 Rasio S/N pada Masing-Masing Respon.....	60
Tabel 4.3 Normalisasi Rasio S/N pada Masing Masing Respon.....	62
Tabel 4.4 Deviation Sequence pada Masing-Masing Respon.....	64
Tabel 4.5 GRC dan GRG pada Masing-Masing Respon.....	66
Tabel 4.6 Nilai Rata-Rata GRG pada Masing-Masing Level Variabel Proses... ..	67
Tabel 4.7 Kombinasi Variasi Proses untuk Respon Optimal.....	68
Tabel 4.8 ANAVA untuk GRG.....	70
Tabel 4.9 ANAVA dan Persen Kontribusi untuk GRG... ..	72
Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi pada Masing-Masing Respon.....	75
Tabel 4.11 Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi.....	75

Tabel 4.12	Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi.....	75
Tabel 4.13	Deviation Sequence Eksperimen Konfirmasi	76
Tabel 4.13	GRG Eksperimen Konfirmasi pada Kombinasi Optimum	76
Tabel 4.14	Persen Kontribusi Variabel Proses terhadap Respon Individu.....	80

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pemesinan adalah proses mengubah bentuk benda kerja menjadi sebuah produk dengan cara perautan maupun pemotongan. Perautan terjadi karena gerak relatif dan persinggungan antara pahat dengan benda kerja sehingga menghasilkan geram. Proses pemesinan yang sering dilakukan adalah bubut, freis dan gurdi.

Proses gurdi sendiri merupakan proses pemesinan yang menghasilkan lubang silindris pada benda kerja baik itu logam maupun non logam. Pahat gurdi dikenal dengan nama penggurdi puntir yang memiliki dua mata potong. Alur/*flute* penggurdi puntir yang berbentuk spiral berfungsi sebagai jalan keluar geram dari hasil pemotongan yang terjadi di ujung pahat. Putaran spindel menghasilkan gerak potong yang bergerak secara rotasi. Gerak makan pada gurdi terjadi karena gerakan translasi pahat gurdi pada arah sumbu putarnya. Proses gurdi menjadi bagian yang penting karena banyak digunakan dalam bidang industri. Hampir 25% proses produksi menggunakan proses penggurdian (Tonshoff *et al.*, 1994).

Baja EMS-45 merupakan jenis baja yang memiliki sifat mampu mesin dan mampu las yang baik. Baja ini juga memiliki sifat tahan aus dan keuletan yang baik. Kekerasan baja EMS-45 ini 29 HRC.

Respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan yang dihasilkan pada proses gurdi tergantung pada variabel proses yang digunakan. Variabel proses yang digunakan adalah jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat. Pemilihan variabel proses yang tepat sangat penting dilakukan untuk memperpanjang umur pahat atau meminimumkan keausan tepi pahat dan untuk meningkatkan produktivitas dari proses gurdi (Lin, 2002).

Metode Taguchi adalah salah satu metode yang efektif

untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*, yaitu usaha pengendalian atau perbaikan kualitas yang dimulai dari perancangan hingga pemrosesan produk (Soejanto, 2009). Kelebihan metode Taguchi adalah dapat digunakan untuk meneliti jumlah besar dari variabel-variabel dengan jumlah eksperimen yang sedikit (Vankanti dan Ganta, 2013). Metode Taguchi hanya dapat mengoptimasi proses pada salah satu respon saja, tetapi kenyataannya kebanyakan permasalahan yang timbul adalah bersifat multi respon. Pada optimasi multi respon, menaikkan atau memperbaiki satu respon akan menyebabkan perubahan pada respon yang lain (Soejanto, 2009). Untuk mengatasi keterbatasan ini, beberapa peneliti menggabungkan metode Taguchi dengan *grey relational analysis* (GRA). GRA yang didasarkan pada teori sistem *grey* dapat digunakan untuk mengatasi kekurangan informasi yang tidak lengkap dan tidak jelas (Deng, 1989). Tosun (2006) meneliti pengaruh dari parameter proses gurdi, yaitu gerak makan, kecepatan spindel dan sudut ujung pahat. Respon yang diteliti adalah kekasaran permukaan benda kerja dan ketinggian *burr*. Material yang digunakan adalah baja AISI 4140. Metode optimasi yang digunakan adalah Taguchi yang digabung dengan GRA.

Pada penelitian ini akan dilakukan suatu optimasi multi respon pada proses gurdi. Variabel respon pada penelitian ini adalah gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan pada benda kerja. Variabel proses pada penelitian ini adalah jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat. Material yang digunakan adalah baja EMS-45. Rancangan eksperimen ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi. Metode optimasi multi respon yang digunakan adalah GRA.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan pada tugas akhir ini adalah:

1. Apakah jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat memiliki kontribusi dalam mengurangi variasi secara serentak dari respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan.
2. Bagaimana kombinasi yang tepat dari level variabel proses sehingga dapat meminimumkan respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan.

1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan pada penelitian ini adalah:

1. Tidak membahas masalah biaya selama proses pemesinan.
2. Penelitian dilakukan sesuai dengan batas kemampuan dari mesin yang digunakan.
3. Bahan benda kerja adalah baja EMS-45.
4. Pahat gurdi terdiri dari HSS M2 dan HSS M35 (cobalt) dengan diameter 10 mm.
5. Pahat gurdi memiliki 2 alur.
6. Dinamometer yang digunakan adalah KISTLER tipe 9272.
7. Mesin gurdi yang digunakan adalah CNC *milling* Emco VMC-200
8. Proses pemesinan kering.
9. Proses gurdi dilakukan menembus benda kerja sedalam 30 mm.

1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi-asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah:

1. Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Material yang digunakan memiliki kehomogenan sifat mekanik dan komposisi kimia.
3. Mesin bekerja dalam kondisi baik.

4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui besar persen kontribusi dari jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat proses gurdi dalam mengurangi variasi secara serentak dari respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan.
2. Menentukan kombinasi level yang tepat dari variabel proses sehingga dapat meminimumkan respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan pada proses gurdi.
2. Bagi industri manufaktur dapat digunakan untuk membantu menentukan parameter-parameter proses secara tepat sesuai dengan material benda kerja yang akan dikerjakan.
3. Bagi masyarakat terutama bengkel produksi dapat digunakan untuk membantu memberikan informasi parameter proses mana yang sesuai dengan material benda kerja yang akan dikerjakan sehingga dapat dilakukan pemilihan parameter yang tepat.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

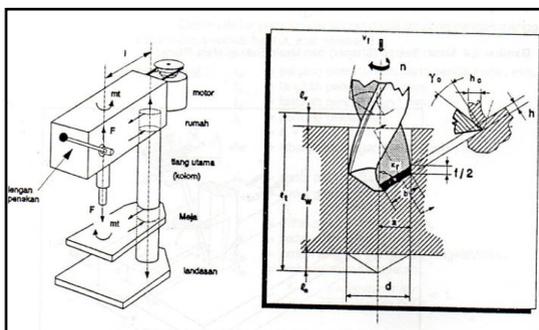
2.1 Teori Penunjang

2.1.1 Proses Gurdi

Proses menggurdi adalah proses pembuatan lubang silindris (*cylindrical hole*) pada benda kerja dengan menggunakan pahat gurdi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pahat gurdi adalah sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki sisi potong dan galur yang berhubungan secara berkesinambungan disepanjang badan pahat gurdi. Galur ini, yang dapat berbentuk lurus atau *helix*, disediakan untuk memungkinkan lewatnya geram dan fluida pendingin. Pada proses ini, pahat gurdi berputar dan menekan ke bawah untuk melakukan proses pemakanan ke dalam benda kerja. Pada proses pemotongan terjadi gerak relatif dan persinggungan antara pahat dan benda kerja yang menghasilkan geram (*chips*).

Proses gurdi mempunyai karakteristik yang agak berbeda dengan proses pemesinan yang lain karena:

- Geram harus keluar dari lubang yang dibuat.
- Geram yang keluar dapat menyebabkan masalah ketika ukurannya besar dan atau kontinyu.



Gambar 2.1 Proses gurdi (Rochim, 1993)

Keterangan gambar:

- v_f : kecepatan makan (mm/min)
 n : putaran poros utama (rpm)
 k_r : sudut potong utama (derajat; $^{\circ}$) atau $\frac{1}{2}$ sudut ujung pahat (*point angle*)
 d : diameter gurdi (mm)
 l_w : panjang pemotongan benda kerja (mm)
 l_t : panjang total langkah pemotongan (mm)
 l_v : panjang langkah awal pemotongan (mm)
 l_n : panjang langkah akhir pemotongan (mm)
 γ_0 : sudut pembentukan geram (derajat; $^{\circ}$)
 h_c : tebal pemotongan setelah terpotong (mm)

Menurut Rochim (1993) elemen-elemen dasar proses gurdi meliputi:

A. Pahat potong

a. Kecepatan Potong

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/menit)} \quad (2.1)$$

b. Gerak makan permata potong

$$f_z = v_f / (n \cdot z) \text{ (mm/putaran)} \quad (2.2)$$

c. Kedalaman potong

$$a = \frac{d}{2} \text{ (mm)} \quad (2.3)$$

d. Waktu pemotongan

$$t_c = l_t / v_f \text{ (min)} \quad (2.4)$$

dimana, $l_t = l_v + l_w + l_n$ (mm)

$$l_n = (d/2) / \tan k_r \text{ (mm)}$$

g. Kecepatan penghasilan geram

$$z = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot v_f}{4 \times 1000} \text{ (cm}^3\text{/menit)} \quad (2.5)$$

Dengan:

- v = Kecepatan potong
 d = Diameter pahat potong
 n = putaran
 f_z = Gerak makan

z	= Jumlah gigi (mata potong)
t_c	= waktu pemotongan
v_f	= Kecepatan makan
a	= Gerak makan persisi potong
b	= Lebar pemotongan
k_r	= Sudut potong utama
z	= Kecepatan penghasil geram
l_t	= Panjang total langkah pemotongan (mm)
l_v	= Langkah awal pemotongan (mm)
l_w	= Panjang pemotongan benda kerja (mm)

B. Mesin gurdi

a. Putaran poros utama mesin

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} (\text{putaran/menit}) \quad (2.6)$$

b. Waktu pemotongan

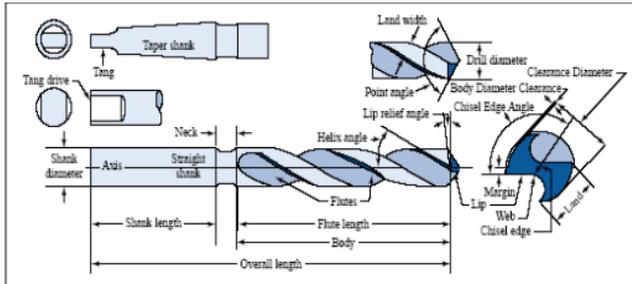
$$t_c = \frac{l_t}{v_f} (\text{menit}) \quad (2.7)$$

Selain elemen-elemen pada proses gurdi, diperkenalkan juga dua sudut pahat yang penting, yaitu sudut potong utama (*principle cutting edge angle*) dan sudut geram (*rake angle*), yang memegang peranan dalam penentuan gaya pemotongan dan umur pahat.

2.1.2 Geometri Pahat

Pahat gurdi adalah sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki sisi potong dan galur yang berhubungan secara berkesinambungan disepanjang jalan pahat gurdi. Galur dapat berbentuk lurus atau *helix*, yang disediakan untuk memungkinkan lewatnya geram dan fluida pendingin. Pada proses gurdi terdapat berbagai tipe pahat yang digunakan. Sebagian besar proses pemesinan gurdi ini menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pahat ini ditunjukkan pada Gambar 2.2. Di antara bagian-bagian pahat tersebut yang paling utama adalah sudut *helix* (*helix angle*),

sudut ujung/sudut potong utama (*point angle/lip angle*), dan sudut bebas (*clearance angle*).



Gambar 2.2 Nama-nama bagian pahat gurdi dengan sarung tirusnya (Widarto, 2008)

Bagian-bagian utama dari *twist drill* adalah *body* (badan pahat), *point* (bagian dari ujung yang runcing), dan *shank* (tangkai). *Twist drill* dapat diklasifikasikan menurut materialnya, jenis tangkainya, jumlah *flute*, ukuran diameter dan geometri pahatnya (Tragedi, 2010).

Berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Tragedi, 2010):

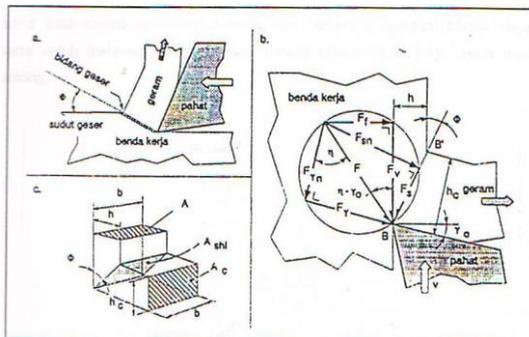
1. *Straight shank drill*, jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk silinder.
2. *Taper shank drill*, jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk konis, yang sesuai untuk dipasang langsung pada spindle mesin.

Berdasarkan jumlah *flute*, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Tragedi, 2010):

1. *Single flute drill*, pahat ini mempunyai satu *flute* dan digunakan untuk proses *drill* pada material plastik.
2. *Two flute drill*, pahat ini merupakan tipe *drill* konvensional.
3. *Three flute drill*, pahat ini merupakan tipe *twist drill* yang relatif baru dikembangkan pada proses pemotongan logam (*metalcutting*).

2.1.3 Gaya Pemotongan Dalam Proses Gurdi

Pemotongan dalam proses pemesinan dianggap sebagai akibat konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh gaya tekan dari mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan menimbulkan tegangan geser yang maksimum. Karena tegangan geser tersebut melebihi kekuatan bahan benda kerja yang bersangkutan, terjadi deformasi plastis pada daerah tegangan yang dirambatkan oleh gerakan pahat. Deformasi plastis ini menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser, sehingga terbentuk geram seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3



Gambar 2.3a). Teori pemotongan geram b). Lingkaran Gaya Pemotongan (Lingkaran Merchant) c). Penampang geram (Rochim, 1993)

Gaya potong adalah gaya yang menimbulkan tegangan geser yang menghasilkan deformasi plastis pada bidang geser. Pada perhitungan teoritik diasumsikan bahwa deformasi material benda kerja dalam proses pemotongan terjadi dalam dua dimensi, dan tegangan yang terdistribusi merata pada bidang geser. Berdasarkan analisa geometrik dari lingkaran

gaya seperti ditunjukkan oleh gambar 2.3.b., perumusan dari gaya potong teoritik F_v adalah:

$$F_v = \frac{F_s \cos(\eta - \gamma_0)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} ; N \quad (2.8)$$

dengan

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.9)$$

$$F_s = F \cos(\Phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.10)$$

F adalah gaya total dan F_s adalah gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastis. F_s dapat ditentukan dengan menggunakan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi, yaitu:

$$F_s = A_{shi} \tau_{shi} (N) \quad (2.11)$$

Dengan:

$$A_{shi} = A / \sin \Phi = \text{penampang bidang geser (mm}^2\text{)}$$

Luas pemotongan adalah:

$$A = \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \text{ (mm}^2\text{)}$$

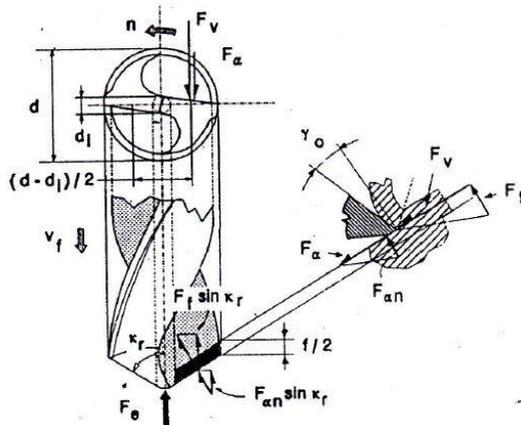
Dengan demikian gaya potong adalah:

$$F_v = \tau_{shi} A \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} (N) \quad (2.12)$$

$$F_v = \tau_{shi} \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} (N) \quad (2.13)$$

Pada proses gurdi menggunakan pahat dengan dua mata potong, gaya pemotongan pada salah satu mata potong dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu F_v dan F_f , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. F_f adalah gaya makan yang searah dengan kecepatan makan. Penekanan yang terjadi pada proses gurdi berfungsi untuk melawan gaya ekstruksi yang

cukup besar diujung pahat gurdi (karena kecepatan potong diujung pahat gurdi sama dengan nol, maka tidak terjadi pemotongan melainkan penekanan atau ekstruksi benda kerja), serta untuk melawan gesekan pada bidang utama atau mayor bagi kedua mata potong.



Gambar 2.4 Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993)

Berdasarkan gambar 2.4, dapat diturunkan rumus gaya tangensial, yaitu:

$$F_t = F_v + F_a \quad (\text{N}) \quad (2.14)$$

F_a adalah gaya gesek pada bidang utama, tergantung pada gaya gesek spesifik persatuan panjang aktif mata potong (K_f ; N/mm) yang dipengaruhi oleh geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

Persamaan gaya gesek adalah:

$$F_a = K_f \frac{d - d_i}{2 \sin \kappa_r} \quad (\text{N}) \quad (2.15)$$

Substitusi persamaan 2.13 dan persamaan 2.15 ke dalam persamaan 2.14 menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_v = \tau_{shi} \cdot \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta-\gamma_0)}{\sin\Phi \cos(\Phi+\eta-\gamma_0)} + K_f \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \quad (N) \quad (2.16)$$

Dengan:

- τ_{shi} adalah tegangan geser dinamik, yang merupakan sifat benda kerja dalam hubungannya proses pemotongan (N/mm^2).
- γ_0 adalah sudut geram.
- η adalah sudut gesek, yang menentukan rasio antara gaya normal dan gaya tangensial yang dipengaruhi oleh kondisi pemotongan.
- Φ adalah sudut geser, merupakan sifat benda kerja dalam proses pemotongan dan dipengaruhi oleh material pahat potong dan kondisi pemotongan.

Momen torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat berputar:

$$M = F_t \frac{d-d_i}{2} \quad (N) \quad (2.17)$$

Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung:

$$F_z = 2F_f \sin k_r + 2F_{a\eta} \sin k_r + F_e \quad (N) \quad (2.18)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} F_z &= \text{gaya tekan total untuk dua sisi potong (N)} \\ F_f &= \text{gaya makan (N)} \\ F_f &= F_v \tan(\eta - \gamma_0) \end{aligned} \quad (2.19)$$

F_{an} = gaya normal pada bidang utama potong, tergantung pada gaya normal spesifik persatuan panjang aktif mata potong

($k_n; N/mm$) yang dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

F_e = gaya ekstrusi yang terjadi di ujung pahat potong, sesuai dengan penampang diameter inti dari hasil percobaan umumnya berharga sekitar 50% sampai dengan 55% dari gaya tekan total (N).

Dengan demikian besarnya gaya tekan total:

$$F_z = 4 \left\{ F_v \tan(\eta - \gamma_0) \sin k_r + k_n \frac{d-d_i}{2} \right\} (N) \quad (2.20)$$

2.1.4 Keausan Pahat

Keausan pahat akan tumbuh atau membesar dengan bertambahnya waktu pemotongan pada proses gurdi, sampai suatu saat pahat yang bersangkutan dianggap tidak dapat lagi, karena telah ada tanda-tanda tertentu yang menunjukkan bahwa umur pahat telah habis. Semakin besar keausan atau kerusakan yang diderita pahat maka kondisi pahat akan semakin kritis. Jika pahat tersebut masih tetap digunakan maka pertumbuhan keausan akan semakin cepat dan pada suatu saat ujung pahat sama sekali akan rusak (Tragedi, 2010). Keausan pahat potong akan dapat menimbulkan beberapa efek, antara lain:

- Kenaikan gaya potong.
- Getaran atau *chattering*.
- Penurunan kehalusan permukaan hasil pemesinan.
- Perubahan dimensi (geometri) produk.

