



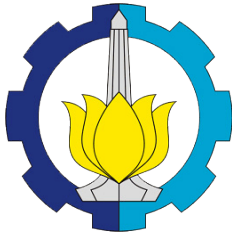
TUGAS AKHIR (TM-141585)

**OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN
GABUNGAN METODE TAGUCHI-GRA PADA
PENGGURDIAN KOMPOSIT *GLASS 7781/EPOXY*
YANG DITUMPUK**

GALLIH BAGUS WICAKSONO
NRP. 2110 100 064

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2015



FINAL PROJECT (TM-141585)

**MULTI RESPONSE OPTIMIZATION USING
TAGUCHI-GRA METHOD ON DRILLING *GLASS*
7781/*EPOXY* COMPOSITE STACKS**

GALLIH BAGUS WICAKSONO
NRP. 2110 100 064

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
2015

**OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN GABUNGAN
METODE TAGUCHI-GRA PADA PENGGURDIAN
KOMPOSIT GLASS 7781/EPOXY YANG DITUMPUK**

TUGAS AKHIR

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


Oleh:

GALLIH BAGUS WICAKSONO

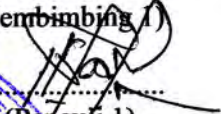
NRP.2110 100 064

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
NIP: 1953 05 16 197803 1001


(Pembimbing I)


2. Ir. Sampurno, MT.
NIP: 1965 04 04 198903 1002


(Penguji 1)

3. Ir. Achmad Mulyana
NIP: 1948 06 11 197803 1001


(Penguji 2)

4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NIP: 1960 06 23 198803 1002


(Penguji 3)



**SURABAYA
Juli, 2015**

OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN GABUNGAN METODE TAGUCHI-GRA PADA PENGGURDIAN KOMPOSIT GLASS 7781/EPOXY YANG DITUMPUK

Nama mahasiswa : Gallih Bagus Wicaksono
NRP : 2110100064
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen pembimbing : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Proses gurdi merupakan proses pemesinan yang sering dilakukan untuk pembuatan lubang pada material komposit. Kinerja dari proses gurdi pada material komposit dapat dievaluasi berdasarkan beberapa karakteristik kualitas seperti gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan.

Suatu penelitian telah dilakukan pada proses penggurdi material komposit glass 7781/epoxy. Rancangan percobaan yang digunakan berupa matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$. Variabel atau faktor yang divariasikan adalah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan spindel. Masing-masing variabel yang diteliti memiliki tiga level kecuali jenis pahat yang memiliki dua level. Optimasi dilakukan dengan menggunakan gabungan metode Taguchi-grey relational analysis (GRA).

Berdasarkan hasil eksperimen, variabel proses jenis pahat memiliki kontribusi sebesar 40,61%, sudut ujung pahat sebesar 8,23%, kecepatan makan sebesar 27,71% dan kecepatan spindel sebesar 17,48% untuk mengurangi variansi total dari respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan secara serentak. Pengaturan yang tepat untuk mengurangi variansi total dari respon secara serentak adalah jenis pahat menggunakan HSS-Cobalt, sudut ujung pahat diatur pada 90° , kecepatan makan diatur pada 100 m m/menit dan kecepatan spindel diatur pada 2500 rpm.

Kata kunci: Komposit, Taguchi, GRA, gaya tekan, torsi,

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

MULTI RESPONSE OPTIMIZATION USING TAGUCHI-GRA METHOD ON DRILLING GLASS 7781/EPOXY COMPOSITE STACKS

Student name : Gallih Bagus Wicaksono
NRP : 2110100064
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Academic advisor : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

Drilling is one of the important operations for hole making in composite structure, and usually used for a final operation like assembly. Drilling performance can be evaluated based on quality characteristic like thrust force, torque, circularity and surface roughnes.

A research was conducted for optimization of the drilling process of glass 7781/epoxy composites, with multiple performance characteristic based on the orthogonal array with Taguchi-grey relational analysis method. The experimental studies were conducted under varying the drilling process variables, i.e., tool material, point angle ($^{\circ}$), feed rate (mm/min) and spindle speed (rpm). The optimized multiple performances characteristic were thrust force, torque, circularity, and surface roughness. The quality characteristic of all responses was smaller-is-better. Since all process variables had three levels, except tool material which had two levels. The experimental design used L_{18} orthogonal array with replication.

Experimental results have shown that machining performance in the drilling process can be improved effectively through this method. The drilling process variables which significantly affected thrust force, torque, circularity, and surface roughness are tool material followed by feed rate, spindle speed and point angle.

Keywords: *composite, Taguchi, GRA, thrust force, torque*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah. Saya bersaksi bahwa tiada Tuhan selain Allah. Rasa syukur penulis panjatkan atas segala nikmat, petunjuk, karunia dan pertolongan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“OPTIMASI MULTI RESPON DENGAN GABUNGAN METODE TAGUCHI-GRA PADA PENGGURDIAN KOMPOSIT GLASS 7781/EPOXY YANG DITUMPUK”**. 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. Ayah, Ibu, Adik Rahma, Adik Ginting dan segenap keluarga penulis yang telah memberikan segalanya bagi penulis.
2. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
3. Bapak Iwan Krisnanto, *Head of Design Center Division*, PT. Dirgantara Indonesia (Persero).
4. Bapak Ir. Sampurno, MT., Bapak Ir. Achmad Mulyana, dan Ir. Hari Subiyanto, M.Sc., sebagai dosen penguji Tugas Akhir.
5. Teman-teman seperjuangan Danny, Endah, Naya dan wisudawan 112 lainnya.
6. Sahabat dan keluargaku Arfi, Supri, Tyas, Nava, Puput, Eka M, Anas, Beta, Chika, Mumu, Aulia, Dewi, Danu, Pepeng, Erni, Fitri, Acol, Derry, Danan, Ganda, Tetra dan sahabat ku satu angkatan M53.

7. Teman-teman lab manufaktur Teknik Mesin-ITS, Pak Gianto, Mas Reza, Mas Faisal, Mas Amirul, Mas Hasriadi, Mas Dhian, Mas Wahid, Mas Farrih dan Mas Mega.
8. Pak M. Nur Yuniarto yang telah memberikan ijin untuk melakukan penelitian di gedung riset mobil listrik ITS.
9. Mas Yusuf dan Mas juni yang telah membantu penulis melakukan penelitian di gedung riset mobil listrik ITS.
10. Teman-teman pemandu KIPAS.
11. Teman-teman BPH HMM periode 2012-2013.
12. Mas Randy yang bersedia berbagi ilmu dengan penulis.
13. Pak Sajidin dan pak Winarto dari D3 Mesin ITS.
14. Pak Martono dari PT. BBI yang membantu penulis melakukan pengukuran kebulatan.
15. Seluruh staff dan pengajar Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.
16. Teman-teman voli dan bulutangkis Jurusan Teknik Mesin.
17. Teman-teman, senior dan junior departemen hubungan luar HMM FTI-ITS.
18. SC saya, mas Ahmad Nurdin Arpah.
19. Bapak/Ibu guru SMKN 1 Madiun yang telah memotivasi saya masuk ke ITS
20. Mas Iik Hamki Setiawan yang telah mendukung dan mendoakan 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 2015
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.....	5
1.2 Perumusan masalah.....	5
1.2.1 Batasan masalah.....	5
1.2.2 Asumsi penelitian.....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Sitematika penulisan.....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI... 9	9
2.1 Tinjauan pustaka.....	9
2.2 Dasar teori.....	11
2.2.1 Material komposit.....	11
2.2.1.1 Pengertian material komposit.....	11
2.2.1.2 Klasifikasi material komposit.....	15
2.2.1.3 <i>Fiber reinforced composite material</i>	17
2.2.1.4 <i>Polymer matrix composite</i>	18
2.2.1.5 <i>Multi directional gelas 7781/epoxy</i>	19
2.2.2 Proses gurdi.....	20
2.2.3 Geometri pahat.....	22
2.2.4 Gaya pemotongan pada proses gurdi.....	24
2.2.5 Toleransi bentuk dan kebulatan.....	28
2.2.5.1 Toleransi bentuk.....	28
2.2.5.2 Kebulatan.....	30
2.2.6 Kekasaran permukaan.....	32
2.2.7 Metode Taguchi.....	38

2.2.7.1	Prosedur eksperimen.....	39
2.2.8	Metode Taguchi- <i>grey relational analysis</i> (GRA).....	48
2.2.9	Interpretasi hasil eksperimen.....	52
2.2.10	Eksperimen konfirmasi.....	53
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN.....	55
3.1	Diagram alir penelitian.....	55
3.2	Variabel penelitian.....	58
3.3	Karakteristik variabel respon optimal.....	58
3.4	Bahan dan peralatan penelitian.....	59
3.4.1	Bahan penelitian.....	59
3.4.2	Peralatan penelitian.....	62
3.5	Pemilihan matriks orthogonal.....	66
3.6	Prosedur percobaan.....	70
3.7	Pengukuran dan pengambilan data.....	72
3.7.1	Pengukuran dan pengambilan data gaya tekan dan momen torsi.....	72
3.7.2	Pengukuran dan pengambilan data kebulatan.....	73
3.7.3	Pengukuran dan pengambilan data kekasaran permukaan.....	74
3.8	Pengerjaan optimasi multi respon.....	75
3.7	Eksperimen konfirmasi.....	75
BAB 4	HASIL DAN ANALISA DATA.....	77
4.1	Data hasil pengukuran.....	77
4.2	Optimasi multirespon Taguchi-GRA.....	79
4.2.1	Penghitungan rasio S/N.....	79
4.2.2	Normalisasi rasio S/N.....	80
4.2.3	Perhitungan <i>deviation sequence</i>	82
4.2.4	Perhitungan <i>grey relational coefficient</i> (GRC) dan <i>grey relational grade</i> (GRG)....	83
4.2.5	Kombinasi variabel proses untuk respon optimal.....	84
4.2.6	Analisis variansi dan persen kontribusi.....	86
4.2.7	Prediksi multi respon optimal dan interval	

keyakinan.....	90
4.2.8 Eksperimen Konfirmasi.....	91
4.2.9 Perbandingan antara respon hasil kombinasi awal dengan respon hasil kombinasi optimum.....	95
4.2.10 Pengujian perbedaan respon hasil kombinasi awal dan hasil kombinasi optimum.....	99
4.2.11 Pengaruh variabel proses yang signifikan terhadap GRG.....	101
4.3 Pengaruh variabel proses terhadap respon individu.....	104
4.3.1 Pengaruh variabel proses terhadap gaya Tekan.....	105
4.3.2 Pengaruh Variabel Proses terhadap Torsi.....	106
4.3.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Kebulatan	106
4.3.4 Pengaruh Variabel Proses terhadap Kekasaran permukaan.....	107
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	109
5.1 Kesimpulan.....	109
5.1 Saran.....	110
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat-sifat mekanik dari bahan serat fiber dan <i>wire</i> (Jones, 1975).....	17
Tabel 2.2 Perbandingan properti komposit dengan matriks polimer untuk 3 jenis serat penguat (gelas, karbon dan aramid) pada fraksi volume fiber 0,60 (Callister, 2007).....	19
Tabel 2.3 Sifat fisik/mekanik material komposit gelas 7781/ <i>epoxy</i> (DI, 2014).....	20
Tabel 2.4 Jenis toleransi bentuk dan posisi dengan simbolnya menurut ISO (Rochim, 2001).....	29
Tabel 2.5 Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran (Rochim, 1993).....	34
Tabel 2.6 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan (Rochim, 1993).....	36
Tabel 2.7 Hubungan antara R_a , R_z , dan R_{max} (Rochim, 1993).....	37
Tabel 2.8 Hubungan antara panjang sampel (l) dan kekasaran permukaan.....	37
Tabel 2.9 Tabel analisis variansi.....	45
Tabel 2.10 Penempatan rasio S/N.....	50
Tabel 2.11 Tabel respon <i>grey relational grade</i> (GRG).....	52
Tabel 3.1 Total derajat kebebasan variabel proses dan levelnya.....	67
Tabel 3.2 Rancangan percobaan Taguchi.....	68
Tabel 3.3 Variabel proses dan levelnya.....	68
Tabel 3.4 Tampilan data hasil eksperimen.....	69
Tabel 4.1 Data hasil eksperimen.....	78
Tabel 4.2 Rasio S/N pada masing-masing respon.....	80
Tabel 4.3 Normalisasi rasio S/N pada masing-masing Respon.....	81
Tabel 4.4 <i>Deviation sequence</i> pada masing-masing respon.....	82
Tabel 4.5 GRC dan GRG pada masing-masing respon.....	83

Tabel 4.6 Nilai rata-rata GRG pada masing-masing level variabel proses.....	84
Tabel 4.7 Kombinasi variabel proses untuk respon optimal.....	85
Tabel 4.8 ANAVA untuk GRG.....	87
Tabel 4.9 ANAVA dan Persen Kontribusi untuk GRG.....	89
Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi pada Masing-masing Respon.....	92
Tabel 4.11 Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi.....	92
Tabel 4.12 Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi.....	92
Tabel 4.13 <i>Deviation sequence</i> masing-masing respon.....	93
Tabel 4.14 GRG Eksperimen Konfirmasi pada Kombinasi optimum.....	93
Tabel 4.15 Kombinasi Variabel proses untuk Kombinasi Awal.....	96
Tabel 4.16 Hasil Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal.....	96
Tabel 4.17 Rasio S/N Eksperimen Kombinasi Awal.....	96
Tabel 4.18 Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Kombinasi Awal.....	97
Tabel 4.19 <i>Deviation Sequence</i> Masing-Masing Respon.....	97
Tabel 4.20 GRG Eksperimen Kombinasi Awal.....	97
Tabel 4.21 Perbandingan GRG Kombinasi Awal dengan Kombinasi optimum.....	98
Tabel 4.22 Perbandingan Respon dengan Menggunakan Kombinasi awal dengan Kombinasi Optimum..	98
Tabel 4.23 Hasil Uji Kenormalan.....	99
Tabel 4.24 Hasil Uji Kesamaan Variansi.....	100
Tabel 4.25 Hasil Uji Kesamaan Rata-Rata.....	101
Tabel 4.26 Persen Kontribusi Variabel Proses terhadap Respon Individu.....	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komposisi komposit (Rijswijk <i>et al.</i> , 2001).....	11
Gambar 2.2 Diagram uji tarik pada FRP komposit (Callister, 2007).....	13
Gambar 2.3 Klasifikasi komposit berdasarkan Matriksnya.....	15
Gambar 2.4 Klasifikasi komposit berdasarkan strukturnya (Callister, 2007).....	16
Gambar 2.5 Elemen dasar proses gurdi (Rochim, 1993).....	21
Gambar 2.6 Geometri pahat gurdi (<i>twist drill</i>) (Widarto, 2008)	23
Gambar 2.7 a). Teori pemotongan geram.....	25
Gambar 2.7 b). Arah gaya-gaya reaksi pemotongan (lingkaran gaya Merchant).....	25
Gambar 2.7 c). Penampang geram (Rochim, 1993).....	25
Gambar 2.8 Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993).....	27
Gambar 2.9 Toleransi untuk geometrik kebulatan (Rochim, 2001).....	30
Gambar 2.10 Grafik polar dari empat jenis lingkaran referensi(Rochim, 2001).....	31
Gambar 2.11 Bentuk kekasaran dan penggelombangan pada permukaan (Dagnall, 1980).....	32
Gambar 2.12 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 1993).....	32
Gambar 2.13 Penyimpangan rata-rata aritmatika (Rochim, 1993).....	33
Gambar 2.14 Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik (Rochim, 1993).....	35
Gambar 2.15 Ketidakrataan ketinggian maksimum (Rochim, 1993).....	35
Gambar 2.16 Langkah-langkah proses optimasi.....	49

Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	55
Gambar 3.2 a.) Pahat HSS.....	60
Gambar 3.2 b.) Pahat HSS- <i>Cobalt</i>	60
Gambar 3.3 Variasi sudut ujung pahat.....	60
Gambar 3.4 Komposit gelas 7781/ <i>epoxy</i>	61
Gambar 3.5 Spesimen penelitian	61
Gambar 3.6 Lubang diameter 7 mm pada spesimen penelitian	62
Gambar 3.7 Mesin CNC HAAS VF-3.....	62
Gambar 3.8 Dinamometer tipe 9272.....	63
Gambar 3.9 Akusisi data tipe 5697A.....	63
Gambar 3.10 <i>Charge amplifier</i> type 5070A.....	64
Gambar 3.11 Compaq presario CQ35-336TX.....	64
Gambar 3.12 <i>Roundtest</i> Roncorder model EC-3D.....	64
Gambar 3.13 Mistar ingsut.....	65
Gambar 3.14 Mitutoyo <i>surf test</i> SJ-310.....	65
Gambar 3.15 <i>Back up plate</i>	66
Gambar 3.16 <i>Tachometer</i> digital.....	66
Gambar 3.17 Pemasangan benda kerja pada dinamometer.....	71
Gambar 3.18 Pemasangan instrumentasi dinamometer	72
Gambar 3.19 a.) Grafik gaya tekan.....	73
Gambar 3.19 b.) Grafik momen torsi.....	73
Gambar 3.20 a.) Grafik pengukuran kebulatan.....	74
Gambar 3.20 b.) Alat ukur kebulatan.....	74
Gambar 3.21 b.) Instalasi peralatan pengukuran kekasaran permukaan.....	75
Gambar 3.21 a.) Pemasangan spesimen pada ragam.....	75
Gambar 4.1 Grafik nilai rata-rata GRG pada masing-masing level variabel proses.....	85
Gambar 4.2 Interval keyakinan hasil optimasi dan eksperimen konfirmasi.....	94
Gambar 4.3 Grafik rata-rata untuk respon GRG.....	102

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini penggunaan material komposit mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Material komposit telah banyak digunakan di berbagai bidang seperti industri penerbangan, otomotif, peralatan militer dan peralatan olah raga. Material komposit dipilih karena memiliki karakteristik tersendiri yang tak dimiliki oleh material konvensional lainnya. Kelebihan material komposit dibandingkan dengan material konvensional adalah memiliki kekuatan yang tinggi dengan berat yang rendah, sifat mampu bentuk yang baik, ketahanan terhadap korosi dan keausan yang tinggi, serta arah kekuatan yang dapat dikendalikan. Karena kelebihan inilah material komposit mulai banyak digunakan untuk menggantikan material konvensional.

Komposit adalah suatu jenis bahan baru hasil rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih bahan. Sifat masing-masing bahan penyusun komposit berbeda satu dengan lainnya, baik itu sifat kimia maupun fisiknya dan tetap terpisah dalam hasil akhir bahan tersebut (bahan komposit). Komposit tersusun atas dua fasa, yaitu matriks dan *filler* (penguat) atau fiber. Matriks berfungsi sebagai pelindung serat dan *filler* (penguat) atau fiber berfungsi sebagai penanggung beban utama pada komposit. Berdasarkan matriksnya komposit dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu matriks polimer, matriks logam dan matriks keramik. Berdasarkan penguatnya komposit dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu komposit partikel, komposit serat dan komposit berlapis.

Pada saat ini komposit yang sering digunakan adalah komposit dengan fasa penguat berupa fiber atau *fiber reinforced polymer* (FRP). Satu diantaranya adalah polimer yang diperkuat serat gelas atau *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Komposit jenis ini menggunakan serat gelas sebagai fasa penguat. GFRP termasuk dalam jenis *polymer matrix composite* (PMC) karena matriks yang digunakan adalah polimer *epoxy*. Penggunaan serat

gelas sebagai fasa penguat adalah karena kelebihan yang dimilikinya, yaitu kekuatan dan kekakuan yang tinggi serta biaya produksi yang lebih murah dibandingkan dengan jenis komposit lainnya. Penggunaan polimer *epoxy* sebagai matriks adalah karena kelebihan yang dimilikinya, yaitu ringan, serta memiliki *specific stiffness* dan *specific strength* yang tinggi.

Proses pemesinan yang sering digunakan pada material komposit adalah proses gurdi. Proses gurdi merupakan proses pemesinan yang menghasilkan lubang silindris pada benda kerja logam ataupun non-logam untuk proses perakitan antara satu komponen dengan komponen lainnya. Proses gurdi dengan menggunakan pahat gurdi puntir (*twist drill*) merupakan proses yang paling ekonomis dan efisien untuk pembuatan lubang yang digunakan untuk perakitan struktur pada industri penerbangan dan industri otomotif (Tsao, 2008). Kinerja dari proses gurdi pada material komposit dapat dievaluasi berdasarkan beberapa karakteristik kualitas seperti kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan ketinggian *burr*. Selain itu, gaya tekan, torsi, kebulatan, dan delaminasi yang terjadi pada *entry* dan *exit* lubang hasil penggurdian juga dapat digunakan untuk mengevaluasi proses gurdi pada material komposit (Nagaraja *et al.*, 2013). Pada proses pemesinan secara umum, ukuran-ukuran kinerja tersebut biasanya juga dijadikan respon yang merupakan fungsi dari variabel-variabel proses atau faktor. Khusus pada proses gurdi, variabel atau faktor yang mempengaruhi karakteristik kualitas ataupun ukuran-ukuran kinerja adalah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan spindle dan kecepatan makan.

Metode Taguchi sangat populer untuk memecahkan masalah optimasi pada bidang rekayasa manufaktur. Metode ini menggunakan desain eksperimen yang disebut matriks ortogonal dan rasio S/N untuk mengoptimasi fungsi tujuan yang akan dioptimalkan dalam eksperimen. Terdapat tiga kategori dalam karakteristik kualitas, yaitu *smaller is better* yang digunakan saat nilai yang semakin kecil diinginkan, *nominal the best* yang digunakan saat nilai yang dituju diinginkan dan *bigger is better*

yang digunakan saat nilai yang semakin besar diinginkan. 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 mampu memecahkan masalah optimasi dengan respon tunggal, akan tetapi pada 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). *Grey relational analysis* (GRA) yang didasarkan pada teori sistem *grey* dapat digunakan untuk mengatasi kekurangan informasi yang tidak lengkap dan tidak jelas (Deng, 1989). Melalui GRA, *grey relational grade* (GRG) diperoleh untuk mengevaluasi respon yang jumlahnya banyak. Sebagai hasilnya, optimasi dari respon yang berjumlah banyak dapat diubah menjadi optimasi dari satu *relational grade* (Lin dan Lin, 2002).

Palanikumar (2011) melakukan penelitian untuk mengoptimasi proses penggurdian material komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa gerak makan memiliki kontribusi sebesar 72,49% dan kecepatan spindel memiliki kontribusi sebesar 12,73% untuk mengurangi variansi dari respon secara serentak. Untuk meminimalkan respon yang diamati secara serentak, kecepatan spindel diatur pada 2500 rpm dan gerak makan diatur pada 100 mm/min.

Ranganathan *et al.* (2012) melakukan penelitian untuk mengoptimasi proses penggurdian benda kerja komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa gerak makan memiliki kontribusi sebesar 76,3% dan kecepatan spindel memiliki kontribusi sebesar 22,7% untuk mengurangi variansi dari respon secara serentak. Pengaturan kombinasi variabel-variabel proses yang tepat untuk meminimalkan respon secara serentak yaitu gerak makan diatur

pada 0,16 mm/putaran dan kecepatan spindel diatur pada 1200 rpm.

Palanikumar *et al.* (2012) melakukan penelitian pada penggurdian material komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa gerak makan memiliki kontribusi sebesar 60,47%, diameter pahat memiliki kontribusi sebesar 36,75% dan kecepatan spindel memiliki kontribusi sebesar 1,11% untuk mengurangi variansi dari respon secara serentak. Pengaturan kombinasi variabel-variabel proses yang tepat untuk meminimalkan respon secara serentak adalah gerak makan diatur pada 300 mm/min, diameter pahat diatur pada 6 mm dan kecepatan spindel diatur pada 2500 rpm.

Material komposit diproduksi dengan berbagai dimensi panjang, lebar dan ketebalan. Ketebalan material komposit dapat diatur dengan susunan antara serat fiber dan perekat yang digunakan pada proses pembuatan. Pada material komposit yang akan dirakit menjadi struktur mekanis, lubang diproduksi dalam jumlah yang besar serta memiliki susunan dan jarak antar lubang dengan kepresisian yang tinggi. Material komposit yang dipakai biasanya berupa pelat atau lembaran. Pada penggurdian material komposit yang tipis, untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya produksi, material komposit tersebut ditumpuk dan digurdi secara bersamaan. Selain karena alasan waktu dan biaya, penggurdian material komposit yang ditumpuk juga dapat menjamin kepresisian lubang pada pelat komposit dengan pelat komposit yang lain, yang akan dirakit menjadi satu struktur mekanis. Proses gurdi dan pengikatan struktur yang ditumpuk diperlukan untuk membuat sub-rakitan, kombinasi sub-rakitan menjadi rakitan utama, serta untuk perbaikan struktur (Park *et al.*, 2011).