Dalam prakteknya umur pahat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang berhubungan dengan proses pemesinan, yaitu: jenis material benda kerja dan pahat, kondisi pemotongan (kecepatan potong, kedalaman potong dan gerak makan), cairan pendinginan dan jenis proses pemesinan. Untuk menghindari kerusakan atau efek yang ditimbulkan karena keausan pahat, ditetapkan suatu harga batas keausan (dimensi dari keausan tepi atau keausan kawah) yang dianggap sebagai batas krisis dimana pahat tidak boleh digunakan. Tabel 2.1 memperlihatkan batas

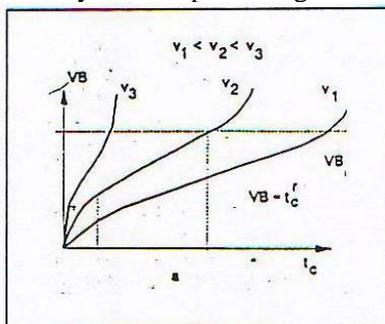
keausan yang diijinkan bagi suatu jenis pahat yang digunakan untuk memotong suatu jenis benda kerja (Rochim, 1993)

Tabel 2.1 Batas keausan kritis (Rochim, 1993)

Pahat	Benda Kerja	VB (mm)	K
HSS	Baja dan Besi Tuang	0,3 s.d. 0,8	.
Karbida	Baja	0,2 s.d. 0,6	0,3
Karbida	Besi Tuang dan Non Ferrous	0,4 s.d. 0,6	0,3
Keramik	Baja dan Besi Tuang	0,3	.

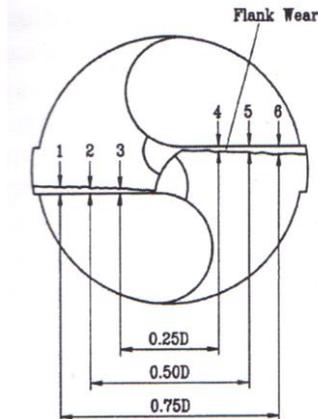
Dimensi dari umur pahat merupakan besaran waktu, yang dapat dihitung secara langsung maupun secara tidak langsung dengan mengkorelasikan terhadap besaran lain. Hal tersebut dimaksudkan untuk mempermudah prosedur perhitungan sesuai dengan jenis pekerjaan yang dilakukan.

Pada dasarnya dimensi keausan menentukan batasan umur pahat sehingga kecepatan pertumbuhan keausan menentukan laju saat berakhirnya masa guna pahat. Pertumbuhan keausan tepi (*flank wear*) dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5. Keausan dimulai dengan pertumbuhan yang relatif cepat sesaat setelah pahat digunakan, diikuti pertumbuhan linier setara dengan bertambahnya waktu pemotongan.



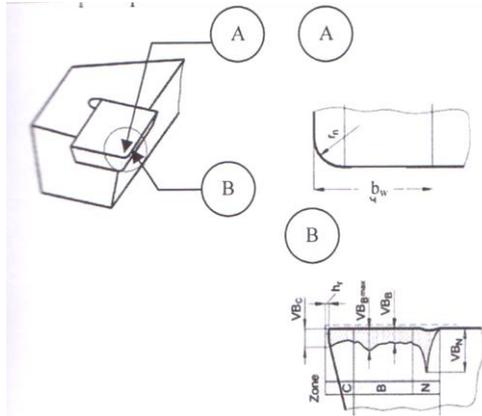
Gambar 2.5 Kurva keausan pahat potong (Rochim, 1993)

Pengukuran keausan tepi pahat perlu dipertimbangkan sebagai parameter respon dari proses gurdi. Hal itu bertujuan untuk mengetahui performa pahat. Pengukuran keausan tepi pahat diamati pada kedua bidang tepi pahat dengan menggunakan *measurescope*. Hasil pengukuran keausan tepi pahat diperoleh dari nilai rata-rata enam daerah bidang tepi pahat gurdi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Daerah pengukuran keausan tepi pahat (Lee *et al.*, 1998)

Apabila salah satu bagian mata potong pahat gurdi dipotong, maka mata pahat gurdi akan memiliki kesamaan dengan mata pahat bubut. Keausan tepi pahat gurdi menyerupai keausan tepi pahat bubut. Keausan tepi pahat bubut diperlihatkan pada gambar 2.7

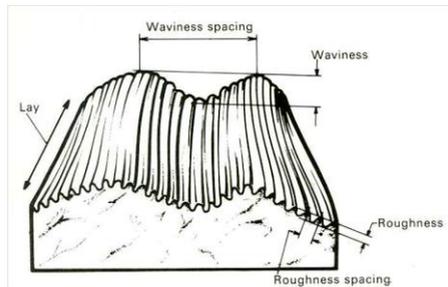


Gambar 2.7 Keausan tepi pahat bubut (Astakhov, 2004)

Lebar keausan tepi pahat bubut dibagi menjadi tiga daerah, yaitu VB_C , VB_B , dan VB_N . VB_C merupakan lebar keausan tepi di daerah C (*nose land*). VB_B merupakan keausan tepi di daerah B (*flank land*). VB_N merupakan keausan tepi di daerah N (*notch*). Total keseluruhan panjang keausan tepi pahat dari daerah C sampai N diberi simbol b_w .

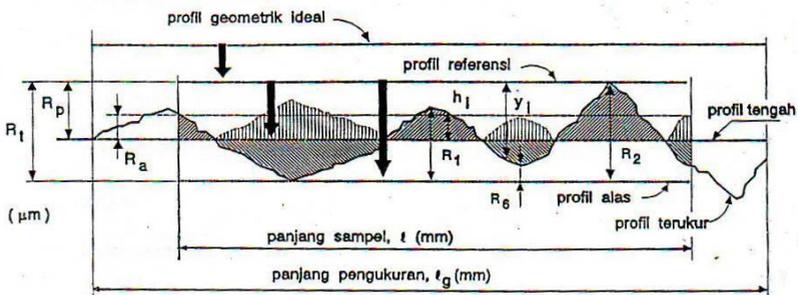
2.1.5 Kekasaran Permukaan

Kekasaran didefinisikan sebagai ketidakhalusan bentuk yang menyertai proses produksi yang disebabkan oleh pengerjaan mesin. Setiap permukaan komponen dari suatu benda mempunyai beberapa bentuk yang bervariasi menurut strukturnya maupun dari hasil proses produksinya. Karakteristik permukaan tersebut ada yang bentuknya halus, dapat juga dalam bentuk kekasaran (*roughness*) maupun membentuk gelombang (*waviness*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bentuk kekasaran dan penggelombangan pada permukaan

Kualitas kekasaran permukaan proses pemesian yang paling umum digunakan adalah harga kekasaran rata-rata aritmatika (R_a) yaitu, sebagai standar kualitas permukaan dari hasil pemotongan maksimum yang diijinkan. Posisi R_a , parameter kekasaran yang lain, bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dilakukan oleh alat ukur kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 2.9.

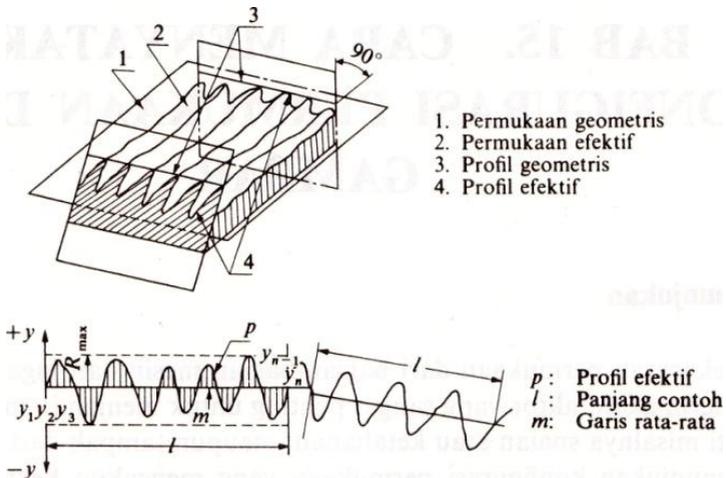


Gambar 2.9 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)

Kekasaran permukaan merupakan penyimpangan rata-rata aritmatika dari garis rata-rata profil. Definisi ini digunakan untuk menetapkan harga-harga kekasaran permukaan dalam ISO 1302-1978. Kekasaran permukaan juga dapat ditunjukkan

oleh sepuluh titik ketinggian dari ketidakrataan (R_z) atau ketinggian maksimum dari ketidakrataan secara konvensional (R_{max}).

Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) ialah harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif berarti garis bentuk (*contour*) dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan oleh Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Penyimpangan rata-rata aritmatika (Sato, 2000)

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

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.21)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.22)$$

atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.23)$$

dimana:

R_a = nilai kekasaran aritmatika

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

n = frekuensi pengukuran

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

Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.2

Tabel 2.2 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran (Rochim, 2001)

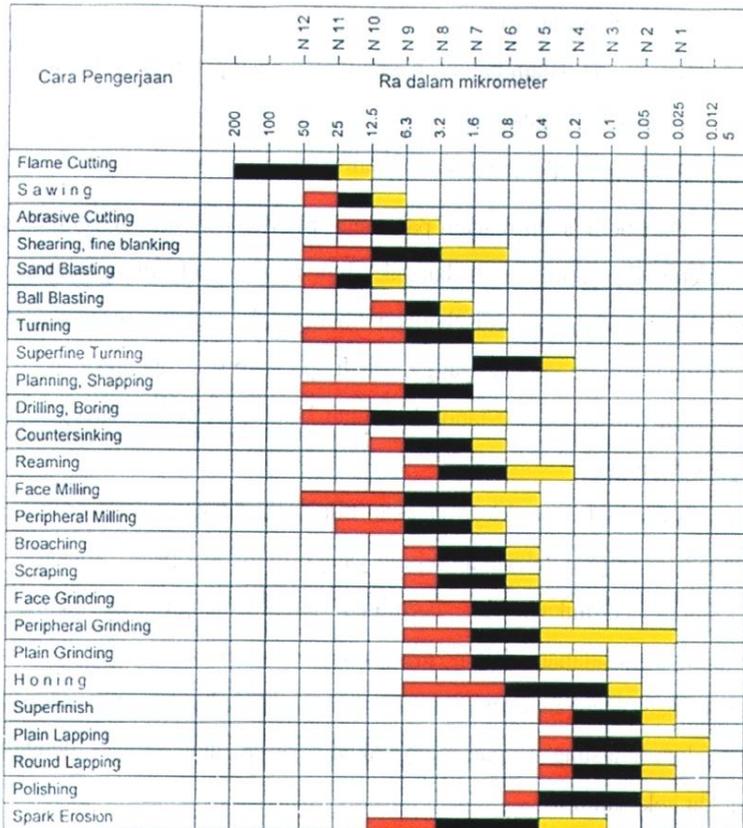
Kekasaran, R_a (μm)	Tingkat kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Faktor-faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan (Rochim, 2001) dapat berasal dari:

1. Parameter proses pemesinan, yaitu kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong.
2. Geometri pahat, yaitu radius pojok dan sudut geram.
3. Sifat dari material benda kerja dan pahat.
4. Alat bantu dan cairan pendingin yang digunakan.
5. Jenis dan kualitas dari mesin yang digunakan.
6. Getaran antara pahat, benda kerja dan mesin.

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Nilai Kekasaran yang dicapai oleh Beberapa Pengerjaan



Keterangan :  kasar normal halus

Sumber: www.finetubes.co.uk

Keterangan:

Kasar = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan kasar.

Normal = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan normal.

Halus = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan khusus.

2.1.6 Metode Taguchi

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

Metode Taguchi menunjukkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu produk dan proses yang *robust* terhadap kondisi lingkungan, mengembangkan kualitas produk yang *robust* terhadap variasi komponen, dan meminimalkan variasi di sekitar target. Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya.

Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.

3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

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

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

2.1.7 Prosedur Eksperimen

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

1. Tahap perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari eksperimen-eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan eksperimen yang memberikan informasi positif atau negatif. Informasi positif terjadi apabila hasil eksperimen memberikan indikasi tentang faktor dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk. Informasi negatif terjadi apabila hasil eksperimen gagal memberikan indikasi tentang faktor-faktor

yang mempengaruhi respon. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:

- a. Perumusan masalah
Rumusan masalah harus didefinisikan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.
- b. Penentuan tujuan eksperimen
Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan.
- c. Penentuan respon
Respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain. Dalam desain eksperimen Taguchi, respon adalah karakteristik kualitas yang terdiri dari tiga kategori, yaitu:
 - 1) Karakteristik yang dapat diukur, yaitu semua hasil akhir yang dapat diukur dengan skala kontinyu. Contoh dari karakteristik ini adalah temperatur, berat, tekanan dan lain-lain.
 - 2) Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinyu, tetapi dapat diklasifikasikan secara berkelompok. Contoh dari karakteristik ini adalah retak, jelek, baik dan lain-lain.
 - 3) Karakteristik dinamik, yaitu fungsi representasi dari proses yang diamati. Proses yang diamati digambarkan sebagai sinyal dan keluaran digambarkan sebagai hasil dari sinyal. Contoh karakteristik ini adalah sistem transmisi otomatis dengan putaran mesin sebagai masukan dan perubahan getaran sebagai keluaran.
- d. Pengidentifikasi faktor
Faktor adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan

mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

- e. Pemisahan faktor kontrol dan faktor gangguan
Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.
- f. Penentuan jumlah dan nilai level faktor
Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.
- g. Perhitungan derajat kebebasan
Derajat kebebasan adalah sebuah konsep untuk mendeskripsikan seberapa besar eksperimen harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan oleh eksperimen tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.24)$$
 Derajat kebebasan dari faktor dan level (v_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level faktor} - 1 \quad (2.25)$$
- h. Pemilihan matriks ortogonal
Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah faktor dan jumlah

level faktor. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah faktor dengan jumlah eksperimen yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a (b^c) \quad (2.26)$$

Dengan:

- L = rancangan bujur sangkar latin
- a = banyaknya eksperimen
- b = banyaknya level faktor
- c = banyaknya faktor

Matriks ortogonal ditentukan dengan berpedoman pada grafik linier standar dari matriks ortogonal yang dipilih.

2. Tahap pelaksanaan

Tahap pelaksanaan meliputi penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

a. Jumlah replikasi

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

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

b. Randomisasi

Dalam sebuah eksperimen, ada pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan, seperti: kelelahan operator, fluktuasi daya mesin, dan lain-lain. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi

(pengacakan) urutan percobaan. Secara umum, randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

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

Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

3. Tahap analisis

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil eksperimen.

a. Analisis variansi (ANOVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik (Soejanto, 2009). Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi faktor. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor

atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (*Degrees of freedom, db*), jumlah kuadrat (*sum of square, SS*), kuadrat tengah (*mean of square, MS*) dan F_{hitung} seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tabel Analisis Variansi

Sumber variasi	Sum of square (SS)	Degrees of freedom (db)	Mean square (MS)	F_{Ratio} (F_0)
Variabel Proses A	$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$d_A - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{df A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Variabel Proses B	$SS_B = n_B \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$d_B - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{df B}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interaksi AB	$SS_{AB} = \sum_i i \sum_j j \frac{X_{ij}^2}{n_A} - \frac{T}{n_{AB}}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SSE = SS_T - SS_A - SS_B$	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{df E}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	$n - 1$		

Sumber: Ross, 2008 (lanjutan)

Keterangan:

- d_A = banyaknya level pada variabel proses A,
- d_B = banyaknya level pada variabel proses B,
- n_A = banyaknya replikasi level variabel proses A,
- n_B = banyaknya replikasi level variabel proses B,
- \bar{y} = rata-rata total
- n = jumlah pengamatan

b. Uji distribusi F

Uji distribusi F digunakan dengan tujuan untuk menunjukkan bukti adanya perbedaan pengaruh masing-masing faktor dalam eksperimen (Soejanto, 2009).

Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan variansi *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

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

H_1 : sedikitnya ada satu pasangan μ yang tidak sama

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

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.27)$$

maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah

Untuk taraf faktor A $\rightarrow H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$
 H_1 : paling sedikit ada satu τ

tidak sama dengan 0

Untuk taraf faktor B $\rightarrow H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$
 H_1 : paling sedikit ada satu

β tidak sama dengan 0

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

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

$$\text{Untuk taraf faktor B} \quad \rightarrow F_{\text{hitung}} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.29)$$

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

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

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

Bila menggunakan perangkat komputasi statistik, kegagalan menolak H_0 dilakukan jika $p\text{-value}$ lebih besar daripada α (taraf signifikansi). Kegagalan menolak H_0 juga dilakukan apabila nilai F_{hitung} lebih besar dari dua (Park, 1996).

c. Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu (Lin dan Lin, 2002):

1) Semakin kecil semakin baik

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

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.32)$$

2) Tertuju pada nilai tertentu

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

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

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

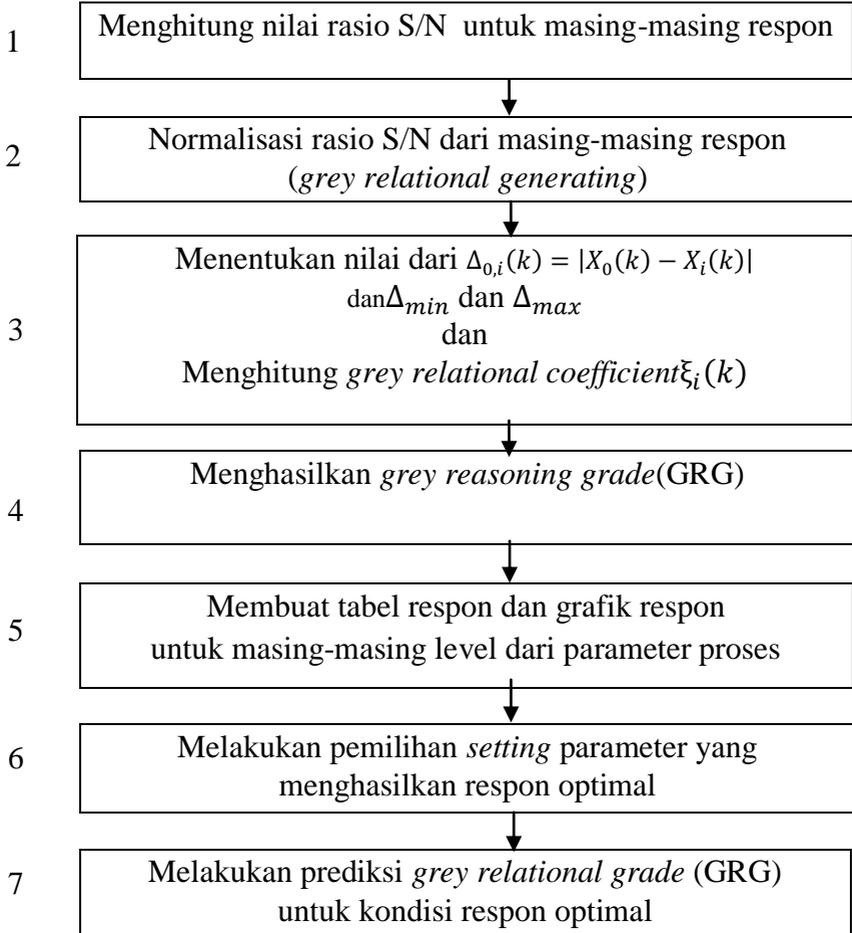
$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.34)$$

2.1.8 Metode GRA

Dalam metode Taguchi, optimasi hanya dapat dilakukan untuk satu respon saja. Untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi dan GRA.

Metode GRA diawali dengan teori *Grey System* yang dibuat oleh Dr. Julong Deng pada tahun 1982, yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan (Deng, 1989). GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey*. Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon.

Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode GRA dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Langkah-langkah proses optimasi

Rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menghitung Rasio S/N untuk Masing-Masing Respon.
Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik dari masing-masing respon
2. Normalisasi Data untuk Masing-Masing Respon
Tabel 2.5 menunjukkan penempatan nilai respon untuk proses normalisasi.