Penggurdian material komposit yang ditumpuk berbeda jika dibandingkan dengan penggurdian material tersebut secara individu. Suatu penelitian mengenai pengaturan faktor-faktor pemesinan gurdi pada material komposit polimer yang diperkuat

serat gelas (GFRP) yang disusun secara tertumpuk untuk meminimalkan gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan secara serentak akan dilakukan. Faktor-faktor yang divariasikan adalah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan spindle dan kecepatan makan. Metode optimasi yang digunakan adalah metode Taguchi yang digabungkan dengan GRA.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apakah variabel-variabel proses gurdi (kecepatan spindle dan kecepatan makan) serta jenis dan geometri pahat (sudut ujung pahat) memiliki kontribusi untuk mengurangi variansi secara serentak dari respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan pada penggurdian material komposit yang ditumpuk.
2. Bagaimana pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses, jenis pahat dan geometri pahat pada proses gurdi sehingga dapat meminimumkan respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan secara serentak pada penggurdian material komposit yang ditumpuk.

1.2.1 Batasan Masalah

Agar penyelesaian masalah dapat tetap terarah, maka batasan masalah yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan benda kerja adalah material komposit gelas 7781/epoxy dengan jumlah lapisan serat 10 lapis dengan tebal 3mm.
2. Tidak membahas proses pembuatan material komposit.
3. Pahat gudi terbuat dari HSS dan HSS-Cobalt.
4. Pahat gurdi memiliki 2 alur/*flute*.
5. Jenis pahat gurdi yang digunakan adalah *straight twist drill*.

6. Dinamometer yang digunakan adalah KISTLER tipe 9272.
7. Mesin yang digunakan adalah CNC *vertical milling*.
8. Proses gurdi tidak menggunakan cairan pendingin.

1.2.2 Asumsi Penelitian

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

1. Variabel-variabel yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Tidak ada interaksi antar variabel.
3. 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 kontribusi dari variabel-variabel proses gurdi (kecepatan spindel dan kecepatan makan) serta jenis dan geometri pahat (sudut ujung pahat) untuk mengurangi variansi secara serentak dari respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan pada penggurdian material komposit yang ditumpuk.
2. Mengetahui pengaturan level-level dari variabel-variabel proses, jenis pahat dan geometri pahat proses gurdi yang dapat meminimumkan respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan secara serentak pada penggurdian material komposit yang ditumpuk.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian yang berkaitan dengan analisis gaya tekan,

- torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan pada proses gurdi dengan *twist drill*.
2. Bagi industri manufaktur dapat digunakan untuk membantu menentukan variabel-variabel proses secara tepat yang sesuai dengan material benda kerja yang akan dikerjakan.
 3. Dapat digunakan sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya yang berkaitan dengan proses gurdi dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi variabel-variabel proses gurdi.

1.5 Sistematika Penulisan

Gambaran umum mengenai isi dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang dari penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, asumsi penelitian, tujuan dan manfaat dari penelitian yang dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu tinjauan pustaka dan dasar teori. Tinjauan pustaka berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada kaitannya dengan penelitian ini, sedangkan dasar teori berisi hal-hal yang menunjang proses penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menerangkan metode penelitian yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA DATA

Bab ini menjelaskan hasil-hasil pengukuran gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan pada proses gurdi material komposit. Pada bab ini juga dibahas analisis dan hasil optimasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi penarikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan pemberian saran.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB II TINJAUAN PUSTAKA & DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Proses pemesinan sangat diperlukan dalam proses produksi. Proses pemesinan digunakan dalam pengerjaan material seperti *finishing, trimming, grinding, drilling* dan lain-lain. Pada material komposit, proses pemesinan seperti proses gurdi (*drilling*) merupakan proses yang paling sering digunakan untuk keperluan perakitan komponen pada struktur mekanis. Karena banyaknya variasi pada material benda kerja, peralatan potong, kondisi pemotongan dan kombinasinya maka akan sulit untuk membuat persamaan untuk melakukan prediksi nilai gaya tekan dan torsi yang timbul pada proses yang rumit seperti proses gurdi (Vankanti dan Ganta, 2013). Kualitas dari permukaan potong material komposit (FRP) yang diproses dengan peralatan konvensional sangat tergantung pada variabel pemotongan, geometri pahat, material pahat, material benda kerja, proses pemesinan dan lain-lain (Abrao *et al.*, 2007). Kesalahan pada pemilihan parameter-parameter tersebut akan menimbulkan turunnya kualitas lubang yang dihasilkan dari proses penggurdian.

Ranganathan *et al.* (2012) melakukan penelitian untuk mengoptimasi proses penggurdian material *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Respon yang diamati adalah delaminasi, gaya tekan dan torsi. Variabel proses yang digunakan adalah kecepatan spindle (600, 900, dan 1200 rpm) dan gerak makan (0,04, 0,08, 0,12, dan 0,16 mm/rev). Pahat gurdi yang digunakan terbuat dari material *tungsten carbide* dengan diameter 12 mm. Rancangan percobaan berupa matriks ortogonal L_{16} ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi dan metode *grey relational analysis* (GRA) yang digunakan sebagai metode optimasi multi respon. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa gerak makan yang diatur pada 0,16 mm/rev dan kecepatan spindle yang diatur pada 1200 rpm memberikan hasil yang optimal untuk proses gurdi material GFRP. Berdasarkan hasil analisis variansi (ANAVA),

gerak makan memiliki kontribusi sebesar 76,3% dan kecepatan spindle memiliki kontribusi sebesar 27,7% terhadap total variansi dari respon kekasaran permukaan, delaminasi, gaya tekan dan torsi.

Palanikumar (2011) melakukan penelitian untuk mengoptimasi proses penggurdian material komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Mesin yang digunakan adalah mesin CNC *machining centre*. Pahat yang digunakan adalah jenis *Brad and Spur drill* dengan diameter 8 mm. Variabel proses yang digunakan adalah kecepatan spindle (1000, 1500, 2000 dan 2500 rpm) dan kecepatan makan (100, 200, 300 dan 400 mm/menit). Metode penelitian menggunakan metode Taguchi yang digabungkan dengan *grey relational analysis* (GRA) dengan matriks ortogonal L_{16} . Respon yang diamati adalah gaya tekan, kekasaran permukaan dan delaminasi. Hasil dari penelitian ini adalah pengaturan variabel yang digunakan untuk meminimalkan respon gaya tekan, kekasaran permukaan dan delaminasi secara serentak berdasarkan perhitungan *grey relational grade* (GRG) adalah pada kecepatan spindle 2500 rpm dan kecepatan makan 100 mm/menit. Variabel yang paling signifikan mempengaruhi GRG adalah kecepatan makan dengan persen kontribusi sebesar 72.49% diikuti oleh kecepatan spindle dengan persen kontribusi sebesar 12.73%.

Palanikumar *et al.* (2012) melakukan penelitian untuk mengoptimasi proses penggurdian material komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Penelitian ini menggunakan kombinasi metode Taguchi dan *grey relational analysis* (GRA). Rancangan percobaan menggunakan matriks ortogonal L_9 . Variabel-variabel proses yang digunakan adalah kecepatan spindle (500, 150 dan 2500 rpm), kecepatan makan (100, 300 dan 500 mm/min) dan pahat yang digunakan adalah jenis *Brad and Spur drill* dengan diameter pahat sebesar (6, 8 dan 10 mm). Respon yang diamati adalah gaya tekan dan kekasaran permukaan. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa gerak makan memiliki kontribusi sebesar 60,47%, diameter pahat memiliki

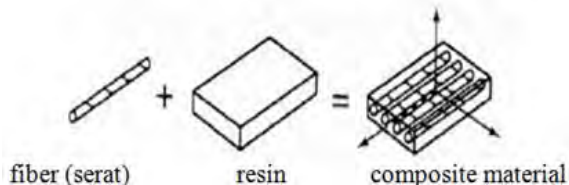
kontribusi sebesar 36,75% dan kecepatan spindle memiliki kontribusi sebesar 1,11% untuk mengurangi variansi dari respon secara serentak. Pengaturan variabel-variabel proses untuk meminimalkan respon yang diamati secara serentak adalah kecepatan spindle sebesar 2500 rpm, gerak makan sebesar 300 mm/min dan diameter pahat sebesar 6 mm.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Material Komposit

2.2.1.1 Pengertian Material Komposit

Material komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopis menjadi suatu bahan yang berguna (Jones, 1975). Rijswijk *et al.* (2001) menjelaskan komposit adalah bahan hibrida yang terbuat dari resin polimer diperkuat dengan serat, menggabungkan sifat-sifat mekanik dan fisik. Ilustrasi ikatan dan sifat fisik polimer dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Komposisi komposit (Rijswijk *et al.*, 2001)

Bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro yang didefinisikan sebagai suatu sistem material yang tersusun dari campuran atau kombinasi dua atau lebih unsur-unsur utama yang secara makro berbeda dalam bentuk dan atau komposisi material yang tidak dapat dipisahkan (Schwartz, 1984). Material komposit mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. Bobotnya ringan.
2. Mempunyai kekuatan dan kekakuan yang baik.
3. Biaya produksi murah.
4. Tahan korosi.

Material komposit terdiri dari dua buah penyusun, yaitu *filler* (bahan pengisi) dan matriks. Adapun definisi dari keduanya adalah sebagai berikut:

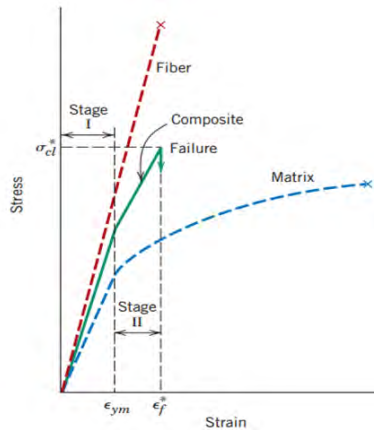
1. *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, biasanya berupa serat atau serbuk. Serat yang sering digunakan dalam pembuatan komposit antara lain serat *E-glass*, boron, karbon dan lain sebagainya. Bisa juga dari serat alam antara lain serat kenaf, jute, rami, cantula dan lain sebagainya.
2. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Fungsi dari matriks dalam komposit antara lain:
 1. Mengikat serat menjadi satu kesatuan struktur.
 2. Melindungi serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan.
 3. Mentransfer dan mendistribusikan beban ke serat.
 4. Menyumbangkan beberapa sifat seperti, kekakuan, ketangguhan dan tahanan listrik.

Tujuan dibuatnya komposit yaitu memperbaiki sifat mekanik atau sifat spesifik tertentu, mempermudah desain yang sulit pada manufaktur, keleluasaan dalam bentuk atau desain yang dapat menghemat biaya produksi dan menjadikan bahan lebih ringan. Komposit yang diproduksi oleh suatu instansi atau pabrik biasanya dapat diprediksi sifat mekanik dari bahan komposit berdasarkan bahan matriks dan bahan penguatnya (Callister, 2007). Adapun beberapa sifat mekanik yang dapat diprediksi dari komposit yaitu kekuatan tarik dan kelayakan sebagai material komposit (validitas komposit).

Dalam komposit, kekuatan tarik dipengaruhi oleh kekuatan *interface*-nya. Dari pengujian kekuatan *interface* sangat sulit ditentukan karena prosesnya yang tidak sederhana, sehingga hasil

pengujian juga sangat sulit ditentukan karena adanya faktor teknis pembuatan spesimen. Untuk komposit polimer/serat, perbedaan campuran unsur matriks dan perbedaan serat juga menghasilkan kekuatan *adhesive* yang berbeda sehingga tidak jarang serat akan putus sebelum terlepas dari matriksnya. Gambar 2.2 merupakan diagram kekuatan tarik yang terjadi pada komposit berpenguat serat (*fiber reinforced composite*). Secara keseluruhan sifat komposit ini dipengaruhi oleh:

1. Sifat dari serat/penguat.
2. Sifat dari matriks penyusun komposit.
3. Fraksi volume serat dan matriks penyusun.
4. Orientasi serat pada komposit tersebut.