Tabel 2.5 Penempatan Rasio S/N

	Rasio S/N 1	Rasio S/N 2		Rasio S/N k
Kombinasi 1	$X_1(1)$	$X_1(2)$...	$X_1(k)$
Kombinasi 2	$X_2(1)$	$X_2(2)$...	$X_2(k)$
...
Kombinasi i	$X_i(1)$	$X_i(2)$...	$X_i(k)$

Cara yang digunakan untuk proses normalisasi tergantung dari karakteristik respon yang meliputi: lebih besar lebih baik (*larger is better*), lebih kecil lebih baik (*smaller is better*) dan tertuju pada nilai tertentu (*nominal is best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “lebih besar lebih baik” adalah (Datta dan Mahaputra, 2010):

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.35)$$

Proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “lebih kecil lebih baik” menggunakan persamaan sebagai berikut (Datta dan Mahaputra, 2010):

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.36)$$

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

$$X_i^*(k) = \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.37)$$

dengan:

$$\begin{aligned} \max_{\forall k} X_i(k) &= \text{nilai terbesar dari } X_i(k) \\ \min_{\forall k} X_i(k) &= \text{nilai terkecil dari } X_i(k) \\ X_{ob}(k) &= \text{nilai target dari } X_i(k) \end{aligned}$$

Pada penelitian ini, normalisasi dilakukan pada rasio S/N dimana rasio S/N memiliki karakteristik kualitas semakin besar semakin baik.

3. Menentukan *Deviation Sequence* $\Delta_{0,i}(k)$

Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih antara 1 dengan data yang telah dinormalisasi yang kemudian diabsolutkan. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dan Mahaputra, 2010):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_i(k) - X_i^*(k)| \quad (2.38)$$

4. Menentukan *Grey Relational Coefficient* $\xi_i(k)$

Grey relational coefficient menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. *Grey relational coefficient* akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah (Datta dan Mahaputra, 2010):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (2.39)$$

dengan:

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

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

$\zeta = \textit{distinguish coefficient}$.

Pada umumnya nilai *distinguish coefficient* diatur berdasarkan kebutuhan dan besarnya antara 0 dan 1. Nilai *distinguish coefficient* yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 (Tosun *et al.*, 2004). Nilai *grey relational coefficient* yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut.

5. Menentukan Kombinasi Parameter untuk Respon Optimal
Semakin besar nilai GRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi parameter tersebut. Penentuan kombinasi parameter terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tabel Respon *Grey Reasoning Grade*

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

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

6. Memprediksi Nilai GRG Hasil Optimalisasi

Nilai prediksi GRG berdasarkan kombinasi level parameter untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

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

Dengan:

γ_m = nilai rata-rata dari keseluruhan GRG

\bar{Y}_i = rata-rata GRG pada level optimal

o = jumlah parameter yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.1.9 Interpretasi Hasil Eksperimen

Interpretasi yang dilakukan pada hasil eksperimen dengan menggunakan desain eksperimen metode Taguchi, adalah:

1. Persen Kontribusi

Persen kontribusi digunakan untuk mengindikasikan kekuatan relatif sebuah faktor dan/atau interaksi untuk mengurangi variasi yang terjadi. Perhitungan persen kontribusi pada dasarnya adalah fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing faktor yang signifikan.

Komponen-komponen yang dihitung dalam persen kontribusi adalah faktor, interaksi faktor dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka berarti tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka ada faktor yang berpengaruh terabaikan, sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu faktor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Ross, 2008):

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

dengan:

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

dengan:

SS_A = jumlah kuadrat dari faktor yang dihitung persen kontribusinya

kontribusinya

SS_T = jumlah kuadrat total

ν_A = derajat kebebasan dari faktor yang dihitung persen kontribusinya

MS_E = rata-rata kuadrat dari faktor *error*

2. Interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% untuk kondisi optimum (Ross, 2008):

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha; \nu E} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.43)$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \hat{\mu}_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \quad (2.44)$$

dengan

$\hat{\mu}_{prediksi}$ = dugaan rata-rata GFRG pada kontribusi optimal

$$n_{eff} = \frac{n_{eff} = \text{banyaknya pengamatan efektif}}{\frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata}}} \quad (2.45)$$

2.1.10 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi merupakan langkah terakhir yang harus dilakukan pada penelitian tentang optimasi proses. Eksperimen ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level faktor-faktor hasil optimasi. Tujuan dari eksperimen konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisa.

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil respon secara aktual. Selain itu, eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membandingkan respon pada kondisi awal dengan respon setelah dilakukan proses optimalisasi. Langkah-langkah dalam eksperimen konfirmasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a. Menentukan kombinasi faktor dan level untuk menghasilkan respon optimum.
- b. Melakukan pengujian berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- c. Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.
- d. Membandingkan respon pada kondisi awal dan kondisi optimum yang telah dilakukan eksperimen konfirmasinya.

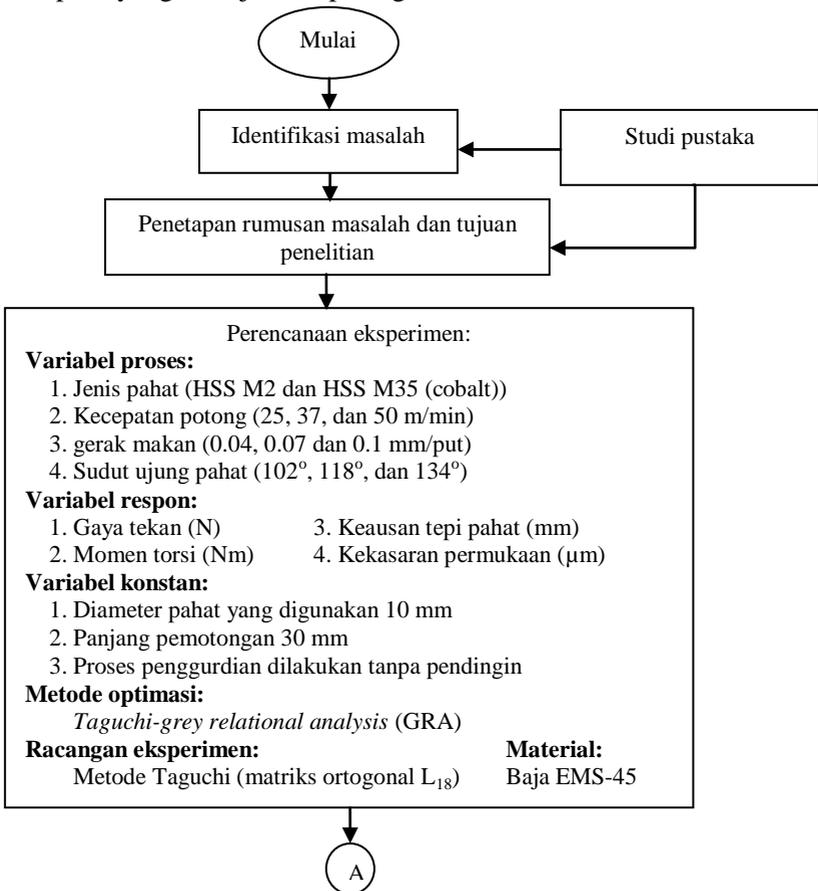
Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil apabila:

- a. Respon pada kondisi optimum mengalami peningkatan dibandingkan dengan kondisi awal sesuai dengan karakteristik kualitas dari respon tersebut.
- b. Rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.

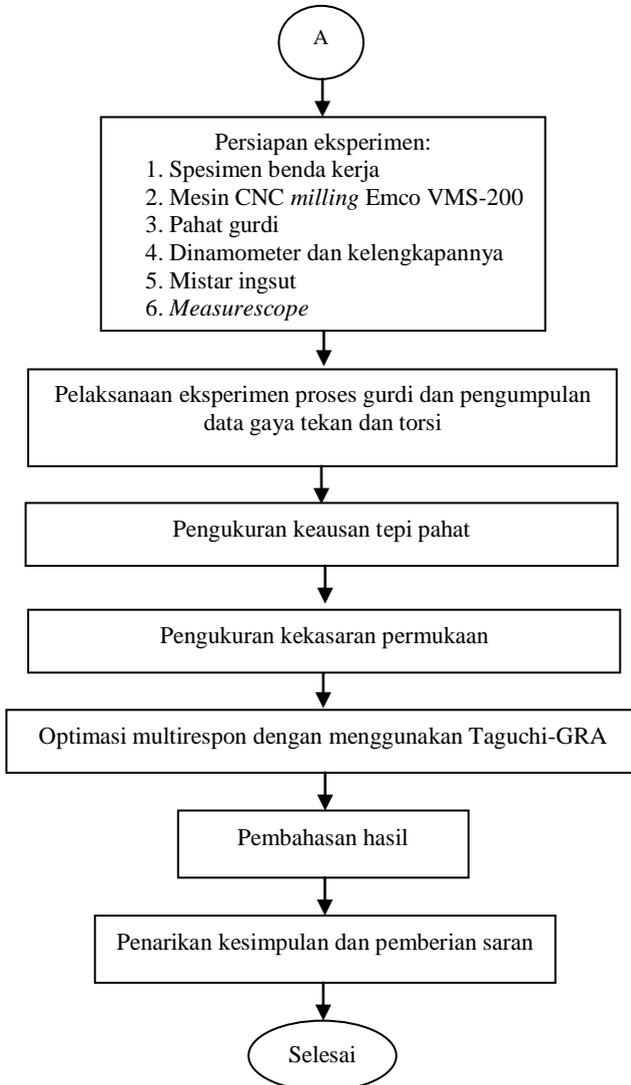
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penyelesaian permasalahan dalam penelitian ini disajikan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan)

3.2 Variabel Penelitian

Untuk mendapatkan data eksperimen pada proses gurdi material baja EMS-45, maka variabel-variabel yang akan digunakan untuk penelitian adalah:

1. Variabel proses

Variabel proses adalah variabel yang dapat dikendalikan dan besarnya dapat ditentukan sesuai dengan tujuan dari eksperimen yang bersangkutan. Pada penelitian ini variabel bebas yang dimaksud adalah:

- a. Jenis pahat (HSS M2 dan HSS M35 (cobalt))
- b. Kecepatan potong (25, 37 dan 50 m/menit)
- c. Gerak makan (0.04, 0.07 dan 0.1 mm/put)
- d. Sudut ujung pahat (102° , 118° , dan 134°)

2. Variabel Respon

Variabel respon adalah variabel yang besarnya tidak ditentukan, tetapi perlakuan yang diberikan dapat mempengaruhi variabel respon. Besar dari variabel respon pada penelitian ini dapat diketahui setelah serangkaian tahapan eksperimen selesai dilakukan. Pada penelitian ini variabel respon yang digunakan adalah:

- a. Gaya tekan (F, N)
- b. Momen torsi (T, Nm)
- c. Keausan tepi pahat (VB, μm)
- d. Kekasaran permukaan (R_{as} , μm)

3. Variabel Konstan

Variabel konstan adalah variabel yang tidak diteliti. Variabel ini terlibat dalam eksperimen, tetapi nilainya dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian. Variabel konstan dalam penelitian ini adalah:

- a. Diameter pahat (10 mm).
- b. Panjang pemotongan benda kerja (30 mm).

- c. Proses penggurdian dilakukan tanpa pendingin.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data respon yang nilainya akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Penelitian dilakukan di Laboratorium Proses Manufaktur Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.

3.3.1 Alat penelitian

Peralatan yang digunakan adalah:

1. Mesin CNC *milling* Emco VMS-200
Mesin yang digunakan adalah jenis mesin CNC *milling* Emco VMS-200. Mesin ini memiliki putaran mesin 5000 rpm dan kontrol emcotronik TM 02. Mesin ini memiliki 3 sumbu dimana masing-masing panjang sumbunya adalah sumbu X sebesar 420 mm, sumbu Y sebesar 330 mm dan sumbu Z sebesar 400 mm. Mesin ini ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Mesin CNC *milling* Emco VMS-200

2. Dinamometer
Dinamometer yang digunakan adalah dinamometer merek KISTLER tipe 9272. Pengukuran gaya potong dan torsi pahat (F_z dan M_t) dilakukan dengan menggunakan dinamometer yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Dinamometer tipe 9272

3. Alat akuisisi data tipe 5697A

Alat akuisisi data digunakan sebagai penghubung dari *charge amplifier* dan dinamometer ke *notebook*, sehingga data dapat ditampilkan pada *notebook*. Akuisisi data ditunjukkan pada Gambar 3.4, dan memiliki dimensi 208 mm x 70 mm x 249 mm serta massa seberat 2,15 kg.



Gambar 3.4 Akuisisi data tipe 5697A

4. *Charge amplifier* type 5070A

Charge amplifier digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran gaya tekan dan torsi yang terhubung dengan dinamometer. *Charge amplifier* ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Charge amplifier type 5070A

5. Compaq Presario CQ35-336TX
Notebook Compaq Presario digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* yang sudah memiliki perangkat lunak DynoWare dari KISTLER yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



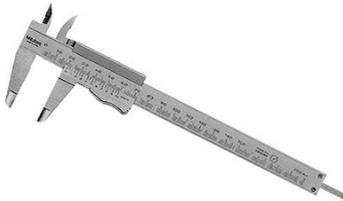
Gambar 3.6 Compaq presario CQ35-336TX

6. *Measureoscope*
Pengukuran keausan tepi pahat pada penelitian ini dilakukan dengan Nikon *measurescope* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.7. Alat ukur ini memiliki kecermatan 1 μm .



Gambar 3.7 Nikon *measurescope*

7. Mistar insut
Mistar insut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji yang memiliki kecermatan 0,05 mm. Mistar insut ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Mistar insut

8. *Drillholder*
Pengukuran keausan tepi pahat memerlukan *drillholder* untuk mencekam pahat gurdi dan memposisikan bidang tepi pahat (*flank*) sejajar dengan meja *measurescope*. *Drill holder* ditunjukkan pada Gambar 3.9 dan terdiri dari dua bagian, yaitu *holder* dan *stand holder*. *Holder* digunakan untuk mencekam pahat gurdi berdiameter maksimum 14 mm dan memposisikan bidang tepi pahat sejajar dengan meja *measurescope*. *Stand holder* digunakan sebagai

pemegang *holder*. Bidang tepi pahat harus tegak lurus terhadap *stand holder* supaya bidang tepi pahat sejajar dengan meja *measurescope*, dan keausan tepi pahat pada sepanjang bidang tepi pahat dapat terlihat secara jelas pada *measurescope*.



Gambar 3.9 *Drillholder* untuk mencekam pahat

9. Mitutoyo *surftest* SJ-310

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada lubang hasil proses penggurdian dengan menggunakan Mitutoyo *surftest* SJ-310. Gambar 3.10 menunjukkan peralatan pengukuran kekasaran permukaan yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.10 Mitutoyo *surftest* SJ-310

10. *Precision drill grinder*

Precision drill grinder digunakan untuk mengasah dan membentuk sudut ujung pahat gurdi. *Precision drill grinder* ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 *Precision drill grinder*

3.3.2 **Bahan Penelitian**

Bahan yang diperlukan antara lain:

1. Pahat gurdi

Pahat gurdi yang digunakan terbuat dari material *High Speed Steel* (HSS). Pahat yang digunakan berjenis *twist drill* dengan standar HSS M2 dan HSS M35 (cobalt) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12. Detail geometri pahat ini adalah:

a. HSS M2

Spesifikasi pahat gurdi ini sebagai berikut:

Merek dagang = SUN FLOWER

Modifikasi = DIN 338

Kekerasan = 845 VHN

Diameter = 10 mm

Sudut puntir = 28°

Jumlah alur/*flute* = 2 buah

b. HSS M35 (cobalt)

Spesifikasi pahat gundi ini sebagai berikut:

Merek dagang = SUN FLOWER

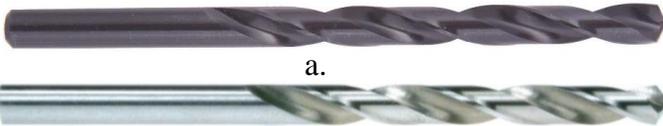
Modifikasi = DIN 338

Kekerasan = 900 VHN

Diameter = 10 mm

Sudut puntir = 29°

Jumlah alur/*flute* = 2 buah



Gambar 3.12 a.) Pahat HSS M2 b.) Pahat HSS M35 (cobalt)

2. Benda kerja

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja EMS-45 dengan spesifikasi dan komposisi kimia sebagai berikut (Syamsul dkk.2013:

Dimensi = 250 x 25 x 20 mm

Kekerasan = 29 HRC

Kekuatan Tarik = 96 kg/mm^2

C = 0.47%

Si = 0.28%

Mn = 0.77%

P = 0.01%

S = 0.07%

Cr = 0.03%

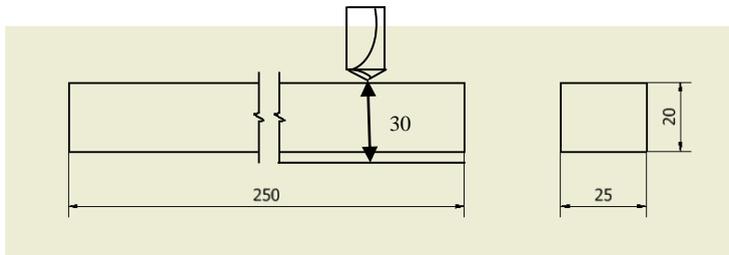
Ni = 0.01%

Cu = 0.02%

Benda kerja ini ditunjukkan pada Gambar 3.13



Gambar 3.13 Baja EMS-45



Gambar 3.14 Dimensi benda kerja

3.4 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan rancangan eksperimen metode Taguchi. Derajat kebebasan pada matriks ortogonal harus bernilai sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan variabel proses dan level yang telah ditetapkan. Berdasarkan banyaknya variabel proses dan jumlah level yang digunakan pada penelitian, dilakukan perhitungan derajat kebebasan untuk menentukan matriks ortogonal yang digunakan. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Total derajat kebebasan variabel proses dan levelnya

No	Variabel proses	Jumlah level (k)	$v_{fi} (k-1)$
1	Jenis pahat	2	1
2	Kecepatan potong (m/menit)	3	2
3	Gerak makan (mm/put)	3	2
4	Sudut ujung pahat °(derajat)	3	2
Total derajat kebebasan			7

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3.1 didapatkan 7 derajat kebebasan untuk rancangan eksperimen ini. Terdapat tiga variabel proses yang memiliki tiga level dan satu variabel proses yang memiliki dua level seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1, sehingga matriks ortogonal yang digunakan adalah L18 ($2^1 \times 3^3$). Rancangan percobaan L₁₈ memiliki 4 kolom dan 18 baris. Rancangan percobaan untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rancangan percobaan Taguchi

Kombinasi ke-	Variabel proses			
	Jenis pahat	Sudut ujung pahat	Gerak makan	Kecepatan Potong
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tabel 3.3 Variabel proses dan levelnya

Variabel proses	Unit	Level		
		1	2	3
Jenis pahat	-	HSS M2	HSS M35 (cobalt)	-
Kecepatan potong	meter/menit	25	37	50
gerak makan	mm/put	0.04	0.07	0.1
Sudut ujung pahat	°(derajat)	102	118	134

Keterangan:

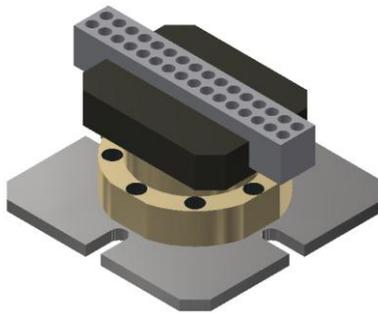
R1: replikasi 1

R2: replikasi 2

3.5 Prosedur Percobaan

Langkah-langkah percobaan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

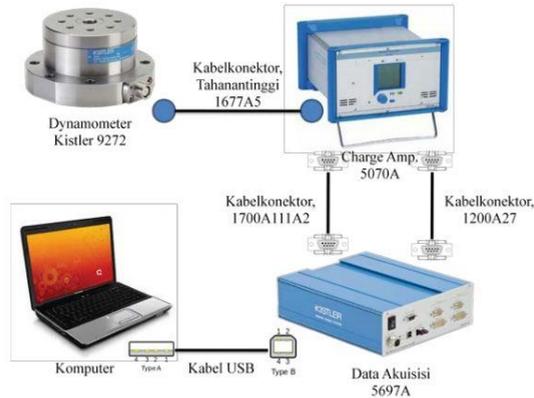
1. Tanda diberikan pada spesimen sebagai titik pusat lubang saat proses pengurdian berlangsung.
2. Dinamometer dipasang pada bantalan mesin CNC *milling* dengan menggunakan mur dan baut.
3. Spesimen dipasang pada dinamometer seperti ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Pemasangan benda kerja pada dinamometer

4. Pahat gurdi berdiameter 10 mm dipasang pada *chuck* mesin gurdi.
5. Dinamometer dihubungkan dengan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A menggunakan kabel koneksi *type* KISTLER 16775A.
6. *Charge amplifier* KISTLER *type* 5070A dihubungkan dengan DAQ KISTLER *type* 5697A menggunakan kabel koneksi 1700A111A2 dan 1200A27.
7. Sistem DAQ KISTLER *type* 5697A dihubungkan dengan *notebook* menggunakan kabel USB.

8. *Charge amplifier* KISTLER *type* 5070A dan sistem DAQ KISTLER *type* 5697A dihubungkan ke sumber listrik dengan kabel power listrik. Gambar 3.16 menunjukkan pemasangan instrumentasi dinamometer.



Gambar 3.16 Pemasangan instrumentasi dinamometer

9. Dilakukan pengaturan variabel proses gurdi yang meliputi pengaturan kecepatan potong dan gerak makan pada mesin CNC *tapping center*.
10. Mesin CNC *milling* dinyalakan.
11. Proses penggurdian dilakukan berdasarkan kombinasi yang telah ditentukan.
12. Dilakukan proses pengambilan data berupa gaya tekan dan momen torsi selama proses penggurdian berlangsung.
13. Data grafik yang didapat dari dinamometer disimpan untuk kemudian diolah.
14. Dilakukan pengasahan dan pembentukan sudut pahat dengan menggunakan mesin *Precision drill ginder* pada pahat yang telah digunakan pada replikasi pertama.
15. Melakukan prosedur percobaan diatas pada 18 kombinasi beserta replikasinya.

16. Melepas spesimen penelitian dari dinamometer.
17. Mengukur keausan pahat menggunakan *measurescope*.
18. Mengukur kekasaran permukaan lubang hasil penggurdian dengan menggunakan peralatan Mitutoyo *surf test* SJ 310.
19. Melakukan analisa data yang telah didapat dari masing-masing eksperimen.
20. Membuat kesimpulan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN ANALISA DATA

4.1 Data Hasil Pengukuran

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel-variabel proses gurdi pada material baja EMS-45, yang memiliki pengaruh terhadap gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan. Variabel-variabel proses tersebut adalah jenis pahat, kecepatan potong, gerak makan dan sudut ujung pahat.

Pengambilan data yang dilakukan pertama kali adalah pengambilan data berupa gaya tekan dan torsi yang diukur dengan menggunakan dinamometer KISTLER tipe 9272. Selanjutnya dilakukan pengambilan data pengukuran keausan tepi pahat dengan menggunakan *measurescope* dan terakhir yang diambil adalah data kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo *surf-test* SJ-310. Pengambilan data dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk setiap kombinasi variabel proses. Hasil eksperimen berupa gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen

Kombinasi ke	Gaya tekan (N)		Rata-rata	Torsi (Nm)		Rata-rata	Keausan tepi pahat (μm)		Rata-rata	Kekasaran permukaan (μm)		Rata-rata
	R1	R2		R1	R2		R1	R2		R1	R2	
1	686.6	621.5	654.05	2.21	2.4	2.305	0.0275	0.0273	0.0274	3.24	3.23	3.235
2	1226	1234	1230	2.71	2.61	2.66	0.0855	0.0979	0.0917	6.19	6.2	6.195
3	1871	1734	1802.5	5.01	5.21	5.11	0.135667	0.112	0.123833	8.86	8.88	8.87
4	1003	1021	1012	2.31	2.304	2.309	0.040167	0.0468	0.043483	4.06	4.07	4.065
5	1165	1177	1171	3.84	3.834	3.839	0.0555	0.0664	0.06095	4.58	4.57	4.575
6	2656	2566	2611	4.08	4.095	4.0885	0.0695	0.0748	0.07215	9.84	9.86	9.85
7	1167	1157	1162	2.39	2.08	2.235	0.0325	0.0333	0.0329	6.945	6.1	6.5225
8	2523	2546	2534.5	3.59	3.571	3.581	0.0415	0.0523	0.0469	9.755	9.84	9.7975
9	2887	2847	2867	2.81	2.8	2.8065	0.023167	0.037833	0.0305	7.22	7.475	7.3475
10	680.7	726.9	703.8	3.65	3.623	3.6385	0.072833	0.051	0.061917	3.91	3	3.455
11	934.1	1016	975.05	2.72	2.71	2.7155	0.070167	0.062	0.066083	4.42	4.845	4.6325
12	1390	1451	1420.5	3.07	3.054	3.0595	0.088667	0.107167	0.097917	6.54	6.69	6.615
13	756	731.4	743.7	3.7	3.57	3.635	0.033	0.037167	0.035083	5.825	5.53	5.6775
14	1411	1652	1531.5	4.4	4.386	4.391	0.067333	0.071167	0.06925	7.6	7.585	7.5925
15	1810	1743	1776.5	3.99	3.987	3.989	0.055167	0.069667	0.062417	7.88	7.9	7.89
16	1280	1298	1289	4.64	4.621	4.63	0.034167	0.0465	0.040333	6.145	6.125	6.135
17	1390	1386	1388	3.77	3.723	3.748	0.029833	0.0331	0.031467	6.52	6.54	6.53
18	2414	2304	2359	4.09	4.065	4.078	0.062833	0.0732	0.068017	9.19	9.2	9.195

Sumber: Hasil pengukuran

Berdasarkan Tabel 4.1, gaya tekan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 9 dan besarnya adalah 2867 N, sedangkan gaya tekan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 1 dan besarnya adalah 654,05 N. Torsi terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 3 dan besarnya adalah 5.11 Nm, sedangkan torsi terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 7 dan besarnya adalah 2.235 Nm. Keausan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 3 dan besarnya adalah 0.123833 μm , sedangkan keausan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 1 yang besarnya adalah 0.0274 μm . Kekasaran permukaan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 6 dan besarnya adalah 9.85 μm , sedangkan kekasaran permukaan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 1 dan besarnya adalah 3.235 μm .

4.2 Optimasi Multirespon Taguchi-GRA

4.2.1 Penghitungan Rasio S/N

Penghitungan nilai rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon. Respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan memiliki kesamaan karakteristik kualitas, yaitu semakin kecil semakin baik (*smaller is better*) dan rasio S/N tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.32. Contoh penghitungan rasio S/N dari gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

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

$$S/N = -10 \log \frac{(686.6^2) + (621.5^2)}{2}$$

$$S/N = -56.323$$

Penghitungan nilai rasio S/N masing-masing respon pada setiap kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rasio S/N pada Masing-Masing Respon

No	SNR			
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
1	-56.323	-7.26079	31.24493	-10.19749607
2	-61.7981	-8.49917	20.73281	-15.84082904
3	-65.1238	-14.1701	18.10377	-18.95847792
4	-60.104	-7.2685	27.20835	-12.18121757
5	-61.3713	-11.6844	24.26594	-13.20782716
6	-68.3374	-12.2313	22.82942	-19.86872909
7	-61.3042	-7.00639	29.65544	-16.3064662
8	-68.0779	-11.0801	26.51935	-19.82238716
9	-69.1488	-8.96332	30.06993	-17.32409945
10	-56.9537	-11.2185	24.0309	-10.84363547
11	-59.7882	-8.67701	23.58161	-13.32543738
12	-63.0508	-9.71302	20.14428	-16.41115521
13	-57.4291	-11.2115	29.0827	-15.08607313
14	-63.7291	-12.8513	23.18828	-17.60770025
15	-64.9928	-12.0173	24.03579	-17.94154704
16	-62.2053	-13.3116	27.78636	-15.75630288
17	-62.8478	-11.4762	30.0313	-16.29827381
18	-67.4569	-12.209	23.32256	-19.27103596

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.2 Normalisasi Rasio S/N

Proses normalisasi rasio S/N adalah proses untuk mengubah nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1 agar nilai normalisasi tidak memiliki dimensi dan digunakan untuk menyamakan satuan pada respon. Proses normalisasi dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respon. Karakteristik kualitas dari respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*). Contoh penghitungan normalisasi rasio S/N gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama, adalah:

1. Penentuan nilai maksimum dan minimum dari rasio S/N
 Nilai maksimum rasio S/N gaya tekan (F_z) = -56.323
 Nilai minimum rasio S/N gaya tekan (F_z) = -69.1488
2. Penghitungan normalisasi rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.36, adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{\max_k X_i(k) - X_i(k)}{\max_k X_i(k) - \min_k X_i(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, 9, \quad k = 1, 2, 3.$$

$$X_i^*(1) = \frac{-56.323 - (-56.323)}{-56.323 - (-69.1488)}$$

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

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N masing-masing respon untuk setiap kombinasi variabel proses dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Normalisasi Rasio S/N pada Masing-Masing Respon

No	Normalisasi			
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
1	0	0.035513	0	0
2	0.426888	0.208381	0.799939	0.583517423
3	0.68618	1	1	0.905880546
4	0.294796	0.036589	0.307171	0.205115676
5	0.393604	0.653013	0.531079	0.311266524
6	0.936742	0.729359	0.640393	1
7	0.388377	0	0.120955	0.631664041
8	0.91651	0.568664	0.359602	0.995208271
9	1	0.273174	0.089414	0.736886741
10	0.049174	0.587984	0.548965	0.066810446
11	0.270176	0.233207	0.583154	0.323427355
12	0.524557	0.377827	0.844724	0.642488825
13	0.086247	0.587	0.164539	0.50547609
14	0.577444	0.815904	0.613085	0.766210903
15	0.675972	0.699485	0.548593	0.800730471
16	0.458631	0.880167	0.263186	0.574777466
17	0.508727	0.623951	0.092353	0.630816953
18	0.86809	0.726246	0.602867	0.93819887

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.3 Perhitungan Deviation Sequence $\Delta_{0,i}(k)$

Deviation sequence adalah selisih secara absolute antara 1 dengan data yang telah dinormalisasi. Sebelum penghitungan nilai GRC dilakukan, nilai *deviation sequence* dari masing-masing respon dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.37. Contoh penghitungan *deviation sequence* gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

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

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

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

Hasil penghitungan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon untuk setiap kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 *Deviation Sequence* pada Masing-Masing Respon

No	<i>Deviation Sequence</i>			
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
1	1	0.964487	1	1
2	0.573112	0.791619	0.200061	0.4164826
3	0.31382	0	0	0.0941195
4	0.705204	0.963411	0.692829	0.7948843
5	0.606396	0.346987	0.468921	0.6887335
6	0.063258	0.270641	0.359607	0
7	0.611623	1	0.879045	0.368336
8	0.08349	0.431336	0.640398	0.0047917
9	0	0.726826	0.910586	0.2631133
10	0.950826	0.412016	0.451035	0.9331896
11	0.729824	0.766793	0.416846	0.6765726
12	0.475443	0.622173	0.155276	0.3575112
13	0.913753	0.413	0.835461	0.4945239
14	0.422556	0.184096	0.386915	0.2337891
15	0.324028	0.300515	0.451407	0.1992695
16	0.541369	0.119833	0.736814	0.4252225
17	0.491273	0.376049	0.907647	0.369183
18	0.13191	0.273754	0.397133	0.0618011

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.4 Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dan Grey Relational Grade (GRG)

Setelah melakukan perhitungan *deviation sequence*, langkah selanjutnya adalah melakukan penghitungan GRC dengan menggunakan persamaan 2.39 yang didasarkan pada nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$. Untuk penghitungan GRG dilakukan dengan menjumlah masing-masing respon yang terlebih dahulu telah dikalikan dengan masing-masing bobot pada tiap respon. Contoh penghitungan GRC gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

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

$$\xi_i(1) = \frac{0 + (0,5 \times 1)}{1 + (0,5 \times 1)}$$

$$\xi_i(1) = 0.3333$$

Hasil penghitungan GRC dan GRG masing-masing respon untuk setiap kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 GRC dan GRG pada Masing-Masing Respon

No	<i>GRC</i>				<i>GRG</i>
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan	
1	0.333333	0.341416	0.333333	0.333333	0.335637
2	0.465935	0.387111	0.714223	0.545564	0.475902
3	0.614387	1	1	0.841582	0.777761
4	0.414867	0.341667	0.419171	0.386135	0.393664
5	0.451918	0.590328	0.516038	0.420616	0.498184
6	0.887692	0.64881	0.581661	1	0.78595
7	0.449793	0.333333	0.36257	0.575814	0.409828
8	0.856912	0.536863	0.438443	0.990508	0.719071
9	1	0.407556	0.354463	0.655211	0.7427
10	0.344631	0.548236	0.525743	0.348872	0.4247
11	0.406562	0.394698	0.545348	0.424963	0.420526
12	0.512588	0.445564	0.763037	0.583083	0.525905
13	0.353668	0.547645	0.374403	0.502753	0.415933
14	0.541972	0.730892	0.563752	0.681395	0.602632
15	0.606776	0.624598	0.525537	0.715032	0.605273
16	0.480137	0.806669	0.404264	0.540411	0.565826
17	0.504402	0.570745	0.355203	0.575253	0.507382
18	0.791252	0.6462	0.557331	0.889995	0.72457

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.5 Kombinasi Variabel proses untuk Respon Optimal

Penghitungan nilai rata-rata GRG digunakan untuk menentukan kombinasi level dari variabel proses. Kombinasi level dari variabel proses dapat mengoptimalkan respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan.

Contoh penghitungan nilai rata-rata dari GRG untuk variabel proses sudut ujung pahat pada level 1 adalah:

$$\bar{\eta}_{V1} = \frac{0.335637+0.475902+0.777761+0.393664+0.498184+0.78595+0.409828+0.719071+0.7427}{9}$$

$$\bar{\eta}_{V1} = 0.570967$$

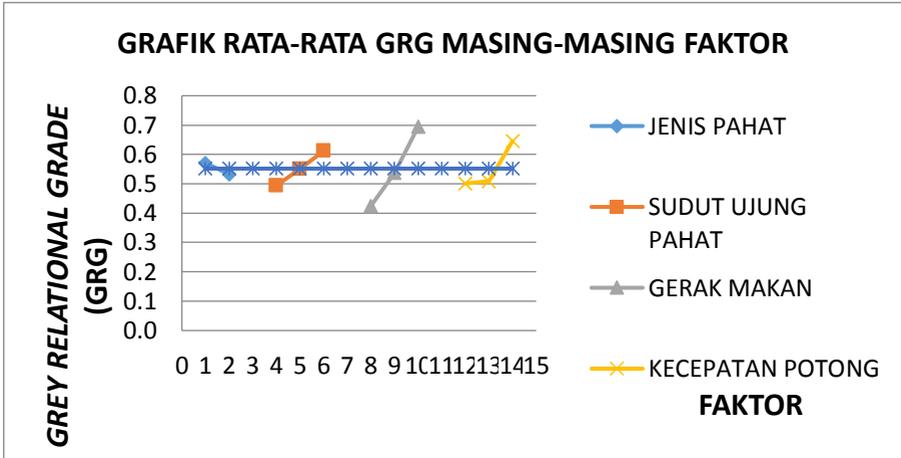
Penghitungan nilai rata-rata GRG dilakukan pada setiap level dari kombinasi variabel proses. Tabel 4.6 menunjukkan hasil penghitungan nilai rata-rata GRG dan berfungsi untuk memudahkan penentuan kombinasi variabel proses yang terbaik.

Tabel 4.6 Nilai Rata-Rata GRG pada Masing-Masing Level Variabel Proses

	Jenis pahat	Sudut ujung pahat	Gerak makan	Kecepatan potong
1	0.570967	0.493405	0.424265	0.500864
2	0.532528	0.550273	0.537283	0.508387
3		0.611563	0.693693	0.64599
rata-rata	0.55174706			
max	0.570967	0.611563	0.693693	0.64599

Sumber: Hasil penghitungan

Grafik yang digunakan untuk menunjukkan nilai rata-rata GRG pada masing-masing level dari variabel proses yaitu jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik nilai rata-rata GRG pada masing-masing level variabel proses

Berdasarkan nilai rata-rata GRG dari Tabel 4.6 dan grafik dari Gambar 4.1 pada masing-masing level dari variabel proses, nilai level pada kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon yang optimum dapat ditentukan. Kombinasi variabel proses tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.7. Penentuan kombinasi variabel proses yang optimum didasarkan pada nilai rata-rata GRG yang memiliki nilai rata-rata terbesar dari setiap variabel proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Tabel 4.7 Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimal

variabel proses	Tingkat level	Nilai level
Jenis pahat	1	HSS
Sudut ujung pahat	3	134
Gerak makan	3	0.1
Kecepatan potong	3	50

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.6 Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan pada variabel proses yang memiliki level lebih dari dua untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon, serta menunjukkan besarnya kontribusi variabel proses terhadap respon. Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada GRG yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon.

Penghitungan jumlah kuadrat total pada analisis variansi GRG dilakukan dengan menggunakan persamaan seperti tabel 2.4 yang dijabarkan sebagai berikut:

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

$$SS_T = (0.335637 - 0.55174706)^2 + (0.475902 - 0.55174706)^2 + (0.777761 - 0.55174706)^2 + (0.393664 - 0.55174706)^2 + (0.498184 - 0.55174706)^2 + (0.78595 - 0.55174706)^2 + (0.409828 - 0.55174706)^2 + (0.719071 - 0.55174706)^2 + (0.7427 - 0.55174706)^2 + (0.4247 - 0.55174706)^2 + (0.420526 - 0.55174706)^2 + (0.525905 - 0.55174706)^2 + (0.4159933 - 0.55174706)^2 + (0.602632 - 0.55174706)^2 + (0.605273 - 0.55174706)^2 + (0.565826 - 0.55174706)^2 + (0.507382 - 0.55174706)^2 + (0.72457 - 0.55174706)^2$$

$$SS_T = 0.360812$$

Contoh penghitungan untuk jumlah kuadrat total variabel proses sudut ujung pahat dengan menggunakan persamaan pada tabel 2.4 adalah sebagai berikut:

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

$$SS_{PA} = 6 \times [(0.493405 - 0.55174706)^2 + (0.550273 - 0.55174706)^2 + (0.611563 - 0.55174706)^2]$$

$$SS_{PA} = 0.041903$$

Contoh penghitungan rata-rata kuadrat untuk variabel sudut ujung pahat berdasarkan persamaan pada tabel 2.4 adalah sebagai berikut:

$$MS_{PA} = \frac{SS_{PA}}{df_{PA}} = \frac{0.041903}{2} = 0.020952$$

Tabel analisis variansi yang berdasarkan pada hasil penghitungan GRG ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 ANAVA untuk GRG

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P-value
JP	1	0.006649	0.006649	5.32	0.044
PA	2	0.041903	0.020952	16.77	0.001
f	2	0.219658	0.109829	87.89	0
v	2	0.080106	0.040053	32.05	0
Error	10	0.012496	0.00125		
Total	17	0.360812			

Sumber: Perhitungan menggunakan program Minitab 16

Variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon dapat diuji dengan menggunakan uji distribusi F. Variabel proses jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong dipilih secara *fixed*, sehingga pengujian hipotesis yang digunakan adalah:

1. Variabel proses jenis pahat (JP)

$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = 0$ (variabel proses jenis pahat (JP) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\alpha_i \neq 0$, $i = 1, 2, \dots, a$ (variabel proses jenis pahat (JP) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 5.32$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_{JP}, v_E} = F_{0,05,1,10} = 4.96$, sehingga H_0 ditolak. Karena $F_{hitung} > F_{tabel}$. Maka dapat disimpulkan bahwa variabel jenis pahat (TM) memiliki pengaruh terhadap GRG.

2. Variabel proses sudut ujung pahat (PA)

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (variabel proses sudut ujung pahat (PA) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\beta_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots$, a (variabel proses sudut ujung pahat (PA) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 16.77$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_{PA}, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4.10$, sehingga H_0 ditolak. Karena $F_{hitung} > F_{tabel}$. Maka dapat disimpulkan bahwa variabel sudut ujung pahat (PA) memiliki pengaruh terhadap GRG.

3. Variabel proses gerak makan (f)

H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ (variabel proses gerak makan (f) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\tau_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots$, a (variabel proses gerak makan (f) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 87.89$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_f, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4.10$, sehingga H_0 ditolak. Karena $F_{hitung} > F_{tabel}$. Maka dapat disimpulkan bahwa variabel gerak makan (f) memiliki pengaruh terhadap GRG.