Gambar 2.2 Diagram uji tarik pada FRP komposit
(Callister, 2007)

Adapun besarnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh komposit polimer/serat dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan 2.1. Persamaan ini dapat digunakan oleh peneliti untuk mengetahui sejauh mana besarnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh komposit berdasarkan matriks dan penguat penyusunnya. Berikut ini persamaan *tensile prediction* (Callister, 2007):

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (2.1)$$

Dengan:

σ_c = kekuatan tarik komposit (MPa)

σ_m = kekuatan tarik matriks (MPa)

σ_f = kekuatan tarik penguat (MPa)

V_m = fraksi volume matriks

V_f = fraksi volume penguat

Jumlah kandungan serat dalam komposit merupakan hal yang menjadi perhatian khusus pada komposit berpenguat serat. Untuk memperoleh komposit berkekuatan tinggi, distribusi serat dengan matriks harus merata pada proses pencampuran agar mengurangi timbulnya *void*. Untuk menghitung fraksi volume, parameter yang harus diketahui adalah densitas resin, densitas penguat, massa matriks dan massa penguat. Adapun fraksi volume ditentukan dengan persamaan (Callister, 2007):

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (2.2)$$

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} W_f = 1 - V_m \quad (2.3)$$

Jika selama pembuatan komposit diketahui berat penguat dan berat matriks, serta densitas penguat dan densitas matriks, maka fraksi volume dan fraksi penguat dapat dihitung dengan persamaan (Callister, 2007):

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad (2.4)$$

Dengan:

W_f = fraksi berat penguat

w_f = berat penguat (gr)

w_c = berat komposit (gr)

ρ_f = densitas penguat (gr/cm^3)

ρ_c = densitas komposit (gr/cm^3)

v_f = fraksi volume penguat

v_m = fraksi volume matriks

V_f = volume penguat (cm^3)

V_m = volume matriks (cm^3)

2.2.1.2 Klasifikasi Material Komposit

Berdasarkan matriks yang digunakan, komposit dapat dikelompokkan atas (Callister, 2007):

1. *Ceramic matrix composite* (CMC)

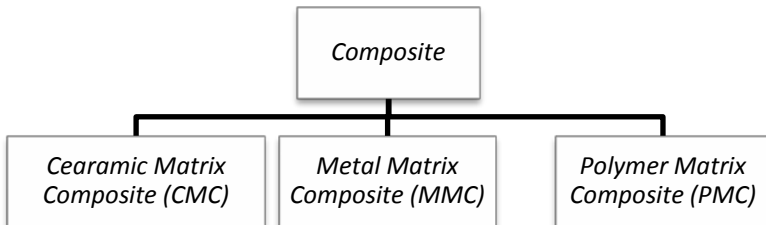
CMC merupakan material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai penguat dan satu fasa sebagai matriks, dimana matriksnya terbuat dari keramik. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah oksida, karbida dan nitrida.

2. *Metal matrix composite* (MMC)

MMC adalah salah satu jenis komposit yang memiliki matriks logam. Pada mulanya yang diteliti adalah *continous filamen* MMC yang digunakan dalam industri penerbangan.

3. *Polymer matrix composite* (PMC)

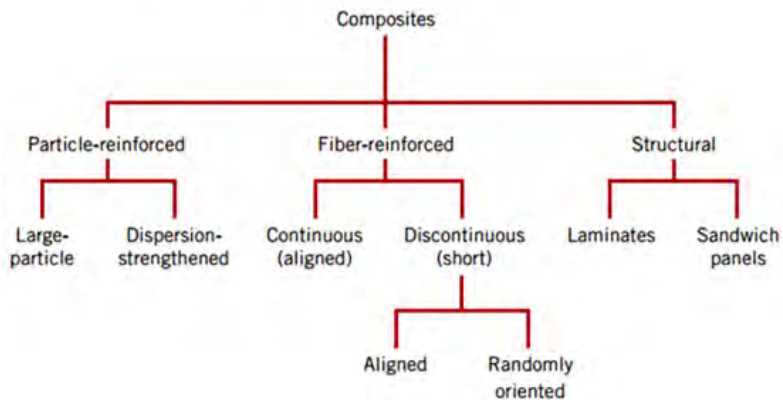
PMC merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks polimer terbagi menjadi dua, yaitu termoset dan termoplastik. Perbedaannya, polimer termoset tidak dapat didaur ulang, sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan. Jenis-jenis termoplastik yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS), *polyethylene* (PE) dan lain-lain. Gambar 2.3 menunjukkan bagan pengelompokan komposit berdasarkan matriks yang digunakan.



Gambar 2.3 Klasifikasi komposit berdasarkan matriksnya

Berdasarkan strukturnya komposit dibedakan atas (Callister, 2007):

1. *Particulate composite materials* (komposit partikel)
Merupakan *jenis* komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*.
2. *Fiber composite materials* (komposit serat)
Komposit yang terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat.
3. *Structural composite materials* (komposit berlapis)
Komposit yang terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk memperoleh bahan yang berguna. Untuk lebih jelasnya, pembagian komposit berdasarkan strukturnya dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Klasifikasi komposit berdasarkan strukturnya (Callister, 2007).

2.2.1.3 Fiber Reinforced Composite Material

Material komposit yang dibahas dalam penelitian ini adalah jenis *fiber reinforced* yaitu komposit yang terdiri dari serat-serat sebagai penguat yang diikat dengan matriks. Tujuan dibuatnya material ini adalah agar material memiliki kekuatan dan modulus spesifik yang tinggi (Callister, 2007). Bahan serat yang sering digunakan sebagai penguat adalah gelas, aramid dan karbon (*graphite*).

Material dalam bentuk serat mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan material dalam bentuk *bulk* karena serat mempunyai ukuran yang mendekati ukuran kristal, sehingga dislokasi yang ada lebih kecil dibandingkan dislokasi pada material dalam bentuk *bulk*. Matriks yang digunakan sebagai pengikat serat juga dapat berfungsi untuk mengalirkan tegangan dari satu serat ke serat lainnya, selain itu juga untuk meneruskan tegangan pada serat yang putus. Material matriks memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan material serat, karena fungsi utamanya hanya sebagai pengikat serat. Tabel 2.1 menunjukkan sifat-sifat mekanik dari bahan serat fiber dan *wire*.

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Mekanik dari Bahan Serat Fiber dan *Wire*
(Jones, 1975)

Fiber or Wire	Density, ρ (kN/m ³)	Tensile strength, S (Gpa)	S/ ρ (km)	Tensile stiffness, E (Gpa)	E/ ρ (Mm)
Aluminium	26.3	0.62	24	73	2.8
Titanium	46.1	1.90	41	115	2.5
Steel	76.6	4.10	54	207	2.7
E-Glass	25.0	3.40	136	72	2.9
S-Glass	24.4	4.80	197	86	3.5
Carbon	13.8	1.70	123	190	14.0
Beryllium	18.2	1.70	93	300	16.0
Boron	25.2	3.40	137	400	16.0
Graphite	13.8	1.70	123	250	18.0

2.2.1.4 *Polymer Matrix Composite*

Polymer matrix composite (PMC) mengandung polimer resin sebagai matriks dengan serat fiber sebagai penguat. Material ini banyak digunakan di berbagai aplikasi komposit karena beberapa kelebihan, yaitu biaya pembuatan yang lebih rendah dan dapat dibuat dengan produksi massal. Polimer memiliki sifat-sifat antara lain ketangguhan yang baik, ketahanan simpan yang baik, siklus fabrikasi yang dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk dan lebih ringan dibandingkan dengan jenis matriks yang lain. Jenis polimer yang banyak digunakan adalah (Callister, 2007):

1. Termoplastik

Termoplastik adalah plastik yang dapat dilunakkan berulang kali (*recycle*) dengan menggunakan panas. Termoplastik merupakan polimer yang akan menjadi keras apabila didinginkan. Termoplastik meleleh pada suhu tertentu, melekat mengikuti perubahan suhu dan mempunyai sifat dapat balik (*reversibel*) kepada sifat aslinya yaitu kembali mengeras bila didinginkan.

2. Termoset

Termoset tidak dapat mengikuti perubahan suhu (*irreversibel*). Bila sekali pengerasan telah terjadi, maka bahan tidak dapat dilunakkan kembali. Pemanasan yang tinggi tidak akan melunakkan termoset, melainkan akan membentuk arang dan terurai. Plastik jenis termoset tidak begitu baik dalam proses daur ulang karena selain sulit penanganannya, volumenya juga jauh lebih sedikit (sekitar 10%) dari volume jenis plastik yang bersifat termoset.

Beberapa klasifikasi PMC berdasarkan jenis penguatnya antara lain (Callister, 2007):

1. *Glass fiber reinforced polymer* (GFRP) *composites*
2. *Carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) *composites*
3. *Aramid fiber reinforced polymer* *composites*

Perbandingan ketiga jenis komposit dengan matriks polimer diatas berdasarkan propertinya dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan Properti Komposit dengan Matriks Polimer untuk 3 Jenis Serat Penguat (Gelas, Karbon Dan Aramid) pada Fraksi Volume Fiber 0,60 (Callister, 2007).

<i>Property</i>	<i>Glass (E-glass)</i>	<i>Carbon (High Strength)</i>	<i>Aramid (Kevlar 49)</i>
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa (10 ⁶ psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa (10 ⁶ psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

Source: Adapted from R. F. Floral and S. T. Peters, "Composite Structures and Technologies," tutorial notes, 1989.

Ketiga jenis fiber diatas merupakan jenis fiber yang paling sering digunakan sebagai penguat pada material komposit dengan matriks polimer. Selain ketiga jenis fiber diatas beberapa jenis fiber juga digunakan antara lain boron, karbida silikon dan oksida aluminium.

2.2.1.5 Komposit Gelas 7781/Epoxy

Filler (penguat) yang digunakan pada komposit jenis ini adalah serat fiber yaitu *E-glass*, sedangkan matriks yang digunakan yaitu polimer *epoxy*. Adanya dua penyusun material komposit ini menimbulkan beberapa daerah dan istilah penyebutannya. *Interphase* yaitu pelekat antar dua penyusun dan *interface* yaitu permukaan fasa yang berbatasan dengan fasa lain. Secara struktur mikro material komposit tidak merubah material pembentuknya, tetapi secara keseluruhan material komposit berbeda dengan material pembentuknya karena terjadi ikatan antar permukaan antara matriks dan *filler*. Ikatan antar permukaan ini terjadi karena adanya gaya adhesi dan kohesi (Callister, 2007).

Sifat maupun karakteristik dari komposit ditentukan oleh beberapa hal, antara lain material yang menjadi penyusun komposit, bentuk dan penyusunan struktural dari penyusun dan interaksi antar penyusun. Kekuatan komposit berbeda pada arah longitudinal (searah serat) dan transversal (tegak lurus arah serat). Tabel 2.3 menunjukkan sifat-sifat fisik/mekanik dari material komposit gelas 7781/*epoxy*.

Tabel 2.3 Sifat Fisik/Mekanik Material Komposit Gelas 7781/*Epoxy* (DI, 2014)

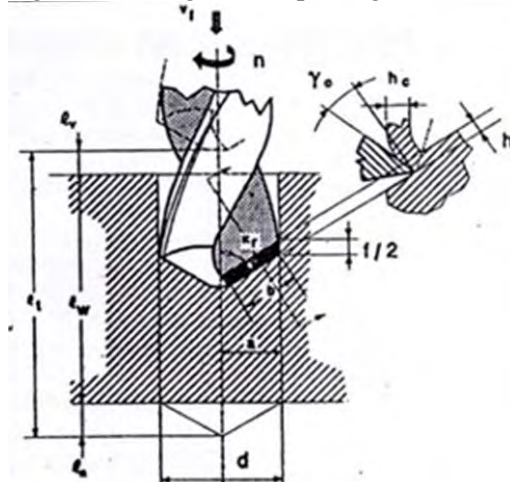
No.	Properties	Direction	Unit	Glass 7781/Epoxy
				Z-19.101
1	Tensile Modulus	Warp	Gpa	19
2		Weft	Gpa	17.5
3	Tensile Strength	Warp	Mpa	390
4		Weft	Mpa	350
5	Poisson Ratio	Warp		0.13
6		Weft		
7	Compressive	Warp	Gpa	19
8	Modulus	Weft	Gpa	20.5
9	Compressive	Warp	Mpa	400
10	Strength	Weft	Mpa	300
11	In-Plane Shear Modulu	G12	Gpa	4.2
12	In-Plane Shear Strength	S12	Mpa	55
13	Interlaminar		Mpa	55
14	Thickness per ply		mm	0.25
15	Density		g/cm ³	1.86
16	Hardness		HB	88.69

2.2.2 Proses Gurdi

Proses gurdi dimaksudkan sebagai proses pembuatan lubang bulat dengan menggunakan mata gurdi (*twist drill*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5, sedangkan proses bor (*boring*) adalah proses meluaskan/memperbesar lubang. Karakteristik proses gurdi agak berbeda dengan proses pemesian yang lain, yaitu:

- Geram harus keluar dari lubang yang dibuat.