4. Variabel proses kecepatan potong (v)

H_0 : $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$ (variabel proses kecepatan potong (v) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\gamma_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots$, a (variabel proses kecepatan potong (v) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 32.05$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_v, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4.10$, sehingga H_0 ditolak. Karena $F_{hitung} > F_{tabel}$. Maka dapat disimpulkan bahwa variabel kecepatan potong (v) memiliki pengaruh terhadap GRG.

Dari ANAVA untuk GRG dapat disimpulkan bahwa jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRG.

Persen kontribusi mengindikasikan kekuatan relatif/porsi dari masing-masing variabel proses dalam mengurangi variansi total repon yang diamati. Jika besar persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besarnya persen kontribusi

error lebih dari lima belas persen, maka hal tersebut mengindikasikan adanya variabel proses yang berpengaruh terabaikan.

Persen kontribusi dihitung dengan menggunakan persamaan 2.41 dan 2.42. Penghitungan persen kontribusi dilakukan dari hasil analisis variansi yang ditunjukkan pada Tabel 4.8. Hasil penghitungan persen kontribusi ditunjukkan pada tabel 4.9. Contoh penghitungan persen kontribusi pada variabel proses sudut ujung pahat (PA) adalah:

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

$$SS'_{PA} = 0.041903 - (2 \times 0.00125)$$

$$SS'_{PA} = 0.039403$$

sehingga

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

$$\rho_{PA} = \frac{0.039403}{0.360812} \times 100\%$$

$$\rho_{PA} = 10.92\%$$

Tabel 4.9 ANAVA dan Persen Kontribusi untuk GRG

<i>Source</i>	DF	Seq SS	<i>Adj MS</i>	F	P	% Kontribusi
JP	1	0.006649	0.006649	5.32	0.044	1.5%
PA	2	0.041903	0.020952	16.77	0.001	10.92%
f	2	0.219658	0.109829	87.89	0	60.19%
v	2	0.080106	0.040053	32.05	0	21.51%
Error	10	0.012496	0.00125			5.89%
Total	17	0.360812				100%

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil penghitungan persen kontribusi menunjukkan bahwa variabel proses jenis pahat (JP) memberikan kontribusi sebesar 1.5% untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati secara serentak, diikuti oleh variabel proses sudut ujung

pahat (PA) sebesar 10.92%, variabel proses kecepatan potong (v) sebesar 21.51% dan variabel proses gerak makan (f) sebesar 60.19%.

4.2.7 Prediksi Multi Respon Optimal dan Interval Keyakinan

Hasil penghitungan rata-rata GRG menunjukkan kombinasi variabel proses untuk respon yang optimum, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7. Hasil penghitungan rata-rata GRG dapat digunakan untuk memprediksi nilai GRG yang optimal. Kombinasi dari masing-masing variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap GRG yang optimal adalah:

1. Variabel proses jenis pahat (JP) pada level 1
2. Variabel proses sudut ujung pahat (PA) pada level 3
3. Variabel proses gerak makan (f) pada level 3
4. Variabel proses kecepatan potong (v) pada level 3

Penghitungan prediksi nilai GRG dengan menggunakan persamaan 2.40 dijabarkan sebagai berikut:

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

$$\begin{aligned} \hat{\gamma} &= 0.55174706 + (0.570967 - 0.55174706) \\ &\quad + (0.611563 - 0.55174706) \\ &\quad + (0.693693 - 0.55174706) \\ &\quad + (0.64599 - 0.55174706) \end{aligned}$$

$$\hat{\gamma} = 0.86697182$$

Dengan demikian, nilai GRG yang dihitung untuk menghasilkan respon yang optimum dari kombinasi variabel proses adalah 0.86697182.

Penghitungan banyaknya pengamatan efektif (n_{eff}) dilakukan terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.45, kemudian penghitungan interval keyakinan untuk kondisi

optimum dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.43 dan 2.44. Penghitungan n_{eff} adalah sebagai berikut:

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

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

$$n_{\text{eff}} = 4.5$$

Penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum memerlukan nilai F dan MS_E . Nilai F adalah $F_{(0.05;1;10)} = 4.96$ dan nilai MS_E berdasarkan pada Tabel 4.8 yaitu 0.00125. Penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum adalah sebagai berikut:

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

$$CI_1 = \sqrt{\frac{4.96 \times 0.00125}{4.5}}$$

$$CI_1 = \pm 0.03712$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata GRG pada kombinasi yang optimal (GRG prediksi) adalah 0.86697 ± 0.03712 atau $0.82985 \leq GRG_{\text{prediksi}} \leq 0.90409$.

4.2.8 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi bertujuan untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh. Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi variabel proses yang dihasilkan dari hasil optimasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7. Hal tersebut dilakukan untuk membandingkan interval keyakinan rata-rata GRG prediksi dengan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi. Eksperimen konfirmasi dilakukan sebanyak tiga kali untuk respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan. Hasil eksperimen konfirmasi dari masing-masing respon dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi pada Masing-masing Respon

No	Kombinasi variabel proses				Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
	JP	PA	f	v				
1	1	3	3	3	2463	4.484	0.0994	9.515
2	1	3	3	3	2742	4.975	0.085	7.955
3	1	3	3	3	2866	5.035	0.081833	8.905

Sumber: Hasil pengukuran

Penghitungan rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.32 yang didasarkan pada nilai-nilai respon yang didapatkan dari eksperimen konfirmasi. Hasil perhitungan rasio S/N dari masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi

No	SNR			
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
1	-68.5961219	-13.6813	21.03718	-18.8814

Sumber: Hasil penghitungan

Normalisasi dilakukan pada rasio S/N dari masing-masing respon dengan menggunakan persamaan 2.36. Hasil penghitungan proses normalisasi ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi

No	Normalisasi			
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
1	0.956912	0.931775	0.776777	0.897913243

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.37 yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 *Deviation sequence* Eksperimen Konfirmasi

No	Deviation Sequence			
	Gaya Tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
1	0.043088	0.068225	0.223223	0.102086757

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan GRG dilakukan pada langkah akhir yang sebelumnya didahului dengan perhitungan GRC menggunakan persamaan 2.39. Tabel 4.14 menunjukkan nilai GRC dan GRG hasil dari eksperimen konfirmasi. Nilai GRG didapatkan dari penghitungan rata-rata nilai GRC pada respon.

Tabel 4.14 GRG Eksperimen Konfirmasi pada Kombinasi Optimum

No	GRC				GRG
	Gaya tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan	
1	0.92066	0.879934	0.69135	0.8304451	0.830597

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan banyaknya pengamatan efektif dilakukan terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.69. Perhitungan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.67 dan 2.68. Penghitungan banyaknya pengamatan efektif adalah sebagai berikut:

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

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

$$n_{\text{eff}} = 4.5$$

Penghitungan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi memerlukan nilai F, MS_E , dan r. Nilai F adalah $F_{(0.05;1;10)} = 4.96$, nilai MS_E berdasarkan pada ANAVA GRG dari Tabel 4.8 dan nilai r adalah jumlah pengulangan yang dilakukan pada eksperimen konfirmasi. Penghitungan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi dijabarkan sebagai berikut:

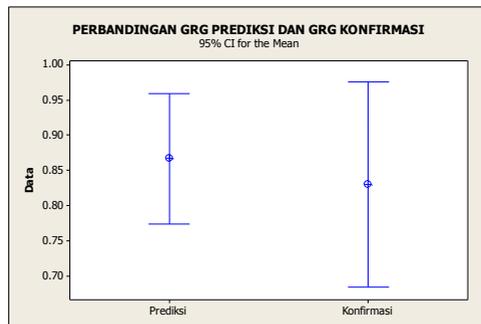
$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;vE} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_2 = \sqrt{4.96 \times 0.00125 \times \left[\frac{1}{4.5} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_2 = \pm 0.06$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata GRG eksperimen konfirmasi adalah 0.830597 ± 0.06 atau $0.7719 \leq GRG_{\text{konfirmasi}} \leq 0.8893$.

Interval keyakinan 95% rata-rata GRG optimasi dengan interval keyakinan 95% rata-rata GRG eksperimen konfirmasi diplotkan secara bersamaan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Plot Interval keyakinan hasil optimasi dan eksperimen konfirmasi

Berdasarkan Gambar 4.2, hasil plot antara interval keyakinan dari rata-rata prediksi dengan interval keyakinan dari rata-rata eksperimen konfirmasi menunjukkan bahwa nilai rata-rata eksperimen konfirmasi berada didalam interval nilai prediksi. Selain itu interval keyakinan nilai rata-rata eksperimen konfirmasi lebih lebar daripada interval keyakinan nilai rata-rata prediksi karena eksperimen konfirmasi memiliki jumlah sampel yang sedikit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi level variabel proses pada kondisi optimum yang telah didapat valid.

4.2.9 Pengaruh Variabel proses yang Signifikan Terhadap GRG

Analisis variansi pada tabel 4.9 menunjukkan bahwa variabel proses jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRG yang mewakili respon gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan. Hasil penghitungan persen kontribusi menunjukkan bahwa jenis pahat memberikan persen kontribusi terhadap variansi total respon yang diamati sebesar 1.5%, diikuti oleh variabel proses sudut ujung pahat sebesar 10.92%, variabel proses kecepatan potong sebesar 21.51%, dan variabel proses gerak makan sebesar 60.19%. Pengaruh masing-masing variabel proses untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati ditunjukkan pada grafik rata-rata GRG seperti pada Gambar 4.1.

Berdasarkan grafik rata-rata GRG yang ditunjukkan pada gambar 4.1, dapat dilihat pengaruh dari masing-masing variabel proses untuk mengurangi variansi total dari respon secara serentak. Variabel proses jenis pahat memiliki pengaruh yang signifikan untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati. Jenis pahat level 1 adalah jenis pahat HSS, sedangkan jenis pahat level 2 adalah jenis pahat yang terbuat dari HSS-Cobalt. Kontribusi jenis pahat termasuk yang paling kecil

dibandingkan dengan sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong.

Variabel proses sudut ujung pahat memiliki pengaruh yang signifikan untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati. Sudut ujung pahat level 1 adalah sudut ujung pahat yang besarnya 102° , sedangkan sudut ujung pahat level 2 dan 3 masing-masing besarnya adalah 118° dan 134° . Dari grafik rata-rata GRG untuk variabel proses sudut ujung pahat nilai GRG terbesar didapatkan pada level 3. Pada penelitian ini kondisi optimum dapat dicapai dengan menggunakan pahat yang memiliki sudut ujung pahat yang besar. Variabel proses sudut ujung pahat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon gaya tekan dan momen torsi.

Variabel proses gerak makan memiliki pengaruh yang paling signifikan dengan kontribusi sebesar 60.19%. Pada penelitian ini kondisi optimum dapat dicapai dengan menggunakan gerak makan level 3. Gerak makan level 3 besarnya adalah 0.1 mm/put. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa nilai gaya tekan dan torsi mengikuti level dari faktor gerak makan, apabila level dari faktor gerak makan semakin besar maka nilai gaya tekan dan torsi juga semakin besar.

Variabel proses kecepatan potong memiliki pengaruh yang signifikan dengan kontribusi sebesar 21.51%. Variabel proses kecepatan potong memiliki pengaruh signifikan pada respon kekasaran permukaan.

4.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Respon Individu

Besar persen kontribusi variabel proses yaitu jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong dalam mengurangi variansi masing-masing respon yang diamati yaitu gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat, dan kekasaran permukaan dapat diketahui dengan menggunakan analisis variansi. Tabel 4.14 menunjukkan besarnya persen kontribusi variabel proses terhadap respon individu.

Tabel 4.14 Persen Kontribusi Variabel Proses terhadap Respon Individu

Sumber	Gaya tekan	Torsi	Keausan tepi pahat	Kekasaran permukaan
Jenis pahat	5.48%	10.08%	-0.67 (0)%	-0.02 (0)%
Sudut ujung pahat	24.09%	3.23%	30.93%	16.72%
Gerak makan	55.45%	11.02%	29.55%	47.52%
Kecepatan potong	6.01%	40.99%	16.45%	15.36%
Error	8.96%	34.68%	23.74%	20.43%

Sumber: Hasil perhitungan

4.3.1 Pengaruh Variabel Proses terhadap Gaya Tekan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi gaya tekan adalah gerak makan dan sudut ujung pahat seperti terlihat pada Tabel 4.14. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi gaya tekan paling besar diberikan oleh variabel gerak makan sebesar 55.45%, diikuti oleh sudut ujung pahat sebesar 24.09%, kecepatan potong sebesar 6.01% dan jenis pahat sebesar 5.48%. Gerak makan memiliki kontribusi paling besar untuk mengurangi variansi gaya tekan, hal ini dikarenakan semakin tinggi gerak makan maka semakin besar nilai gaya tekannya (Rochim, 1993). Gaya tekan selain dipengaruhi oleh gerak makan, juga dipengaruhi oleh sudut ujung pahat. Semakin besar sudut ujung pahat maka semakin besar nilai K_r . Semakin besar nilai K_r maka semakin besar gaya tekan yang dihasilkan (Rochim, 1993).

4.3.2 Pengaruh Variabel Proses terhadap Torsi

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi torsi adalah kecepatan potong dan gerak makan seperti terlihat pada Tabel 4.14. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi torsi paling besar diberikan oleh variabel kecepatan potong sebesar 40.99%, diikuti oleh gerak makan 11.02%, jenis pahat sebesar 10.08% dan sudut ujung pahat sebesar 3.23%. hal ini dikarenakan kecepatan potong yang digunakan tidak terlalu tinggi. Sehingga kecepatan potong masih berpengaruh terhadap torsi. Gerak makan memiliki kontribusi untuk mengurangi variansi torsi, hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung torsi yang terjadi selama proses penggurdian yang dipengaruhi oleh gerak makan dan diameter pahat. Karena diameter pahat merupakan variabel konstan, maka tidak terdapat pengaruh diameter pada penelitian ini.

4.3.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Keausan Tepi Pahat

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi keausan tepi pahat adalah sudut ujung pahat dan gerak makan seperti terlihat pada Tabel 4.14. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi keausan tepi pahat paling besar diberikan oleh variabel sudut ujung pahat sebesar 30.93%, diikuti oleh gerak makan sebesar 29.55%, kecepatan potong sebesar 16.45% dan jenis pahat sebesar 0%. Sudut ujung pahat memiliki pengaruh yang paling besar untuk mengurangi variansi dari respon keausan tepi pahat. Semakin kecil sudut ujung pahat maka nilai K_r akan juga kecil, nilai K_r yang kecil akan menghasilkan lebar geram (b) yang besar sehingga penampang geram yang dihasilkan akan besar. Penampang geram yang besar akan menghasilkan gaya potong yang besar sehingga dapat menaikkan temperatur pahat. Temperatur pahat yang tinggi dapat menurunkan kekuatan

pahat yang dapat menyebabkan terjadinya deformasi plastis (Rochim, 1993).

4.3.4 Pengaruh Variabel Proses terhadap kekasaran Permukaan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi kekasaran permukaan adalah gerak makan dan sudut ujung pahat seperti terlihat pada Tabel 4.14. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi kekasaran permukaan paling besar diberikan oleh variabel gerak makan sebesar 47.52%, diikuti oleh sudut ujung pahat sebesar 16.72%, kecepatan potong sebesar 15.36% dan jenis pahat sebesar 0%. Gerak makan memiliki pengaruh yang paling besar untuk mengurangi variansi kekasaran permukaan. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi gerak makan maka semakin besar geram yang dihasilkan sehingga membuat kekasaran permukaan semakin tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan yang meliputi eksperimen prediksi (optimasi) dan eksperimen konfirmasi, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon Gaya Tekan, Torsi, Keausan Tepi Pahat dan Kekasaran Permukaan pada Proses Gurdi Untuk Material EMS-45 dengan Menggunakan Metode Taguchi-GRA” dapat disimpulkan, bahwa:

1. Kontribusi dari variabel-variabel proses dalam mengurangi variansi secara serentak dari respon yang diamati adalah:
 - Jenis pahat sebesar 1.5%.
 - Sudut ujung pahat sebesar 10.92%.
 - Gerak makan sebesar 60.19%.
 - Kecepatan potong sebesar 21.51%.
2. Pengaturan yang tepat dari kombinasi level variabel proses untuk mengurangi variansi secara serentak dari respon yang diamati adalah:
 - Jenis pahat menggunakan pahat HSS-M2.
 - Kecepatan potong sebesar 50 m/min
 - Gerak makan sebesar 0.1 mm/put.
 - Sudut ujung pahat sebesar 134°.

5.2 Saran

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

1. Perlu menentukan rentang yang tepat dari level-level variabel proses agar kondisi optimum dapat dicapai dengan akurat.
2. Menggunakan satu pahat untuk setiap kombinasi variabel proses supaya data yang dihasilkan lebih akurat dan menghemat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- Astakhov, V.P., (2004). "The Assessment of Cutting Tool Wear". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44, 637-647.
- Datasheet 216, 2014, "surface finishes, 'www.finetubes.co.uk, diakses tanggal: 7 Mei 2016
- Datta, S. dan Mahapatra, S. S. (2010), "Modeling, Simulation and Parametric Optimization of Wire EDM Process using Response Surface Methodology Coupled with Grey-Taguchi Technique," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 2, No. 5, hal. 162-183.
- Deng, J. (1989), "Introduction to Grey System," *Journal of Grey System*, Vol 1, hal 1–24.
- Huang, J. T. dan Liao, Y. S. (2003), "Optimization of Machining Parameters of Wire-EDM based on Grey Relational and Statistical Analyses," *International Journal of Production Research*, Vol 41, hal.1707–1720.
- Lee, B.Y., Liu H.S., dan Tarng, Y.S., (1998), "Modeling and optimization of drilling process," *Journal of Materials Processing Technology* 74 (1998) 149–157.
- Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2002), "The Use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 42, hal.237–244.
- Lin, T. R. (2002), "Cutting behavior of a TiN-coated carbide drill with curved cutting edges during the high-

- speed machining of stainless steel,” *Journal of Materials Process Technology*, Vol.127, hal. 8–16.
- Montgomery, D.C. (2009). *Design and Analysis of Experiment*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Park, S. H. (1996), *Robust Design and Analysis for Quality Engineering, 1st edition*, Chapman & Hall, London
- Rochim, T., (1993), *Proses Pemesinan*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Rochim, T., (2001). *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Lab.Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung.
- Ross, P. J. (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw Hill Companies, Inc., Taiwan
- Sato, G. T. dan Hartanto, N. S. (2000), *Menggambar Mesin Menurut Standar ISO*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Syamsul, H., E. Widiyono., Winarto., D. Z. Noor., 2013. “EMS-45 Tool Steels Hardenability Experiment using Jominy ASTM A255 Test Method”. *The Journal for Technology and Science*, Vol. 24 (1), pp.7-12.
- Tönshoff, H.K., Spintig, W., König, W. and Nesises, A., (1994), *Machining of holes: developments in drilling technology*, *Annals of the CIRP*, Vol. 43/2: 551-561.
- Tosun, N. (2006), “Determine of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis,” *The International Journal*

of Advanced Manufacture Technology, Vol.28, hal. 450-455.