- Geram yang keluar dapat menyebabkan masalah ketika ukurannya besar dan atau kontinu.
- Proses pembuatan lubang bisa sulit jika membuat lubang yang dalam.
- Untuk pembuatan lubang dalam pada benda kerja yang besar, cairan pendingin dimasukkan ke permukaan potong melalui tengah mata pahat gurdi.



Gambar 2.5 Elemen dasar proses gurdi (Rochim, 1993)

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

A. Pahat potong, yang berhubungan dengan:

a. Kecepatan potong

$$v = \frac{\pi dn}{1000} \text{ (m/menit)} \quad (2.5)$$

b. Gerak makan per mata potong

$$f_z = \frac{v_f}{nz} \text{ (mm/putaran)} \quad (2.6)$$

c. Kedalaman potong

$$a = \frac{d}{2} \text{ (mm)} \quad (2.7)$$

d. Lebar pemotongan

$$b = \frac{a}{\sin K_r} \text{ (mm)} \quad (2.8)$$

e. Luas pemotongan

$$A = a \frac{f}{2} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.9)$$

f. Lebar pemotongan sebelum terpotong

$$h = \frac{f}{2} \sin K_r \text{ (mm)} \quad (2.10)$$

g. Kecepatan penghasilan geram

$$Z = \frac{\pi d^2 v_f}{4.1000} \text{ (cm}^3\text{/menit)} \quad (2.11)$$

Dengan:

d = diameter pahat potong

z = jumlah mata potong

V_f = kecepatan makan

K_r = sudut potong utama

B. Benda kerja, yang menjelaskan panjang penggurdian sebagai:

$$L_t = L_v + L_w + L_n \quad (2.12)$$

Dengan:

L_t = panjang total langkah penggurdian (mm)

L_v = panjang langkah awal penggurdian (mm)

L_w = panjang penggurdian benda kerja (mm)

L_n = panjang langkah akhir penggurdian (mm)

$$L_n \geq \frac{(d/2)}{\tan K_r} \quad (2.13)$$

$$L_v = \frac{(d/2)}{\tan K_r} \quad (2.14)$$

C. Mesin perkakas gurdi, yang berhubungan dengan:

a. Putaran poros utama mesin

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi d} \text{ (putaran/menit)} \quad (2.15)$$

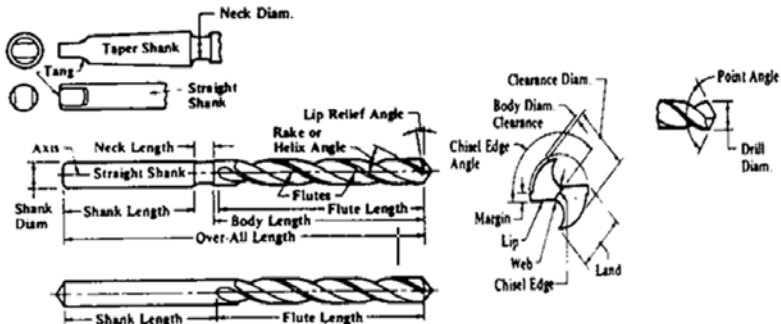
b. Waktu pemotongan

$$t_c = \frac{L_t}{V_f} \text{ (menit)} \quad (2.16)$$

2.2.3 Geometri Pahat

Sebagian besar dari proses gurdi dilakukan dengan menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pahat ini ditunjukkan pada Gambar 2.6. Di antara bagian-bagian

pahat tersebut yang paling utama adalah sudut puntir (*helix/rake angle*), sudut ujung pahat/sudut potong utama (*point angle/lift angle*) dan sudut bebas samping (*lip relief angle*).



Gambar 2.6 Geometri pahat gurdi (*twist drill*) (Widarto, 2008)

Sudut ujung pahat/sudut potong utama merupakan sudut yang terbentuk dari dua mata potong. Sudut ujung pahat mempengaruhi penampang geram sebelum terpotong. Besarnya sudut ujung pahat ditentukan oleh material benda kerja yang akan digunakan dalam proses gurdi. Material benda kerja yang keras memerlukan sudut yang lebih besar, seperti baja karbon dengan *ultimate strength* di atas 900 N/mm^2 yang memerlukan sudut ujung pahat berkisar antara 125° - 145° . Material benda kerja baja karbon dengan kekuatan tarik kurang dari 900 N/mm^2 memerlukan sudut ujung pahat sebesar 118° . Material benda kerja yang lunak memerlukan sudut yang lebih kecil/runcing, seperti aluminium yang memiliki sudut ujung pahat berkisar antara 90° - 118° .

Sudut puntir (*helix/rake angle*) merupakan sudut yang mempengaruhi proses pembentukan geram. Besarnya sudut puntir ditentukan oleh material benda kerja yang akan digunakan dalam proses gurdi. Material benda kerja yang keras memerlukan sudut puntir berkisar 20° - 30° , seperti baja karbon dengan *ultimate strength* sebesar 900 N/mm^2 . Material benda kerja yang lunak memerlukan sudut puntir berkisar antara 17° - 45° , seperti pada aluminium.

Sudut bebas samping (*lip relief angle*) berfungsi untuk mengurangi gesekan antara bidang utama pahat dengan bidang transien benda kerja (Rochim, 1993). Besarnya sudut bebas samping ditentukan oleh material benda kerja yang akan digunakan dalam proses gurdi. Material benda kerja yang keras memerlukan sudut bebas samping berkisar 7° - 15° , seperti baja karbon dengan *ultimate strength* sebesar 900 N/mm^2 . Benda kerja yang lunak memiliki sudut bebas samping berkisar 12° - 18° , seperti pada aluminium.

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 spindel mesin.

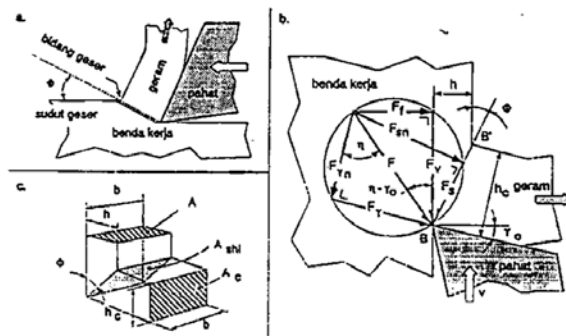
Berdasarkan jumlah *flute*, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Tragedi, 2010):

1. *Single flute drill*: pahat ini mempunyai satu *flute* dan digunakan untuk proses *drill* pada material plastik.
2. *Two flute drill*: pahat ini mempunyai dua *flute*.
3. *Three flute drill*: pahat ini merupakan tipe *twist drill* yang relatif baru dikembangkan pada proses pemotongan logam.
4. *Taper flute drill*: pahat ini termasuk tipe *drill* konvensional.

2.2.4 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi

Pemotongan pada proses gurdi dianggap sebagai akibat dari timbulnya 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 yang maksimum. Apabila tegangan geser tersebut melebihi kekuatan bahan benda kerja, maka akan 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 (Rochim, 1993). Gambar 2.7 menunjukkan pembentukan geram akibat tegangan geser yang dilakukan pahat terhadap benda kerja yang diambil dari lingkaran Merchant.



Gambar 2.7a). Teori pemotongan geram b). Arah gaya-gaya reaksi pemotongan (lingkaran gaya 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 terdistribusi secara merata pada bidang geser. Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.7.b, persamaan dari gaya potong teoritik F_v adalah (Rochim, 1993):

$$F_v = \frac{F_s \cos (\eta-\gamma_0)}{\cos (\phi + \eta-\gamma_0)} \text{ (N)} \quad (2.17)$$

Dengan:

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.18)$$

$$F_s = F \cos(\phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.19)$$

γ_0 = sudut geram

η = sudut gesek

ϕ = sudut geser

F adalah gaya total dan F_s adalah gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastik. F_s dapat ditentukan dengan menggunakan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi, yaitu (Rochim, 1993):

$$F_s = A_{shi} \tau_{shi} \text{ (N)} \quad (2.20)$$

Dengan:

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

Luas pemotongan adalah:

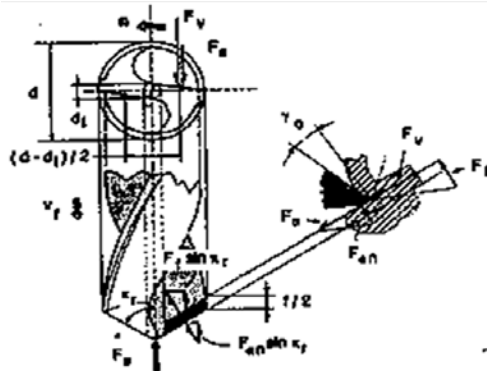
$$A = \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.21)$$

Dengan demikian gaya potong dapat dirumuskan sebagai:

$$F_v = \tau_{shi} A \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \eta - \gamma_0)} \text{ (N)} \quad (2.22)$$

$$F_v = \tau_{shi} \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \eta - \gamma_0)} \text{ (N)} \quad (2.23)$$

Pada proses gurdi yang menggunakan pahat dengan dua mata potong, gaya pemotongan pada salah satu mata potong dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu F_v dan F_t seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. F_t 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 2.8 Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993)

Berdasarkan Gambar 2.8, dapat diturunkan persamaan gaya tangensial, yaitu:

$$F_t = F_v + F_a \quad (\text{N}) \quad (2.24)$$

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

$$F_a = k_f \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} (\text{N}) \quad (2.25)$$

Substitusi persamaan 2.23 dan persamaan 2.25 kedalam persamaan 2.24 menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_t = \tau_{shi} \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta-\gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi+\eta-\gamma_0)} + k_f \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} (\text{N}) \quad (2.26)$$

Dengan:

τ_{shi} = tegangan geser pada bidang geser (N/mm²)

γ_0 = sudut geram

η = sudut gesek

ϕ = sudut geser

Momen torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat memutar pahat gurdi:

$$M_t = F_t \frac{d-d_i}{2} (\text{N/mm}) \quad (2.27)$$

Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung adalah:

$$F_z = 2 F_f \sin K_r + 2 F_{an} \sin K_r + F_e (N) \quad (2.28)$$

Dengan:

F_z = gaya tekan total untuk dua sisi potong (N)

F_f = gaya makan (N)

$$F_f = F_v \tan (\eta - \gamma_0) \quad (2.29)$$

F_{an} = gaya normal pada bidang utama potong, yang tergantung pada gaya normal spesifik persatuan panjang aktif mata potong (K_0 (N/mm)), dan dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

F_e = gaya ekstruksi yang terjadi di ujung pahat potong. Sesuai dengan penampang diameter inti d_i dari hasil percobaan, secara umum gaya ini bernilai sekitar 50% sampai 55% dari gaya tekan total (N).

Dengan demikian persamaan gaya total adalah:

$$F_z = 4 (F_v \tan (\eta - \gamma_0) \sin K_r + K_n(d - d_i)/2) (N) \quad (2.30)$$

2.2.5 Toleransi Bentuk dan Kebulatan

2.2.5.1 Toleransi Bentuk

Komponen mesin umumnya dirancang dan dibuat untuk suatu karakteristik fungsional tertentu, yaitu dirancang sedemikian rupa dengan acuan fungsi dari komponen mesin tersebut. Setelah melalui tahapan tersebut karakteristik geometrik berperan dalam penyempurnaan komponen tersebut. Karakteristik geometrik komponen-komponen mesin mempunyai pengaruh sangat besar atas fungsi mesin, tetapi tidak dapat digunakan sebagai ukuran kemampuan mesin yang bersangkutan (Rochim, 2001).

Suatu komponen mesin memiliki karakteristik geometrik yang ideal apabila komponen tersebut sesuai dengan apa yang dikehendaki (sesuai karakteristik fungsional), mempunyai ukuran/dimensi yang teliti, bentuk yang sempurna dan permukaan yang halus sekali (Rochim, 2001). Tetapi pada kenyataannya

tidak mungkin untuk membuat suatu komponen mesin dengan karakteristik geometri yang sempurna. Penyimpangan-penyimpangan selama proses pembuatan pasti terjadi sehingga produk tidak lagi memiliki karakteristik geometrik yang sempurna.

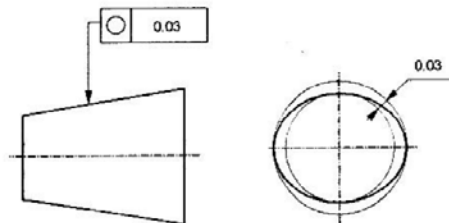
Pada pembuatan suatu komponen, perlu diberikan batas-batas tertentu terhadap penyimpangan yang terjadi sehingga penyimpangan tersebut diterima. Perbedaan ukuran antara ke dua harga batas (*two permissible limits*) dimana batas ukuran/batas geometri komponen harus terletak disebut toleransi ukuran. Selain toleransi dalam pengukuran geometrik, toleransi juga dipergunakan dalam bentuk dan posisi. Toleransi bentuk dan posisi ini ditujukan lebih ke arah karakteristik fungsional suatu komponen. Bentuk komponen mesin yang kurang teliti dapat menyebabkan pekerjaan tambahan dalam perakitan suatu komponen. Kesulitan ini dapat diatasi dengan memberikan batas toleransi bentuk bagi komponen mesin yang akan dibuat. Simbol serta cara pencantuman pada gambar teknik bagi toleransi bentuk telah disarankan oleh ISO yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 .

Tabel 2.4 Jenis Toleransi Bentuk dan Posisi dengan Simbolnya Menurut ISO (Rochim, 2001)

Elemen dan toleransi		Karakter yang dikontrol oleh toleransi	Simbol
Elemen tunggal yang berhubungan	BENTUK	Kehurusan (<i>straightness</i>)	—
		Kedataran (<i>flatness</i>)	▭
		Kebulatan (<i>circularity/roundness</i>)	○
		Kesilindrisan (<i>cylindricity</i>)	⊂
		Profil garis (<i>profile of any line</i>)	⌒
		Profil permukaan (<i>profile of any surface</i>)	⊂
Elemen yang berhubungan	ORIENTASI	Kesejajaran (<i>parallelism</i>)	//
		Ketegakhurusan (<i>perpendicularity</i>)	⊥
		Kemiringan (<i>angularity</i>)	∠
		Posisi (<i>position</i>)	⊕
	PUTAR	Konsentrisitas dan kesamaan sumbu (<i>concentricity and coaxiality</i>)	⊙
		Kesimetrisan (<i>symmetry</i>)	≡
		Putar (<i>run-out</i>)	/
		Putar total (<i>total run-out</i>)	⌒/

2.2.5.2 Kebulatan

Kebulatan (*roundness*) adalah kondisi pada suatu permukaan dengan penampang berbentuk lingkaran (silinder, konis dan bola), dimana semua titik-titik dari permukaan yang dipotong oleh bidang apapun tegak lurus terhadap sumbu (silinder dan konis) atau yang melalui pusat (bola) mempunyai jarak yang sama dari titik pusat. Toleransi kebulatan menunjukkan daerah toleransi yang dibatasi oleh dua lingkaran konsentris, dimana setiap elemen dari lingkaran harus berada pada bagian tersebut (Hill, 1969). Gambar 2.9 menunjukkan ilustrasi simbol toleransi kebulatan.



Gambar 2.9 Toleransi untuk geometrik kebulatan (Rochim, 2001)

Kebulatan adalah suatu harga yang dapat dihitung berdasarkan profil kebulatan relatif terhadap lingkaran referensinya (Rochim, 2001). Menurut standar Inggris, Amerika dan Jepang terdapat empat macam lingkaran referensi, yaitu (Rochim, 2001):

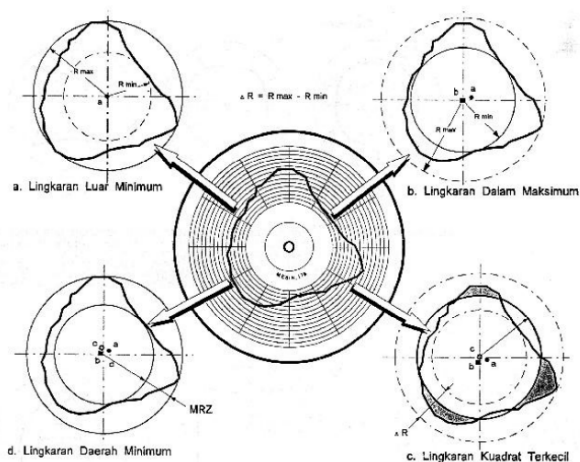
1. Lingkaran luar minimum (*minimum circumscribed circle*)
Adalah metoda yang digunakan untuk menghitung lingkaran standar yang menutupi profil data dengan jari jari minimum.
2. Lingkaran dalam maksimum (*maximum inscribed circle*)
Metode ini digunakan untuk menghitung lingkaran standar yang menutupi profil data dengan jari jari maksimum.
3. Lingkaran daerah minimum (*minimum zone circle*)

Metode ini digunakan untuk menghitung dua lingkaran konsentrik yang menutupi profil data seperti pemisah arah minimum.

4. Lingkaran kuadrat terkecil (*least squares circle*)

Adalah metoda yang paling umum digunakan untuk mengukur kebulatan. Luas daerah yang tertutup oleh profil adalah sama dengan luas daerah yang berada di luar profil.

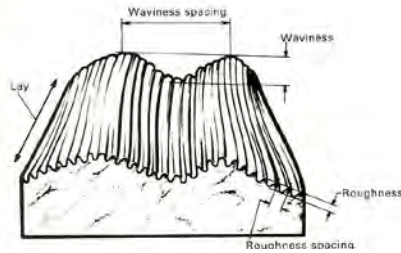
Dari keempat lingkaran referensi diatas parameter kebulatan yang dipakai adalah lingkaran daerah minimum (*minimum zone circle*). Metode pengukuran tersebut menggunakan dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa dimana jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Titik tengah dari lingkaran minimum tersebut disebut sebagai *minimum zone center* (MZC), sedangkan ketidakbulatan adalah selisih diantara radius kedua lingkaran tersebut (ΔR) dan dinamakan *minimum radial zone* (MRZ). Gambar 2.10 m enunjukkan metode pengukuran kebulatan MZC (*minimum zone circle*).



Gambar 2.10 Grafik polar dari empat jenis lingkaran referensi (Rochim, 2001)

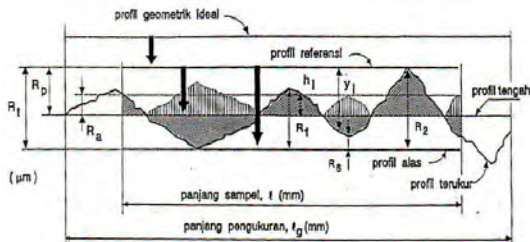
2.2.6 Kekasaran Permukaan

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 2.11.



Gambar 2.11 Bentuk kekasaran dan penggelombangan pada permukaan

Kualitas kekasaran permukaan proses pemesinan 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 2.12.

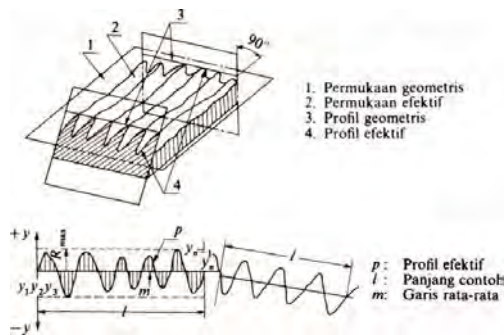


Gambar 2.12 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 1993)

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}). Definisi dari ketiga macam kekasaran permukaan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Penyimpangan rata-rata aritmatika dari garis rata-rata profil (R_a).

Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) adalah harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Penyimpangan rata-rata aritmatika
(Rochim, 1993)

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:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.31)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \sum_1^n |y| \quad (2.32)$$

atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.33)$$

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.

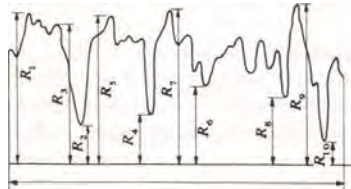
Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.5

Tabel 2.5 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran (Rochim, 1993)

Kekasaran, R_a (μm)	Tingkat Kekasaran	Panjang Sampel
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	

2. Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik (R_z).

Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik (R_z) adalah jarak rata-rata antara lima puncak tertinggi dan lima lembah terdalam antara panjang sampel yang diukur dari garis yang sejajar dengan garis rata-rata dan tidak memotong profil tersebut seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.14.



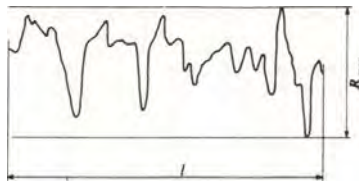
Gambar 2.14 Ketidakrataan ketinggian sepuluh titik (Rochim, 1993)

Berdasarkan gambar di atas, harga R_z dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \quad (2.34)$$

3. Ketidakrataan ketinggian maksimum (R_{max})

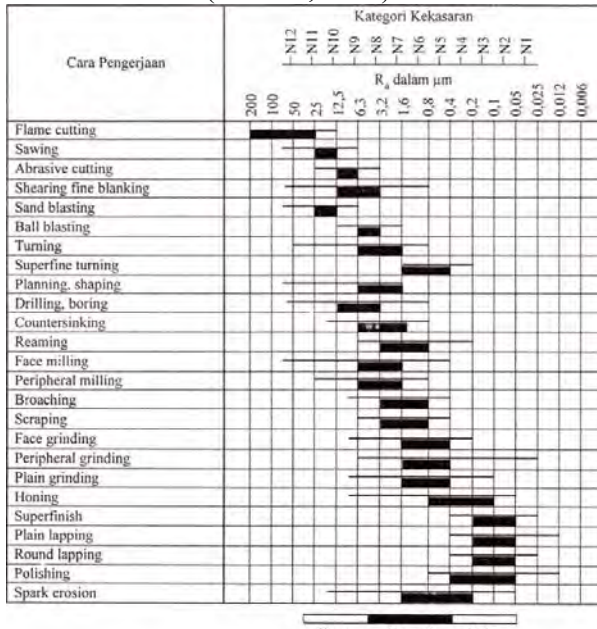
Ketidakrataan ketinggian maksimum (R_{max}) adalah jarak antara dua garis sejajar dengan garis rata-rata dan menyinggung profil pada titik tertinggi dan titik terendah dalam panjang sampel seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Ketidakrataan ketinggian maksimum (Rochim, 1993)

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Nilai Kekasaran yang dicapai oleh Beberapa Pengerjaan (Rochim, 1993)



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.

Hubungan antara Ra, Rz, dan Rmax tidak mudah ditentukan karena profil permukaan mempengaruhi hubungannya. Sebagai referensi, Tabel 2.7 dapat digunakan untuk menunjukkan hubungan antara Ra, Rz, dan Rmax.

Tabel 2.7 Hubungan Antara R_a , R_z , dan R_{max} (Rochim, 1993)

R_a	R_z	R_{max}
0,025	0,1	0,1
0,05	0,2	0,2
0,1	0,4	0,4
0,2	0,8	0,8
0,4	1,6	1,6
0,8	3,2	3,2
1,6	6,3	6,3
3,2	12,5	12,5
6,3	25	25
12,5	50	50
25	100	100
50	200	200
100	400	400

Panjang sampel yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan R_z dan R_{max} adalah 0,08 ; 0,25 ; 0,8 ; 2,5 ; 8 ; dan 25 milimeter. Ketentuan ini secara rinci ditunjukkan oleh Tabel 2.8 dan sesuai dengan standar JIS 0601. Harga ini merupakan harga bulat yang diutamakan. Untuk pengukuran R_a , panjang sampel diijinkan diambil tiga kali atau lebih dari harga bulat tersebut. Harga bulat standar adalah 0,8 mm.