- Tosun, N., Cogun, C. dan Tosun, G. (2004), "A Study on Kerf and Material Removal Rate in Wire Electrical Discharge Machining based on Taguchi Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.152, hal. 316-322.
- Tragedi, F. A. (2010), *Pengaruh Cairan Pendingin Bertekanan Tinggi terhadap Keausan Tepi Pahat, Kekasaran Permukaan dan Gaya Tekan pada Proses Gurdi material Baja AISI 4340*, Tugas Akhir yang Tidak Dipublikasikan, Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Vankanti, V. K., dan Ganta, V. K., (2013). "Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composite Using Taguchi Method." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3(1), hal. 35-41.
- Widarto. (2008), *Teknik Pemesinan Jilid 2*, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 1
HASIL PENGUKURAN GAYA TEKAN PADA
PERCOBAAN REPLIKASI KE 1 DAN 2

No	JP	PA	f	v	Gaya Tekan	
					R1	R2
1	1	1	1	1	686.6	621.5
2	1	1	2	2	1226	1234
3	1	1	3	3	1871	1734
4	1	2	1	1	1003	1021
5	1	2	2	2	1165	1177
6	1	2	3	3	2656	2566
7	1	3	1	2	1167	1157
8	1	3	2	3	2523	2546
9	1	3	3	1	2887	2847
10	2	1	1	3	680.7	726.9
11	2	1	2	1	934.1	1016
12	2	1	3	2	1390	1451
13	2	2	1	2	756	731.4
14	2	2	2	3	1411	1652
15	2	2	3	1	1810	1743
16	2	3	1	3	1280	1298
17	2	3	2	1	1390	1386
18	2	3	3	2	2414	2304

Keterangan:

R1 : Replikasi 1

R2 : Replikasi 2

LAMPIRAN 2
HASIL PENGUKURAN TORSI PADA PERCOBAAN
REPLIKASI KE 1 DAN 2

No	JP	PA	f	v	Torsi	
					R1	R2
1	1	1	1	1	2.21	2.4
2	1	1	2	2	2.71	2.61
3	1	1	3	3	5.01	5.21
4	1	2	1	1	2.314	2.304
5	1	2	2	2	3.844	3.834
6	1	2	3	3	4.082	4.095
7	1	3	1	2	2.39	2.08
8	1	3	2	3	3.591	3.571
9	1	3	3	1	2.813	2.8
10	2	1	1	3	3.654	3.623
11	2	1	2	1	2.721	2.71
12	2	1	3	2	3.065	3.054
13	2	2	1	2	3.7	3.57
14	2	2	2	3	4.396	4.386
15	2	2	3	1	3.991	3.987
16	2	3	1	3	4.639	4.621
17	2	3	2	1	3.773	3.723
18	2	3	3	2	4.091	4.065

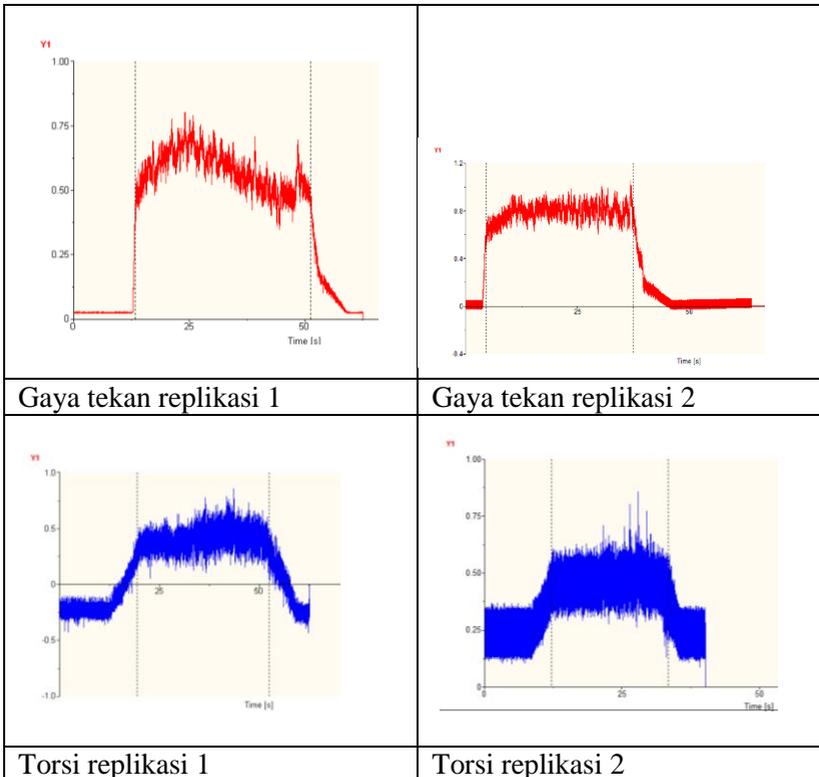
Keterangan:

R1 : Replikasi 1

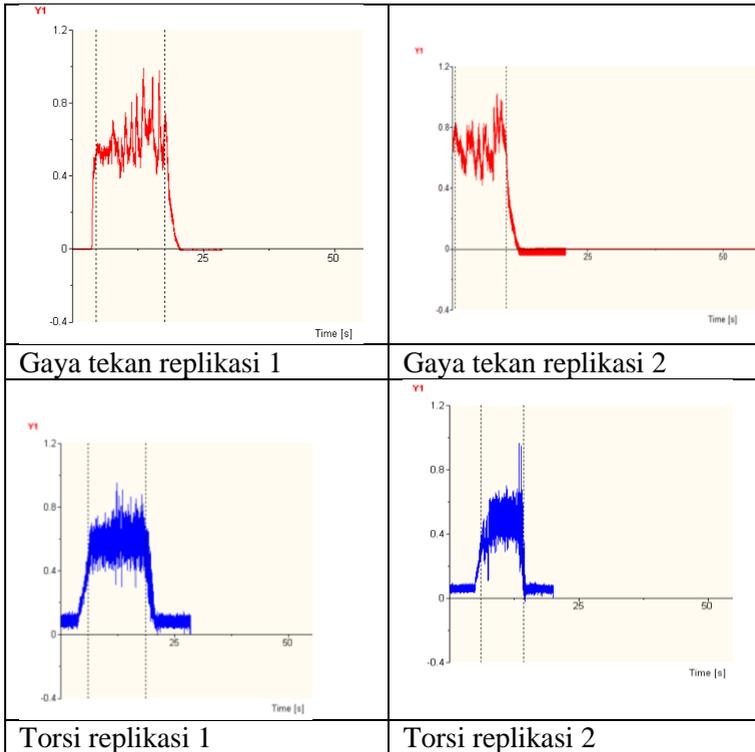
R2 : Replikasi 2

LAMPIRAN 3 GRAFIK GAYA TEKAN DAN TORSI

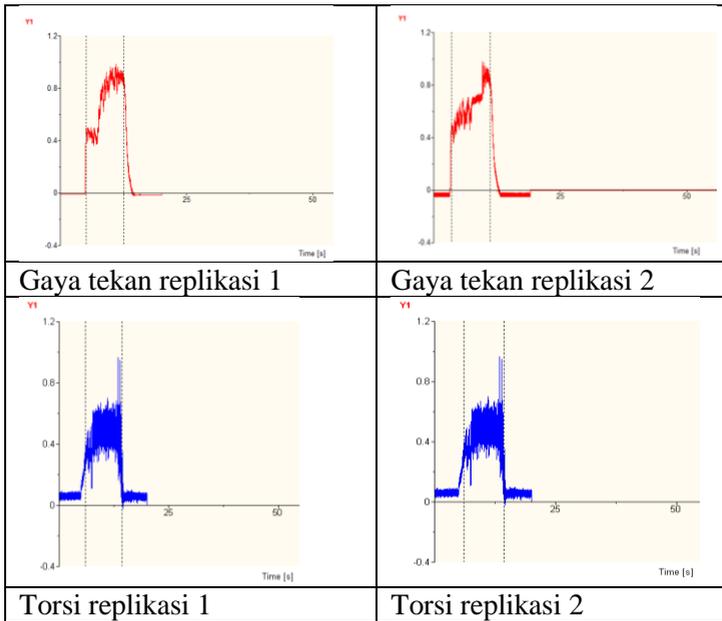
Kombinasi variabel proses 1111



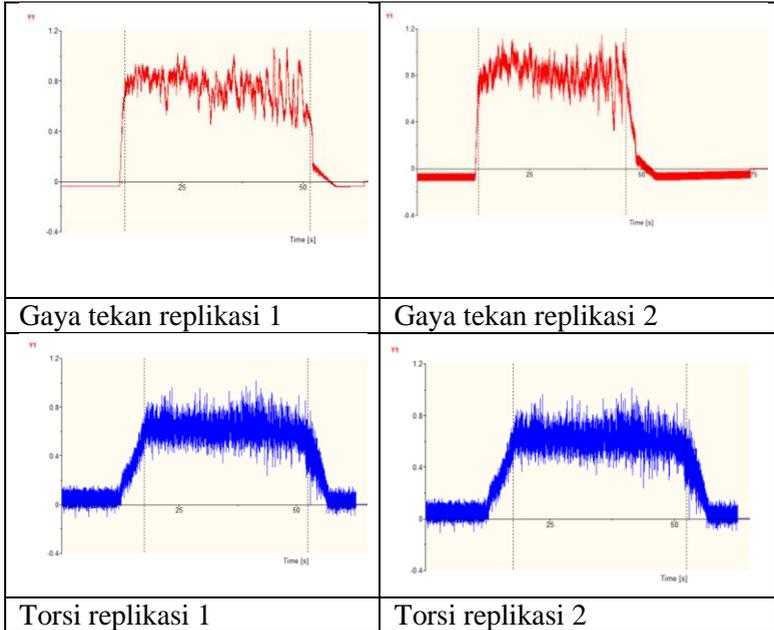
Kombinasi variabel proses 1122



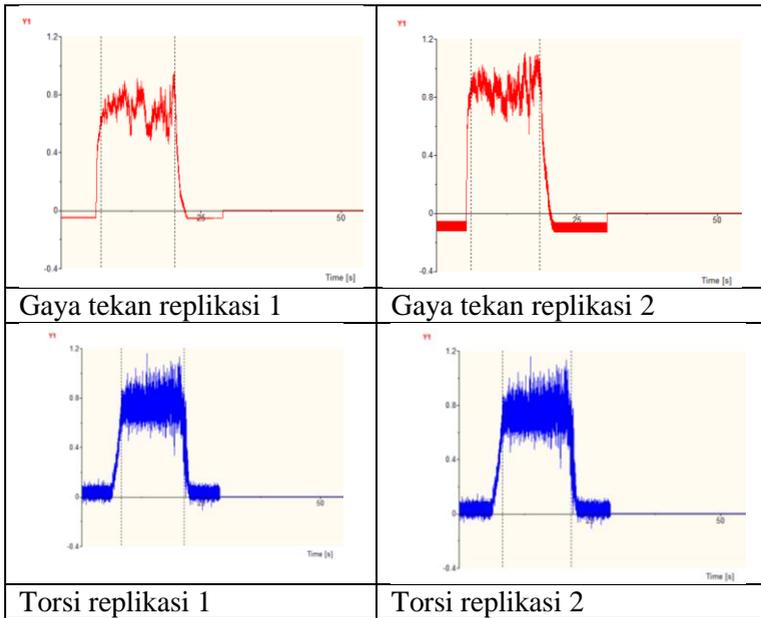
Kombinasi variabel proses 1133



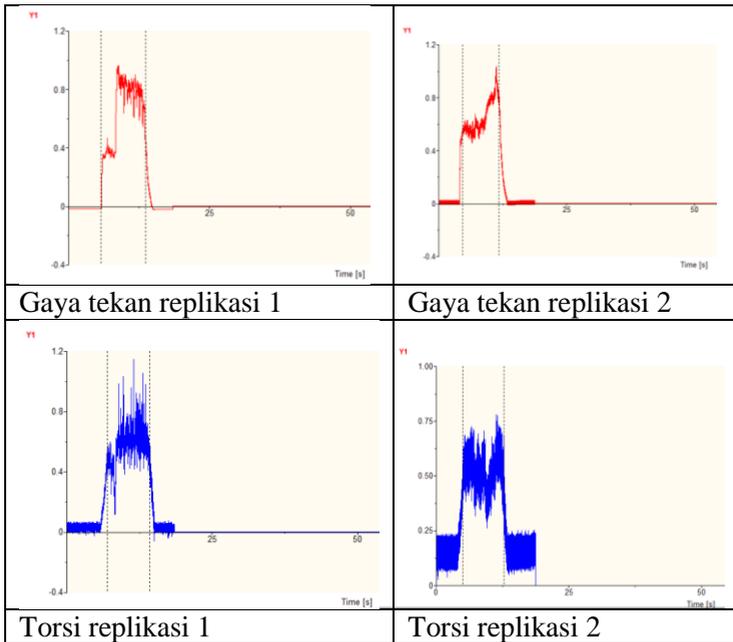
Kombinasi variabel proses 1211



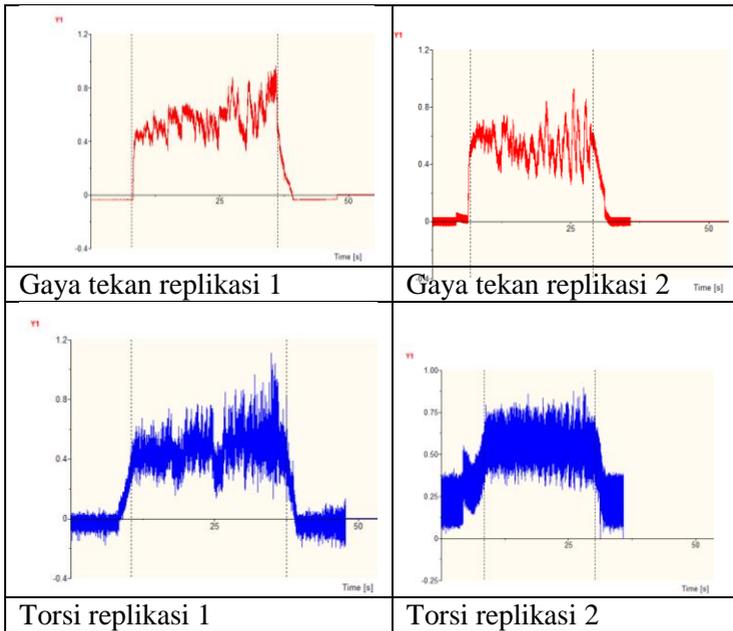
Kombinasi variabel proses 1222



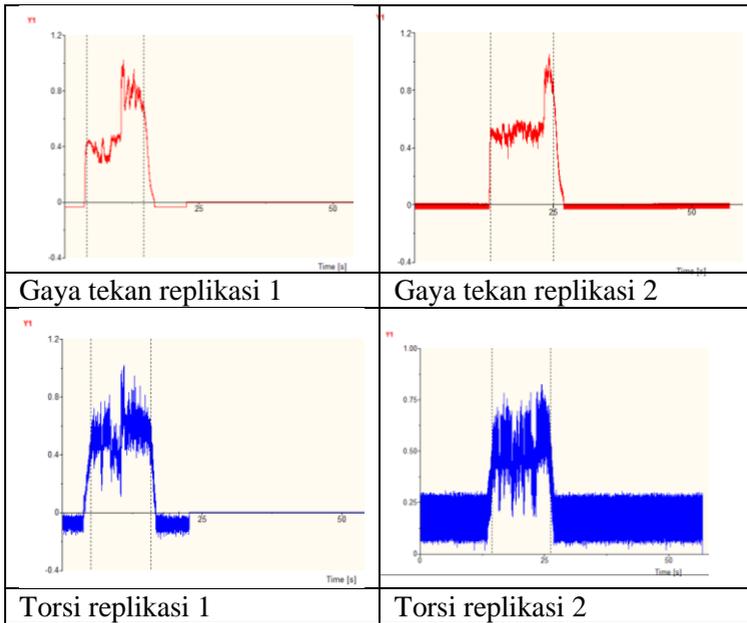
Kombinasi variabel proses 1233



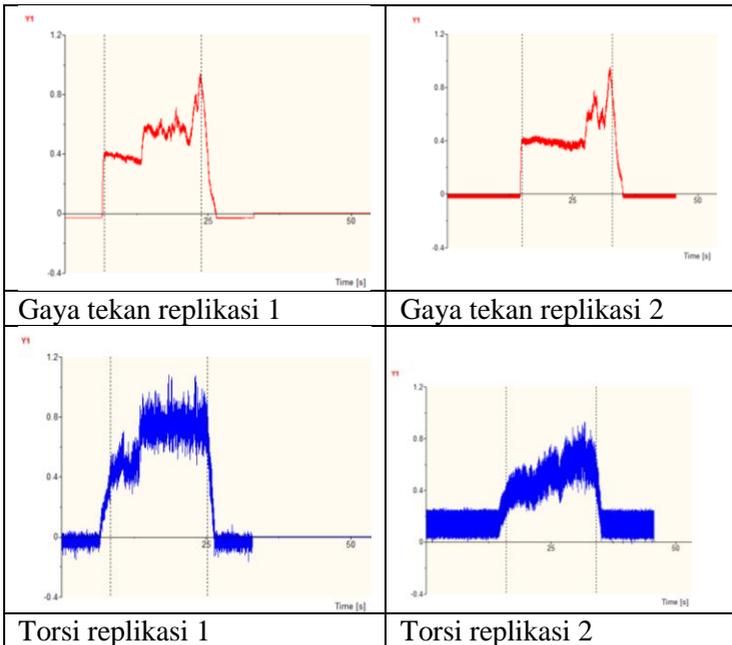
Kombinasi variabel proses 1312



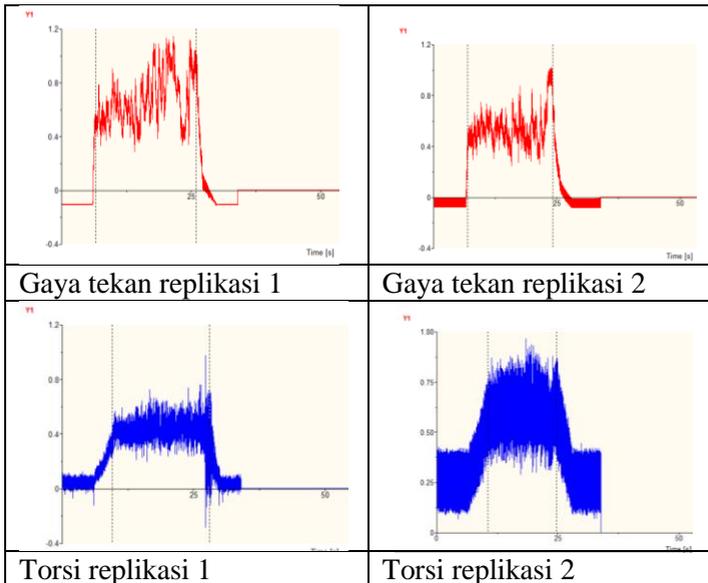
Kombinasi variabel proses 1323



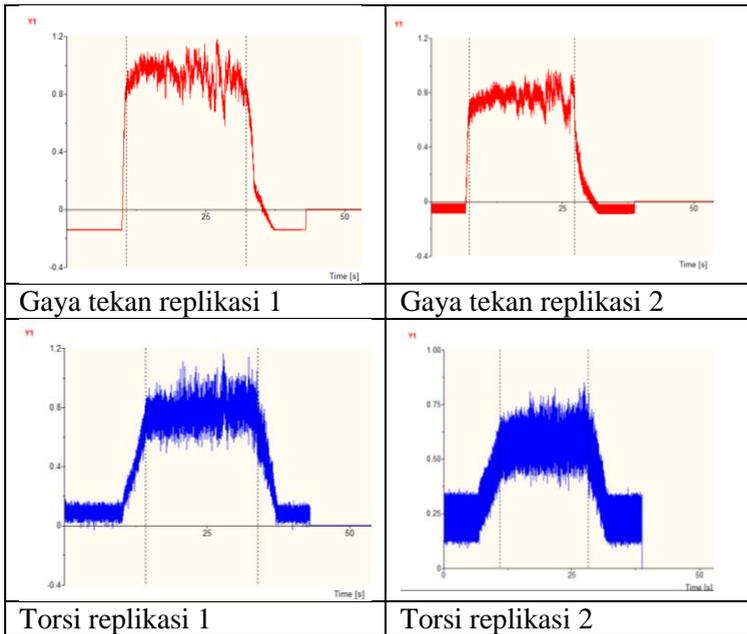
Kombinasi variabel proses 1331



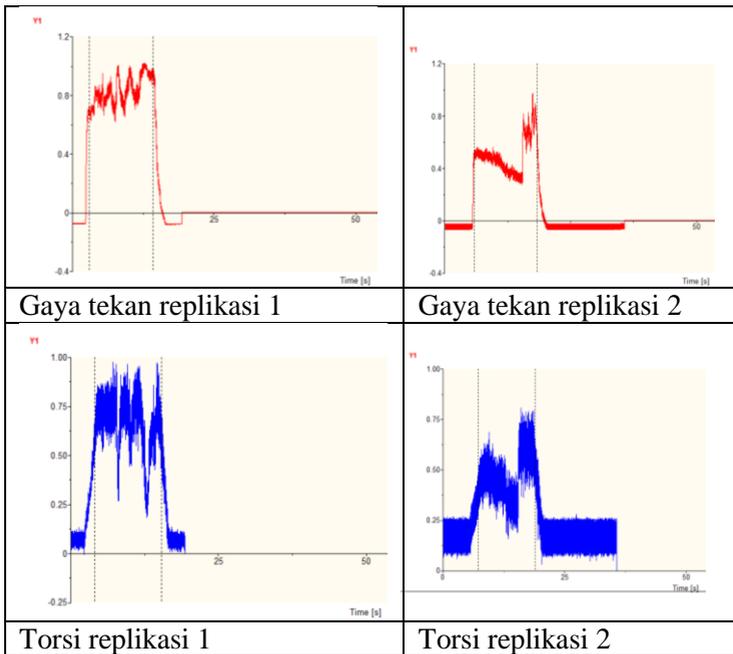
Kombinasi variabel proses 2113



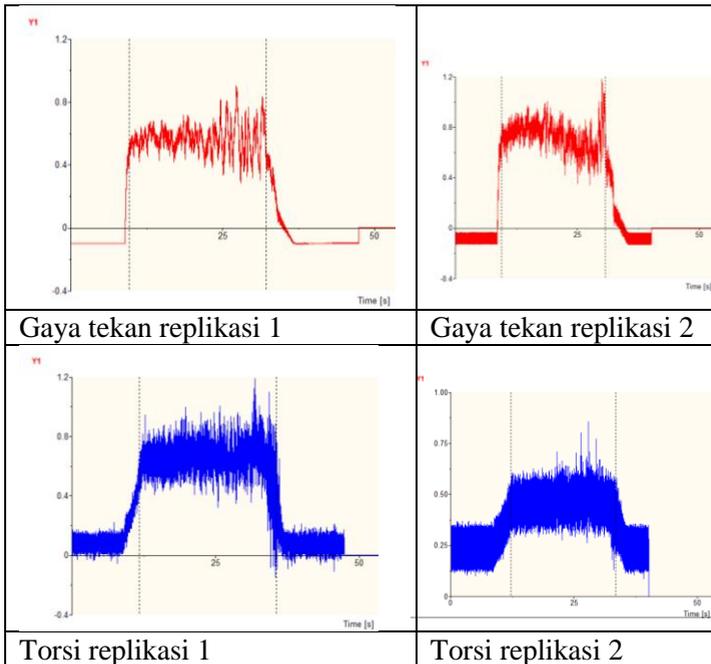
Kombinasi variabel proses 2121



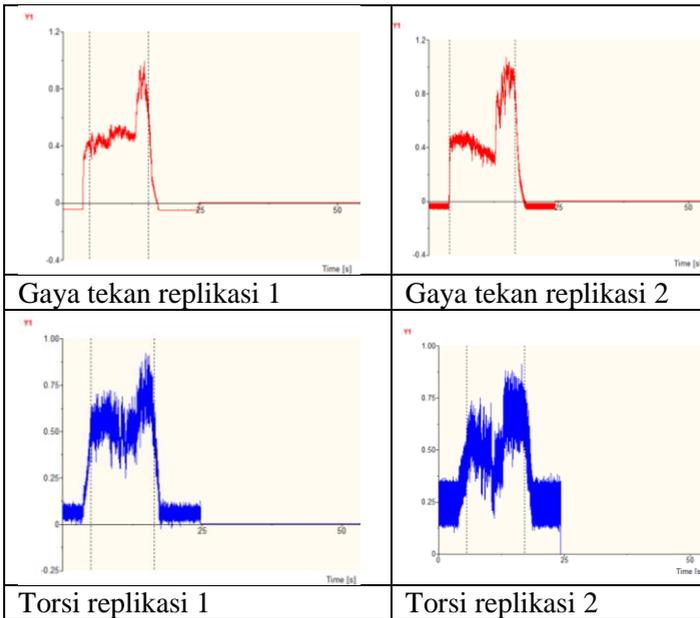
Kombinasi variabel proses 2132



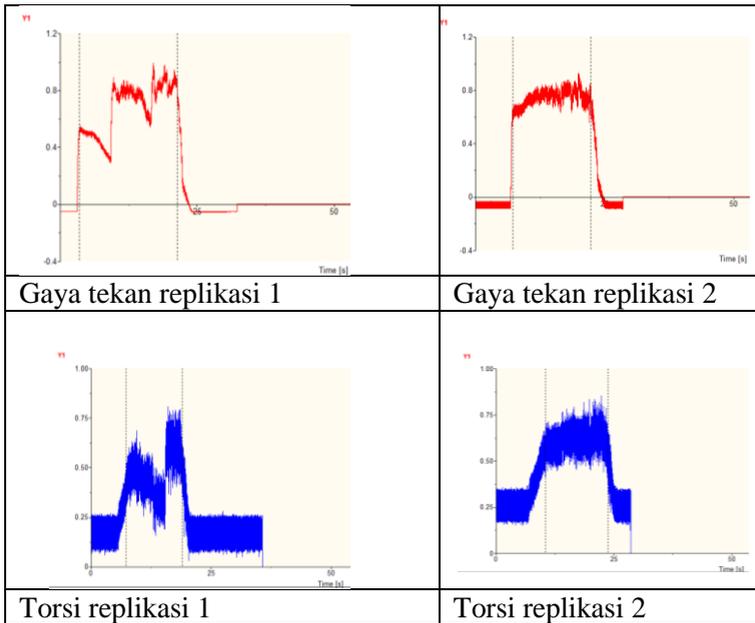
Kombinasi variabel proses 2212



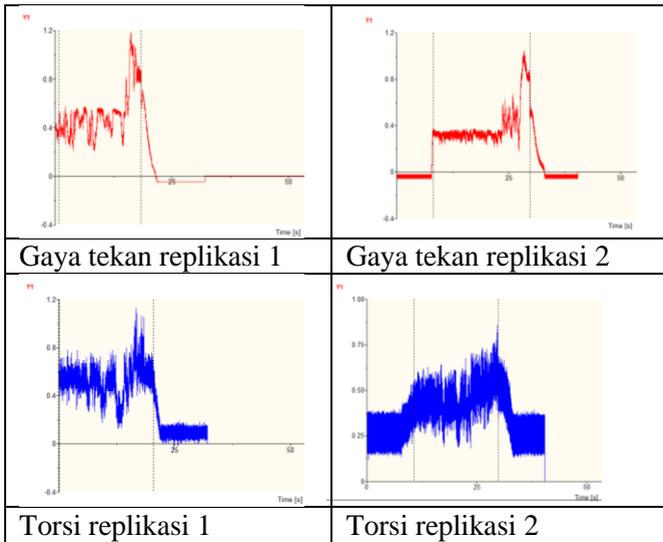
Kombinasi variabel proses 2223



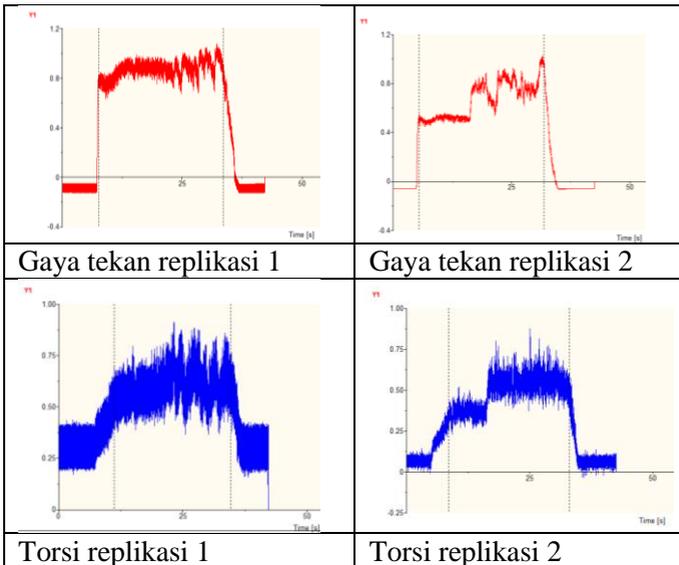
Kombinasi variabel proses 2231



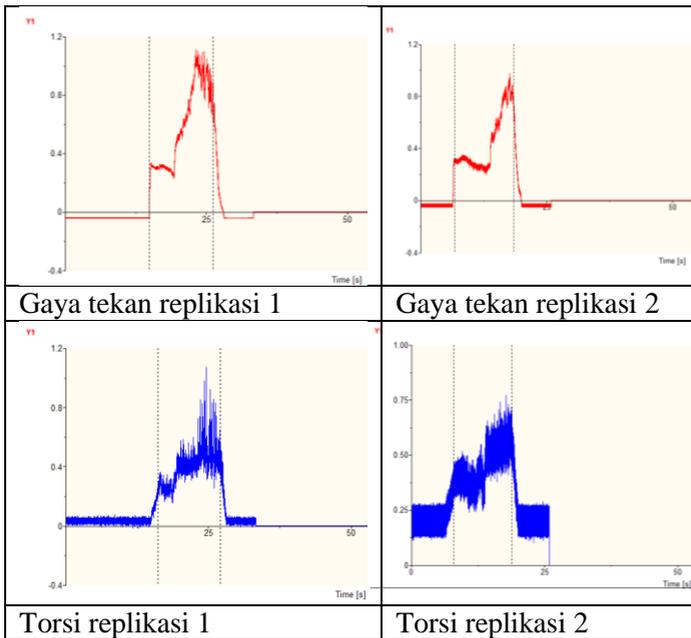
Kombinasi variabel proses 2313



Kombinasi variabel proses 2321



Kombinasi variabel proses 2332



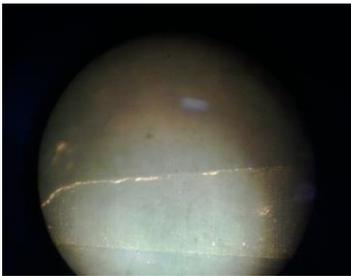
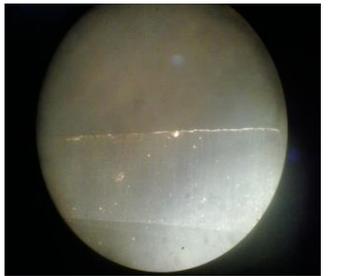
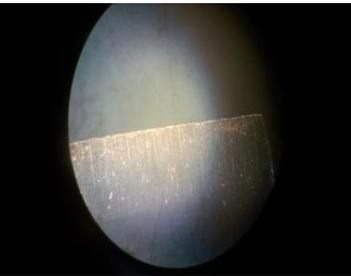
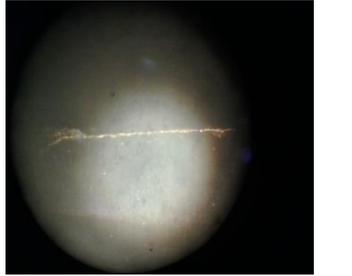
LAMPIRAN 4
HASIL PENGUKURAN KEAUSAN TEPI PAHAT
PADA PERCOBAAN REPLIKASI KE 1

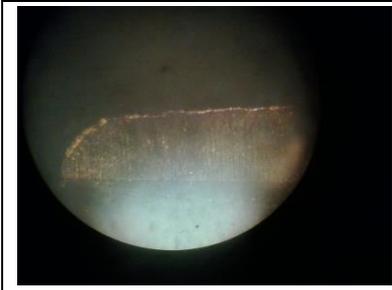
No	JP	PA	f	v	Keausan						Rata-rata
					1	2	3	4	5	6	
1	1	1	1	1	0.025	0.035	0.023	0.031	0.026	0.025	0.0275
2	1	1	2	2	0.098	0.089	0.069	0.075	0.087	0.095	0.0855
3	1	1	3	3	0.115	0.135	0.159	0.126	0.135	0.144	0.135667
4	1	2	1	1	0.033	0.032	0.083	0.027	0.028	0.038	0.040167
5	1	2	2	2	0.052	0.054	0.054	0.058	0.057	0.058	0.0555
6	1	2	3	3	0.088	0.08	0.092	0.048	0.053	0.056	0.0695
7	1	3	1	2	0.04	0.03	0.034	0.032	0.029	0.03	0.0325
8	1	3	2	3	0.052	0.028	0.038	0.032	0.051	0.048	0.0415
9	1	3	3	1	0.05	0.017	0.013	0.013	0.036	0.01	0.023167
10	2	1	1	3	0.074	0.058	0.07	0.07	0.105	0.06	0.072833
11	2	1	2	1	0.061	0.064	0.084	0.066	0.083	0.063	0.070167
12	2	1	3	2	0.076	0.096	0.09	0.09	0.1	0.08	0.088667
13	2	2	1	2	0.027	0.043	0.04	0.055	0.016	0.017	0.033
14	2	2	2	3	0.073	0.056	0.058	0.08	0.071	0.066	0.067333
15	2	2	3	1	0.06	0.062	0.049	0.053	0.054	0.053	0.055167
16	2	3	1	3	0.035	0.027	0.02	0.053	0.02	0.05	0.034167
17	2	3	2	1	0.02	0.061	0.032	0.019	0.031	0.016	0.029833
18	2	3	3	2	0.05	0.082	0.051	0.07	0.06	0.064	0.062833

LAMPIRAN 5
HASIL PENGUKURAN KEAUSAN TEPI PAHAT
PADA PERCOBAAN REPLIKASI KE 2

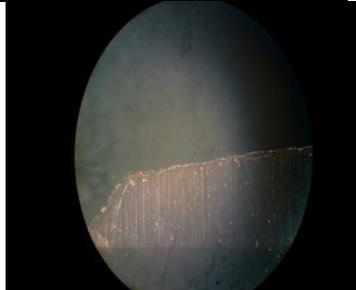
No	JP	PA	f	v	Keausan 2						Rata-rata
					1	2	3	4	5	6	
1	1	1	1	1	0.025	0.032	0.022	0.032	0.027	0.026	0.0273
2	1	1	2	2	0.096	0.0951	0.105	0.096	0.1	0.095	0.0979
3	1	1	3	3	0.103	0.11	0.119	0.108	0.1093	0.12	0.112
4	1	2	1	1	0.035	0.057	0.0915	0.042	0.015	0.04	0.0468
5	1	2	2	2	0.038	0.062	0.0612	0.07	0.08	0.087	0.0664
6	1	2	3	3	0.067	0.046	0.083	0.087	0.078	0.088	0.0748
7	1	3	1	2	0.02	0.037	0.022	0.035	0.04	0.046	0.0333
8	1	3	2	3	0.071	0.037	0.0513	0.0544	0.045	0.055	0.0523
9	1	3	3	1	0.042	0.027	0.045	0.051	0.04	0.022	0.037833
10	2	1	1	3	0.066	0.056	0.036	0.034	0.054	0.06	0.051
11	2	1	2	1	0.08	0.04	0.08	0.06	0.054	0.058	0.062
12	2	1	3	2	0.108	0.095	0.102	0.1095	0.0952	0.1333	0.107167
13	2	2	1	2	0.05	0.03	0.034	0.03	0.032	0.047	0.037167
14	2	2	2	3	0.06	0.072	0.081	0.081	0.062	0.071	0.071167
15	2	2	3	1	0.052	0.112	0.097	0.047	0.04	0.07	0.069667
16	2	3	1	3	0.046	0.034	0.059	0.053	0.049	0.038	0.0465
17	2	3	2	1	0.06	0.03	0.03	0.0315	0.023	0.024	0.0331
18	2	3	3	2	0.075	0.07	0.077	0.064	0.078	0.075	0.0732

LAMPIRAN 6
KEAUSAN TEPI PAHAT REPLIKASI 1

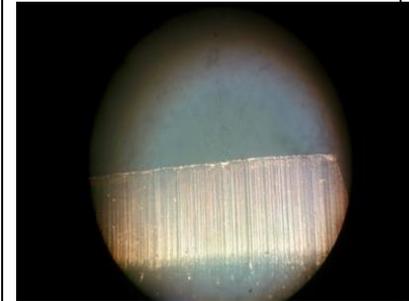
	
Pahat 1 sisi 1,2	Pahat 1 sisi 3
	
Pahat 1 sisi 4,5	Pahat 1 sisi 6



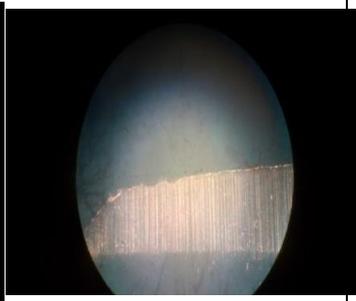
Pahat 2 sisi 1,2



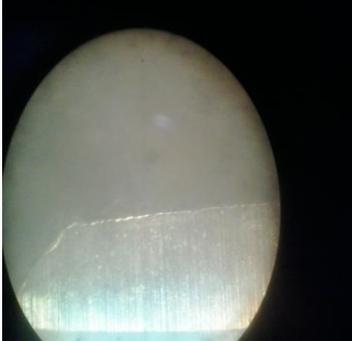
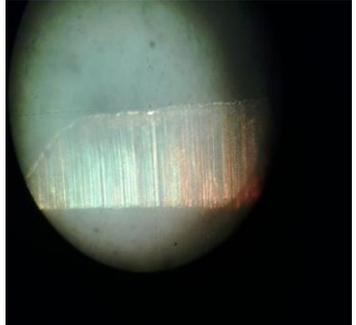
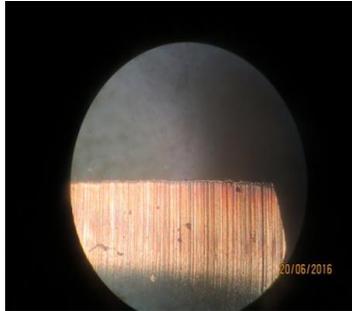
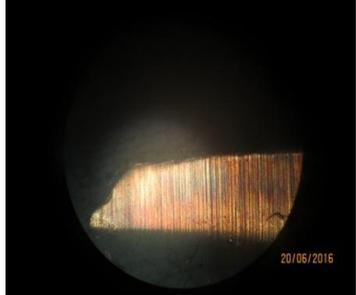
Pahat 2 sisi 3