Tabel 2.8 Hubungan antara Panjang Sampel (l) dan Kekasaran Permukaan

R_z atau R_{max}		l (mm)
	< 0.8	0.25
0.8	6.3	0.8
6.3	25	2.5
25	100	8

Rochim (1993) menyatakan bahwa dari ketiga parameter permukaan di atas, R_a merupakan parameter yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi kekasaran permukaan. Parameter R_a sebenarnya tidak mempunyai dasar yang kuat untuk mengidentifikasi ketidakteraturan konfigurasi permukaan karena beberapa profil permukaan dapat menghasilkan nilai R_a yang hampir sama. Akan tetapi, parameter R_a cocok digunakan untuk memeriksa kualitas permukaan akhir benda kerja yang dihasilkan dalam jumlah banyak. Parameter R_a lebih peka terhadap penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan bila dibandingkan dengan parameter kekasaran permukaan yang lain. Dengan demikian, pencegahan akan dapat dilakukan jika muncul tanda-tanda penambahan angka kekasaran permukaan benda kerja.

2.2.7 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 kemudian 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.

2.2.7.1 Prosedur Eksperimen

Secara umum, desain eksperimen Taguchi dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan eksperimen. Ketiga tahap tersebut adalah sebagai berikut (Ross, 2008):

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 kontinu. Contoh dari karakteristik ini adalah temperatur, berat, tekanan dan lain-lain.
- 2) Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinu, 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:

$$v_{mo} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.35)$$

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

$$v_{fl} = \text{jumlah level faktor} - 1 \quad (2.36)$$

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:

$$L_a (b^c) \quad (2.37)$$

Dengan:

L = rancangan bujursangkar 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 (Soejanto, 2009).

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) Menyebarkan 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 (ANAVA)

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 (db), jumlah

kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS) dan F_{hitung} seperti ditunjukkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Tabel Analisis Variansi

Sumber variansi	Db	SS	MS	F_{hitung}
Faktor A	ν_A	SS_A	MS_A	F_A
Faktor B	ν_B	SS_B	MS_B	F_B
Error	ν_{error}	SS_{error}	MS_{error}	
Total	ν_T	SST		

Dengan:

$$\begin{aligned} \nu_T &= \text{derajat bebas total} \\ &= N-1 \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \nu_A &= \text{derajat bebas faktor A} \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \nu_B &= \text{derajat bebas faktor B} \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} \nu_{error} &= \text{derajat bebas error} \\ &= \nu_T - \nu_A - \nu_B - \nu_{AB} \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{jumlah keseluruhan} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{faktor koreksi} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{jumlah kuadrat total} \\ &= \sum_{i=y}^N Y_i - CF \\ &= \sum_{i=y}^N (Y_i - T)^2 \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{jumlah kuadrat faktor A} \\ &= \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} SS_B &= \text{jumlah kuadrat faktor B} \\ &= \left[\sum_{i=1}^{k_B} \left(\frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} SS_E &= \text{jumlah kuadrat error} \\ &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} MS_A &= \text{kuadrat tengah faktor A} \\ &= \frac{SS_A}{v_A} \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} MS_B &= \text{kuadrat tengah faktor B} \\ &= \frac{SS_B}{v_B} \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} MS_E &= \text{kuadrat tengah error} \\ &= \frac{SS_E}{v_E} \end{aligned} \quad (2.50)$$

k_A = jumlah level faktor A

k_B = jumlah level faktor B

N = jumlah total percobaan

n_{A_i} = jumlah total pengamatan faktor A

n_{B_j} = jumlah total pengamatan faktor B

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):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.51)$$

Dengan:

Y_{ijk} = model ANAVA untuk faktor i dan j

μ = rata-rata secara keseluruhan

τ_i = pengaruh dari faktor (*factor effect*) ke i

β_j = pengaruh dari faktor (*factor effect*) ke j

ε_{ijk} = *error* secara keseluruhan

Maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian 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):

$$\text{Untuk taraf faktor A} \quad \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.52)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \quad \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.53)$$

Kegagalan menolak H_0 pada masing-masing kasus dilakukan jika perbandingan antara F_{hitung} dan F_{tabel} sebagai berikut:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.54)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.55)$$

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:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.56)$$

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:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.57)$$

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:

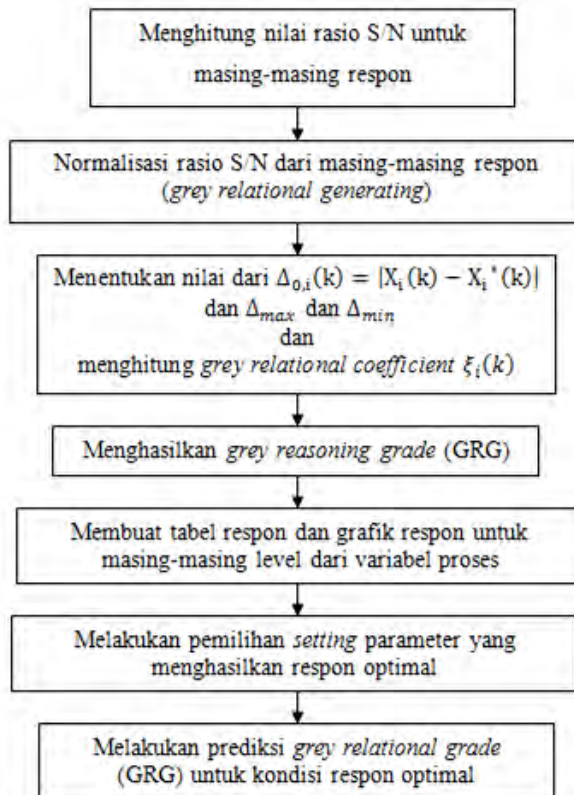
$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right] \quad (2.58)$$

2.2.8 Metode Taguchi-Grey Relational Analysis (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 *grey relational analysis* (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 GRA digunakan untuk menciptakan model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan (Deng, 1989). 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 2.16.



Gambar 2.16 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 sesuai dengan persamaan 2.56 hingga persamaan 2.58.
2. Normalisasi data untuk masing-masing respon
Tabel 2.10 menunjukkan penempatan nilai respon untuk proses normalisasi.

Tabel 2.10 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 Mahapatra, 2010):

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.59)$$

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

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.60)$$

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

$$X_i^*(k) = \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.61)$$

Dengan:

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

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

$X_{ob}(k)$ = nilai target dari $X_i(k)$

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

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

Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih secara absolut dari nilai terbesar hasil normalisasi, yaitu selisih antara 1 dengan data yang telah dinormalisasi. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_i(k) - X_i^*(k)| \quad (2.62)$$

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 Mahapatra, 2010):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (2.63)$$

Dengan:

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

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

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

Pada umumnya nilai *distinguishing coefficient* diatur berdasarkan kebutuhan dan besarnya antara 0 dan 1. Nilai *distinguishing 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 2.11.

Tabel 2.11 Tabel Respon *Grey Relational Grade* (GRG)

	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 ($\hat{\gamma}$) berdasarkan kombinasi level parameter untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (2.64)$$

Dengan:

γ_m = nilai rata-rata dari keseluruhan GRG

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

o = jumlah parameter yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.2.9 Interpretasi Hasil Eksperimen

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

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):

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \% \quad (2.65)$$

Dengan:

$$SS'_A = SS_A - v_A \cdot MS_E \quad (2.66)$$

Dengan:

SS_A = jumlah kuadrat dari faktor yang dihitung persen kontribusinya

SS_T = jumlah kuadrat total

v_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):

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_g} MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.67)$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \hat{\mu}_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \quad (2.68)$$

Dengan:

$\hat{\mu}_{prediksi}$ = dugaan rata-rata GRG pada kombinasi optimal

n_{eff} = banyaknya pengamatan efektif

$$n_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata}} \quad (2.69)$$

2.2.10 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 analisis.

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 optimasi. 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. Rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.
- b. Interval keyakinan dari rata-rata respon eksperimen konfirmasi berhimpit atau beririsan dengan interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% dari rata-rata respon hasil optimum. Interval keyakinan eksperimen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Ross, 2008).

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;vE} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.70)$$

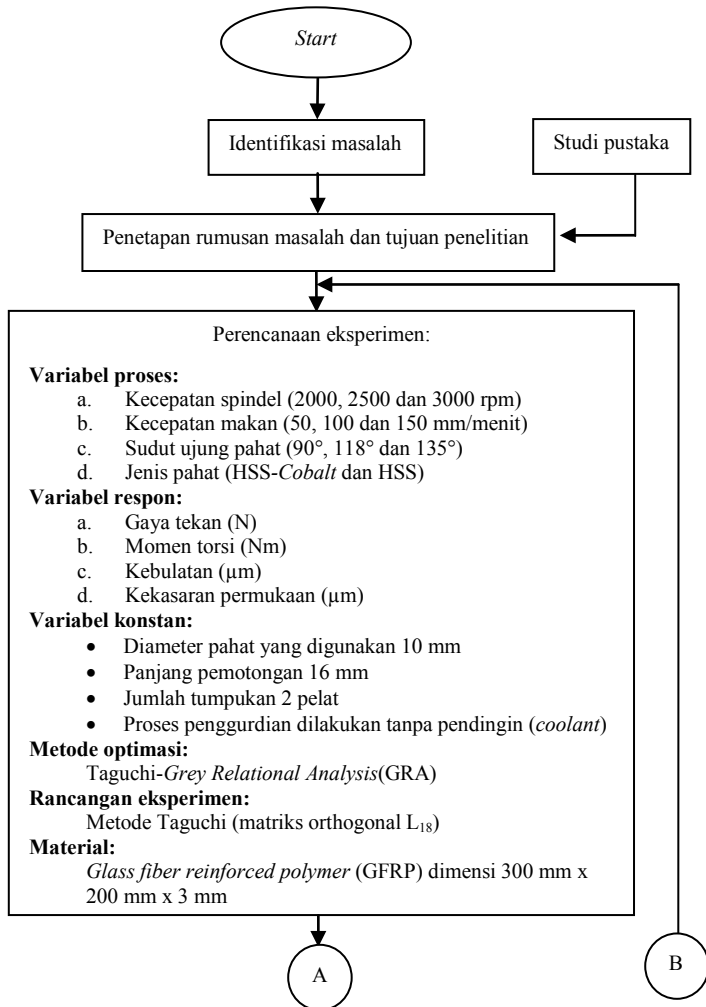
Dengan:

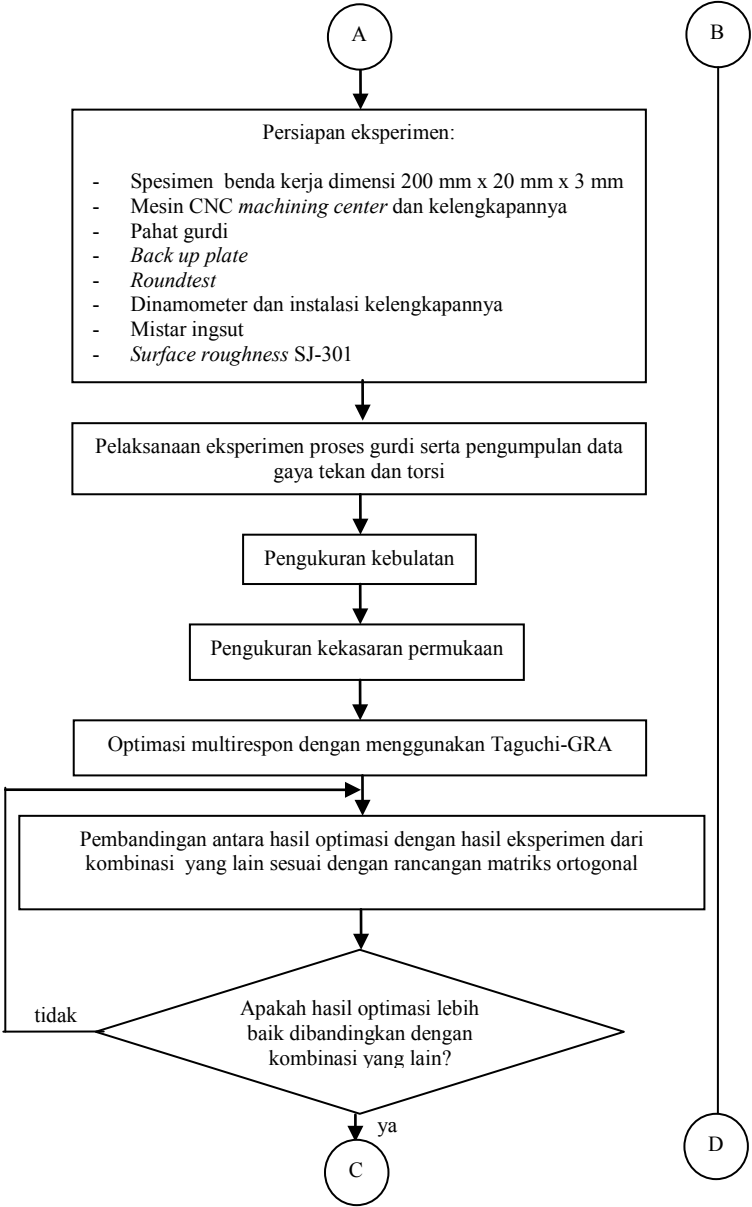
r = jumlah pengulangan dalam eksperimen konfirmasi