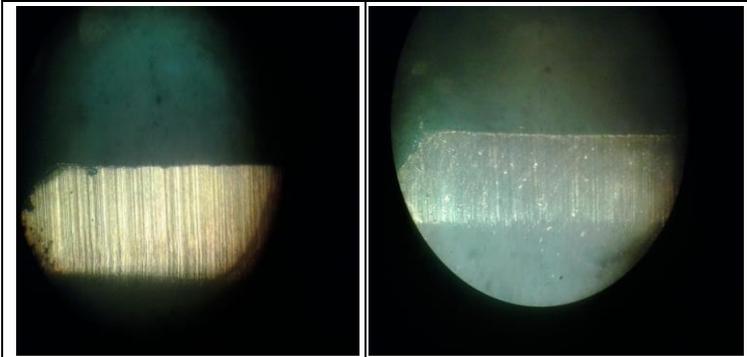


Pahat 2 sisi 4,5

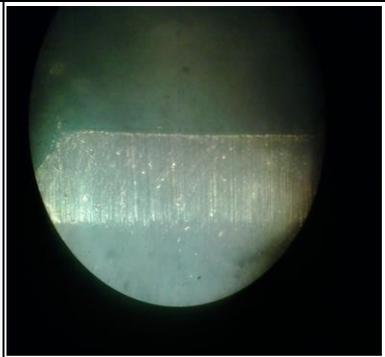


Pahat 2 sisi 6

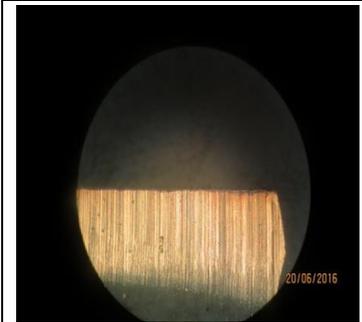
	
<p>Pahat 3 sisi 1,2</p>	<p>Pahat 3 sisi 3</p>
	
<p>Pahat 3 sisi 4,5</p>	<p>Pahat 3 sisi 6</p>



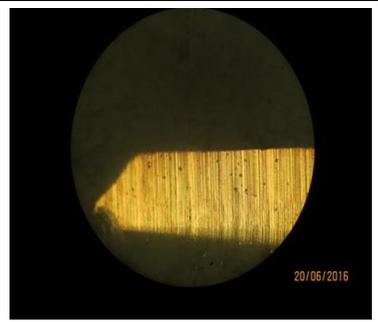
Pahat 4 sisi 1,2



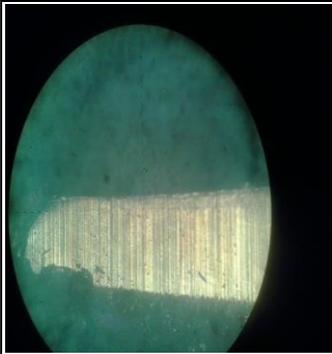
Pahat 4 sisi 3



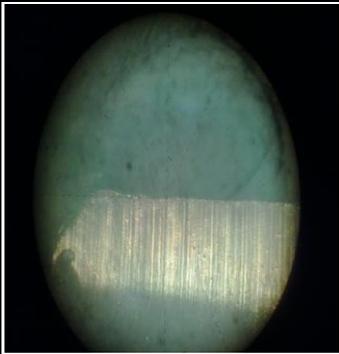
Pahat 4 sisi 4,5



Pahat 4 sisi 6



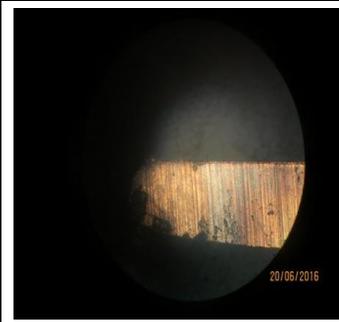
Pahat 5 sisi 1,2



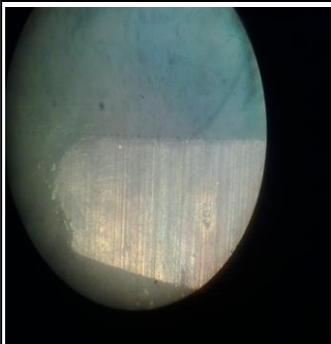
Pahat 5 sisi 3



Pahat 5 sisi 4,5



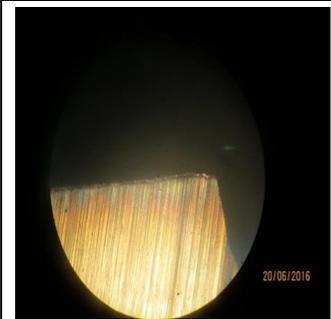
Pahat 5 sisi 6



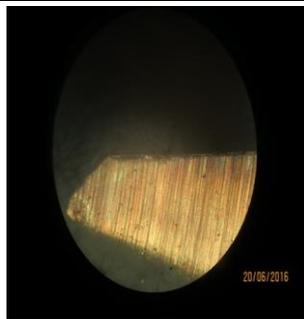
Pahat 6 sisi 1,2



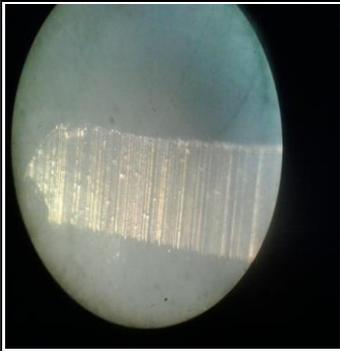
Pahat 6 sisi 3



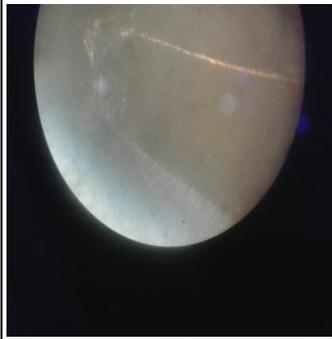
Pahat 6 sisi 4,5



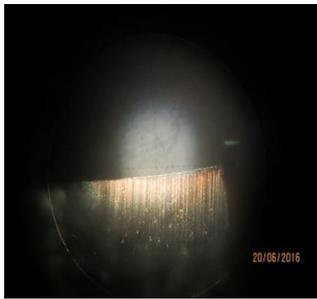
Pahat 6 sisi 6



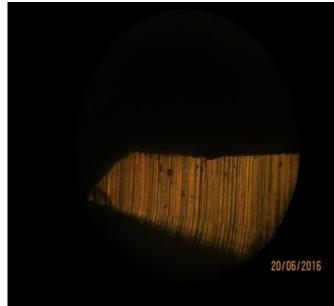
Pahat 7 sisi 1,2



Pahat 7 sisi 3



Pahat 7 sisi 4,5



Pahat 7 sisi 6



Pahat 8 sisi 1,2



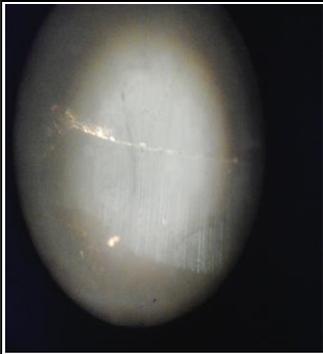
Pahat 8 sisi 3



Pahat 8 sisi 4,5



Pahat 8 sisi 6



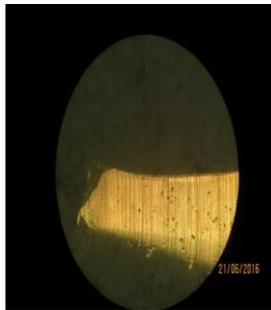
Pahat 9 sisi 1,2



Pahat 9 sisi 3

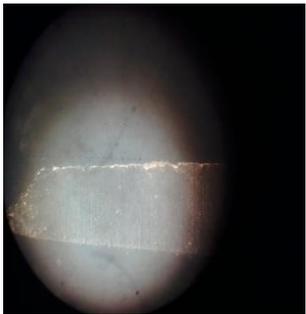
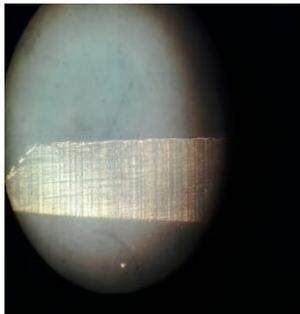
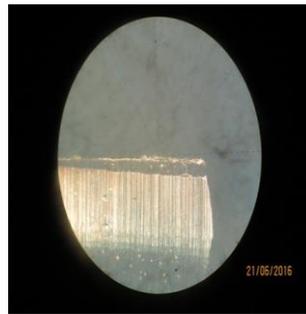
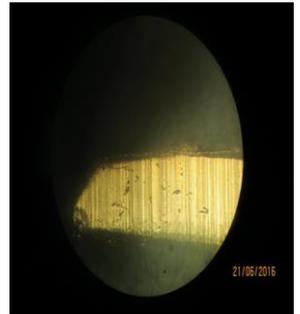


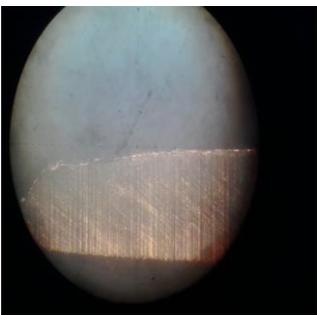
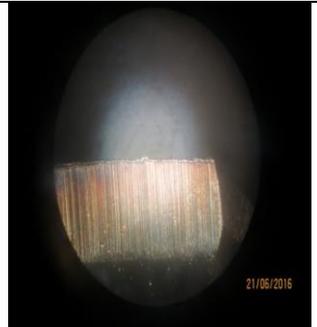
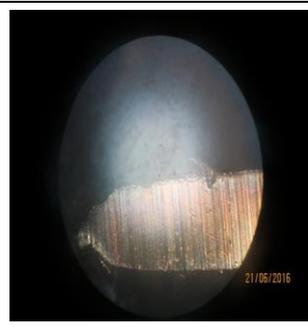
Pahat 9 sisi 4,5

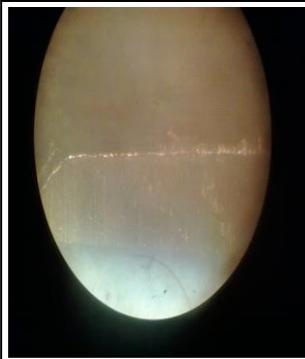


Pahat 9 sisi 6

LAMPIRAN 7
KEAUSAN TEPI PAHAT REPLIKASI 2

	
Pahat 1 sisi 1,2	Pahat 1 sisi 3
	
Pahat 1 sisi 4,5	Pahat 1 sisi 6

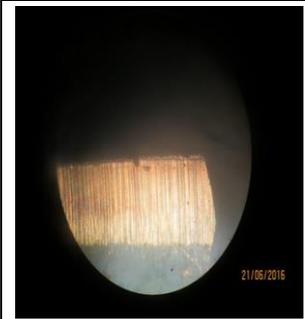
	
<p>Pahat 2 sisi 1,2</p>	<p>Pahat 2 sisi 3</p>
	
<p>Pahat 2 sisi 4,5</p>	<p>Pahat 2 sisi 6</p>



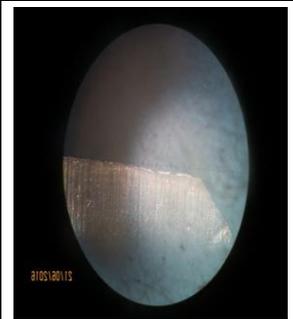
Pahat 3 sisi 1,2



Pahat 3 sisi 3



Pahat 3 sisi 4,5



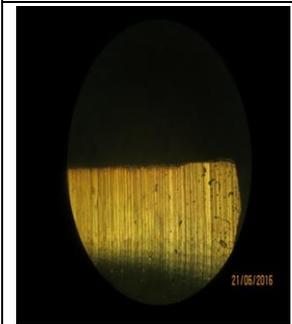
Pahat 3 sisi 6



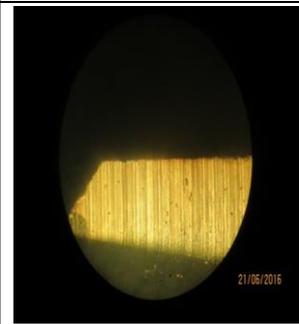
Pahat 4 sisi 1,2



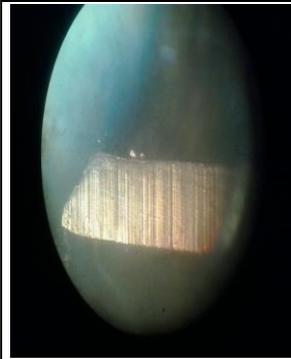
Pahat 4 sisi 3



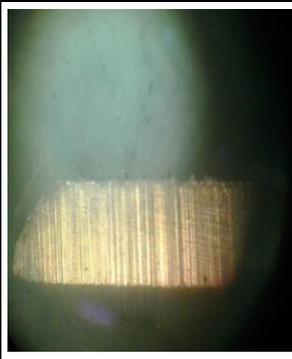
Pahat 4 sisi 4,5



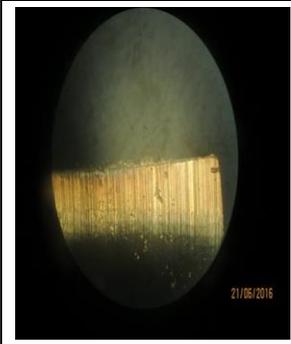
Pahat 4 sisi 6



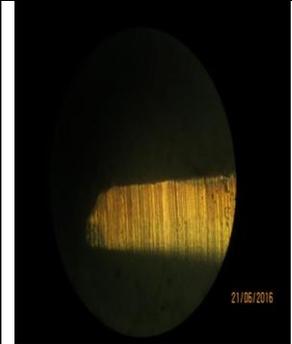
Pahat 5 sisi 1,2



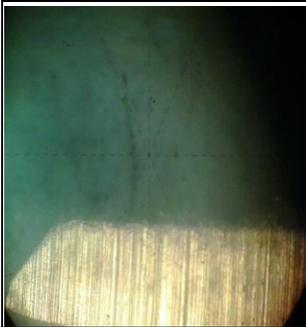
Pahat 5 sisi 3



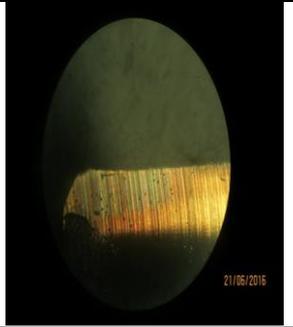
Pahat 5 sisi 4,5



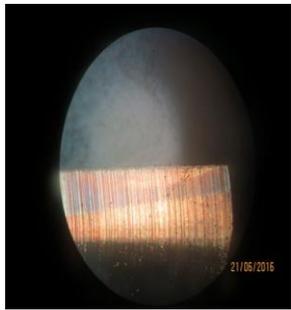
Pahat 5 sisi 6



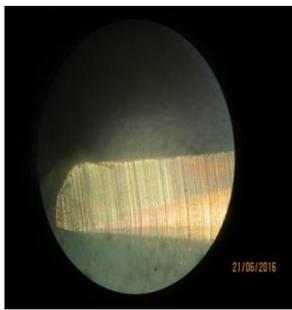
Pahat 6 sisi 1,2



Pahat 6 sisi 3



Pahat 6 sisi 4,5



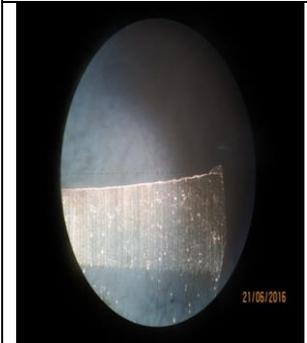
Pahat 6 sisi 6



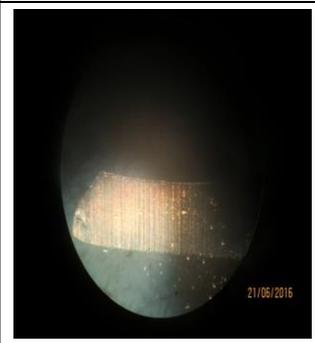
Pahat 7 sisi 1,2



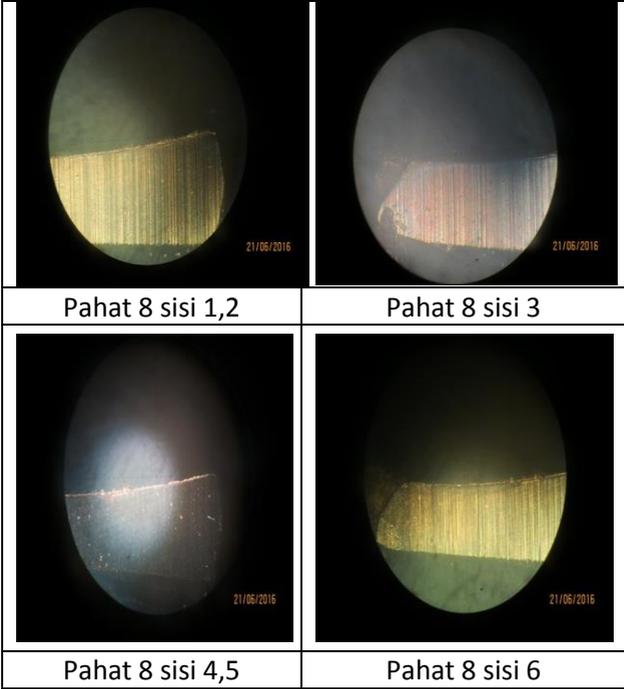
Pahat 7 sisi 3

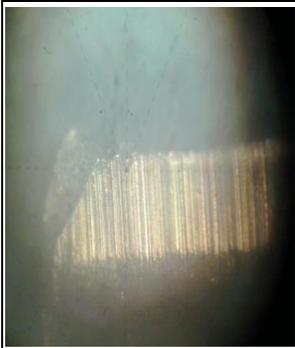


Pahat 7 sisi 4,5



Pahat 7 sisi 6





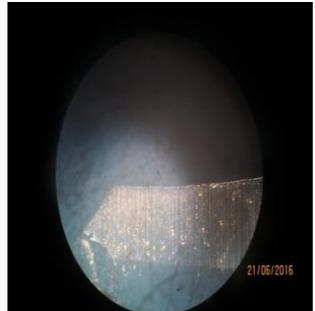
Pahat 9 sisi 1,2



Pahat 9 sisi 3



Pahat 9 sisi 4,5



Pahat 9 sisi 6

LAMPIRAN 8

HASIL PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PERCOBAAN REPLIKASI KE 1

No	JP	PA	f	v	Kekasaran permukaan		Rata-rata
					Atas	Bawah	
1	1	1	1	1	3.17	3.31	3.24
2	1	1	2	2	7.69	4.69	6.19
3	1	1	3	3	8.92	8.8	8.86
4	1	2	1	1	4.3	3.82	4.06
5	1	2	2	2	5.15	4.01	4.58
6	1	2	3	3	10.74	8.94	9.84
7	1	3	1	2	7.1	6.79	6.945
8	1	3	2	3	9.8	9.71	9.755
9	1	3	3	1	7.01	7.43	7.22
10	2	1	1	3	3.75	4.07	3.91
11	2	1	2	1	4.9	3.94	4.42
12	2	1	3	2	7.52	5.56	6.54
13	2	2	1	2	5.05	6.6	5.825
14	2	2	2	3	9.1	6.1	7.6
15	2	2	3	1	7.63	8.13	7.88
16	2	3	1	3	6.26	6.03	6.145
17	2	3	2	1	5.42	7.62	6.52
18	2	3	3	2	8.29	10.09	9.19

LAMPIRAN 9

HASIL PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PERCOBAAN REPLIKASI KE 2

No	JP	PA	f	v	Kekasaran permukaan		Rata-rata
					Atas	Bawah	
1	1	1	1	1	2.88	3.58	3.23
2	1	1	2	2	5.76	6.64	6.2
3	1	1	3	3	8.83	8.93	8.88
4	1	2	1	1	5.08	3.06	4.07
5	1	2	2	2	4.71	4.43	4.57
6	1	2	3	3	9.88	9.84	9.86
7	1	3	1	2	5.01	7.19	6.1
8	1	3	2	3	7.77	11.91	9.84
9	1	3	3	1	8.26	6.69	7.475
10	2	1	1	3	3.12	2.88	3
11	2	1	2	1	4.47	5.22	4.845
12	2	1	3	2	7.88	5.5	6.69
13	2	2	1	2	5.25	5.81	5.53
14	2	2	2	3	7.61	7.56	7.585
15	2	2	3	1	7.6	8.2	7.9
16	2	3	1	3	6.37	5.88	6.125
17	2	3	2	1	6.82	6.26	6.54
18	2	3	3	2	10.06	8.34	9.2

LAMPIRAN 10
SPESIFIKASI PAHAT

SPECIFICATION DRILL DIAMETER 10 MM			
Parameter	Drill Putih (DIN 338)		
	Specification	HSS M2	HSS M35 (Cobalt)
Web Thickness (mm)	1.38-1.60	1.77	1.72
Helix angle (°)	29-31	28	29
Lip Clearance angle (°)	11-15	13	10
Chisel Edge angle (°)	116-120	118	134
Point angle (°)	116-120	118	134
Split Point	tidak		
Material Grade	M2		
Head Treatment	0°C/Tempering 3x		
Hardness VHN 30 kg	792-869	845	900
Chemical Composition Grade High Speed Steel M2			
Carbon (%)	0.78-0.88	0.86	0.96
Silicon (%)	0.20-0.45	0.352	0.35
Manganese (%)	0.15-0.45	0.32	0.402
Chromium (%)	3.75-4.50	4.49	5.23
Molybdenum (%)	4.50-5.50	4.88	4.9
Vanadium (%)	1.75-2.20	1.87	1.89
Tungsten (%)	5.50-6.75	4.87	4.76
Posphorus (%)	0.03 max	0.034	0.03
Sulfur (%)	0.03 max	0.01	0.005

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Novi dwijayanti, dilahirkan di Sidoarjo pada tanggal 2 Nopember 1987. Penulis adalah putri kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Sanusi dan Ibu Mariyam. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri Ketimang dan lulus pada tahun 2000. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMP Negeri 1 Sidoarjo, lulus pada tahun 2003. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Negeri 1 Krian, lulus pada tahun 2006. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang dan lulus tahun 2009. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan program sarjana di jurusan Teknik Mesin ITS. Terdaftar dengan nomor registrasi pokok 2113105005. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Optimasi Multirespon Gaya Tekan, Torsi, Keausan Tepi Pahat Dan Kekasaran Permukaan pada Proses Gurdi untuk Material EMS-45 dengan Menggunakan Metode Taguchi-GRA”, dengan harapan ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk agama dan negara.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)