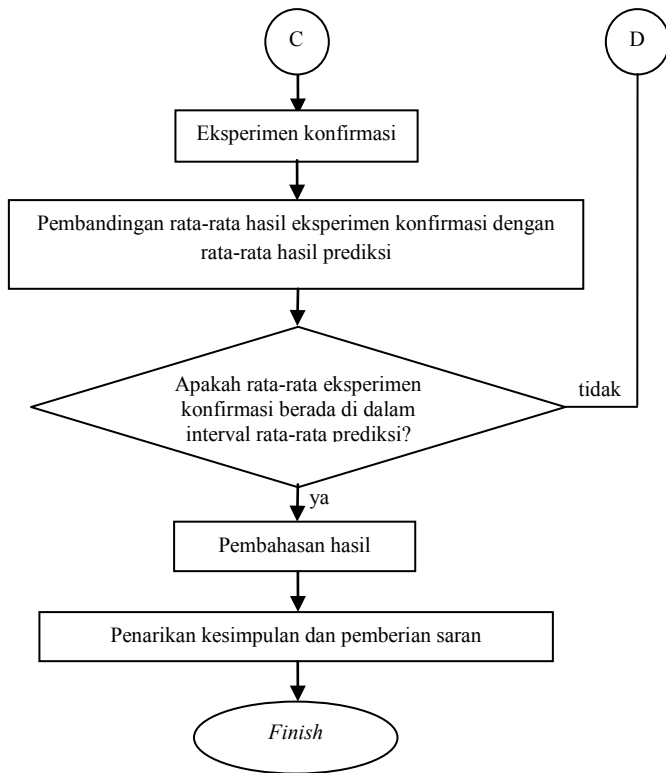
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum langkah-langkah yang akan dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 3.1.







Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Variabel Penelitian

Untuk mendapatkan data eksperimen pada proses gurd material komposit GFRP, maka variabel-variabel yang akan digunakan untuk penelitian adalah sebagai berikut:

1. Variabel Proses

Variabel proses adalah variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan. Terdapat empat variabel proses yang digunakan pada penelitian ini yaitu kecepatan spindel yang memiliki tiga level (2000, 2500, dan 2500 rpm), kecepatan makan yang memiliki tiga level (50, 100 dan 150 mm/menit), sudut ujung pahat yang memiliki tiga level (90°, 118° dan 135°), serta jenis pahat yang memiliki dua level yang mewakili dua jenis pahat yang digunakan yaitu pahat pahat HSS-*Cobalt* dan HSS.

2. Variabel respon

Variabel respon merupakan variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan dan nilainya dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan, serta hasilnya diketahui setelah melakukan eksperimen. Variabel respon yang digunakan pada penelitian ini adalah gaya tekan (N), momen torsi (Nm), kebulatan (μm) dan kekasaran permukaan.

3. Variabel konstan

Variabel konstan merupakan variabel proses yang tidak diteliti. Terdapat empat variabel konstan yang digunakan pada penelitian ini yaitu diameter pahat (10 mm), panjang langkah pemotongan (16 mm), jumlah tumpukan (2 pelat/spesimen), dan proses penggurdian tidak menggunakan pendingin (*coolant*). Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil eksperimen.

3.3 Karakteristik Variabel Respon Optimal

Masing-masing variabel respon dari eksperimen yang terdiri dari gaya tekan, momen torsi, kebulatan dan kekasaran

permukaan bertujuan untuk mencapai karakteristik variabel respon yang optimal. Karakteristik respon optimal yang diharapkan untuk keempat respon tersebut adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*), yang berarti bahwa nilai gaya tekan, momen torsi, kebulatan dan delaminasi yang minimum adalah yang diharapkan.

3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan dan peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Bahan Penelitian

1. Pahat Gurdi

Terdapat dua jenis pahat gurdi yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

a. *High speed steel* (HSS)

Pahat gurdi ini termasuk ke dalam jenis *twist drill* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merek dagang	= NACHI
Kodifikasi	= DIN 338
Tipe mata potong	= S
Jumlah alur/ <i>flute</i>	= 2 buah
Sudut puntir	= 30°
Sudut bebas samping	= 19°
Diameter	= 10 mm
Panjang alur	= 87 mm
Panjang total pahat	= 133 mm
Toleransi diameter pahat	= h8

b. *High speed steel* (HSS-Cobalt)

Pahat gurdi ini termasuk ke dalam jenis *twist drill* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merek dagang	= NACHI
Kodifikasi	= DIN 338
Kandungan <i>cobalt</i>	= 8%
Tipe mata potong	= X
Jumlah alur/ <i>flute</i>	= 2 buah

Sudut puntir	= 30°
Sudut bebas samping	= 19°
Diameter	= 10 mm
Panjang alur	= 87 mm
Panjang total pahat	= 133 mm
Toleransi diameter pahat	= h8

Kedua jenis pahat tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.2. Kedua jenis pahat tersebut digunakan pada penelitian dengan memvariasikan sudut ujung pahat (*point angle*). Gambar 3.3 menunjukkan variasi sudut ujung pahat gundi yang digunakan pada penelitian.

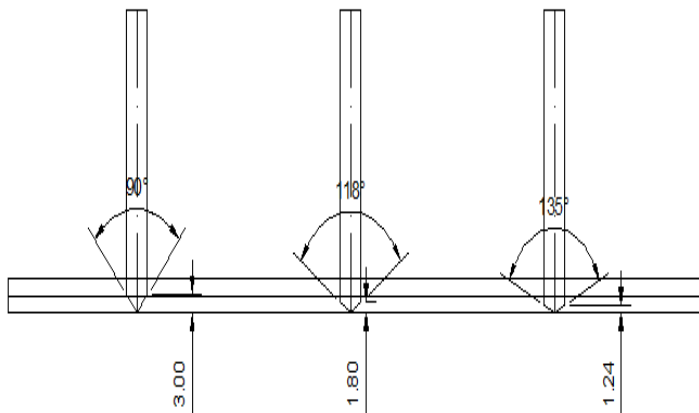


a.



b.

Gambar 3.2 a.) Pahat HSS-Cobalt b.) Pahat HSS



Gambar 3.3 Variasi sudut ujung pahat

2. Benda kerja

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari PT. Dirgantara Indonesia (DI), yaitu bahan komposit gelas 7781/*epoxy multi layer* dengan spesifikasi Z-19.101. Dimensi benda kerja adalah panjang 300 mm, lebar 200 mm dan tebal 3 mm. Benda kerja tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Komposit gelas 7781/*epoxy*

Pada penelitian ini benda kerja berupa lembaran dijadikan spesimen penelitian dengan dimensi panjang 200 mm, lebar 30 mm dan tebal 3 mm. Gambar 3.5 menunjukkan spesimen penelitian yang dipotong dari lembaran komposit sebelumnya.



Gambar 3.5 Spesimen penelitian

Spesimen penelitian ditumpuk dengan jumlah tumpukan dua spesimen, kemudian disusun pada *back up plate*.

Agar kedua spesimen dapat ditumpuk dan disusun pada pada *back up plate*, maka kedua sisi ujung material komposit diberi lubang dengan diameter 7 mm dengan jarak antara pusat lubang dengan sisi ujung spesimen sebesar 10 mm. Hal ini bertujuan agar spesimen komposit yang ditumpuk tidak bergeser saat digurdi secara bersamaan. Gambar 3.6 menunjukkan letak lubang diameter 7 mm.

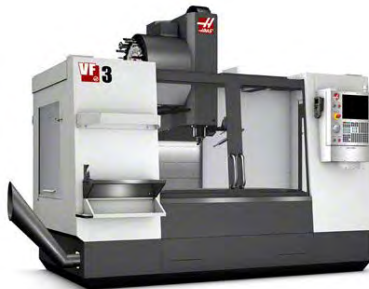


Gambar 3.6 Lubang diameter 7 mm pada spesimen penelitian

3.4.2 Peralatan Penelitian

1. Mesin CNC *vertical machining centre*

Mesin yang digunakan adalah jenis mesin CNC *vertical machining centre* merek HAAS dengan tipe VF-3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Mesin ini memiliki kecepatan spindel mesin maksimum sebesar 8100 rpm dan kecepatan makan maksimum 25,4 m/menit. Mesin ini memiliki 3 axis dimana masing-masing panjang axisnya adalah sumbu X sebesar 1016 mm, sumbu Y sebesar 508 mm dan sumbu Z sebesar 635 mm.



Gambar 3.7 Mesin CNC HAAS VF-3

2. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan adalah dinamometer merek KISTLER tipe 9272. Pengukuran gaya tekan dan torsi pahat (F_z dan M_t) pada pengurdian material komposit GFRP yang ditumpuk dilakukan dengan menggunakan dinamometer yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Dinamometer tipe 9272

3. Alat akusisi data tipe 5697A

Alat akusisi data digunakan sebagai penghubung dari *charge amplifier* dan dinamometer ke *notebook*, sehingga data dapat ditampilkan pada *notebook*. Alat ini berfungsi sebagai pengolah data dan penguat sinyal, memiliki 8 *channel output* dengan resolusi yang tinggi hingga frekuensi 125 kS/s, sehingga dapat dilakukan pengukuran pada proses yang dinamis. Akusisi data ditunjukkan pada Gambar 3.9, dan memiliki dimensi 208 mm x 70 mm x 249 mm serta massa seberat 2,15 kg.



Gambar 3.9 Akusisi 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* yang memiliki 8 *channel input* ini ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Charge amplifier* type 5070A

5. Compaq Presario CQ35-336TX

Notebook Compaq Presario digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil eksperimen. *Notebook* yang sudah memiliki perangkat lunak DynoWare dari KISTLER ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Compaq presario CQ35-336TX

6. Roundtest Roncorder Model EC-3D

Peralatan pengukuran kebulatan yaitu *roundtest* Roncorder model EC-3D digunakan untuk mengukur kebulatan pada material hasil pengurdian, dan ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 *Roundtest* Roncorder model EC-3D

7. Mistar insut

Mistar insut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji yang memiliki kecermatan 0,02 mm. Mistar insut ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Mistar insut

8. Mitutoyo *surf*test SJ-310

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada lubang hasil proses penggurdian dengan menggunakan Mitutoyo *surf*test SJ-310. Gambar 3.14 menunjukkan peralatan pengukuran kekasaran permukaan yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.14 Mitutoyo *surf*test SJ-310

9. *Back up plate*

Back up plate yang digunakan sebagai tempat ditumpuknya material komposit GFRP tersusun dari kayu yang telah dilubangi dengan diameter 13 mm sejumlah 8 lubang dan lubang dengan diameter 7 mm sejumlah 2

lubang, mur, baut, *ring*, dan pelat logam yang telah dibuat alur tembus. *Back up plate* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 *Back up plate*

10. *Tachometer* digital

Tachometer digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan spindel sebelum dan saat penggurdian berlangsung ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.16 *Tachometer* digital

3.5 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)	$\nu_{fl} (k-1)$
1	Jenis pahat	2	1
2	Kecepatan spindel (rpm)	3	2
3	Kecepatan makan (mm/menit)	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 3.4, sehingga matriks ortogonal yang digunakan adalah $L_{18} (2^1 \times 3^3)$. Rancangan percobaan L_{18} 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	Kecepatan makan	Kecepatan spindel
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 (tipe S)	HSS-Cobalt (tipe X)	-
Sudut ujung pahat	°(derajat)	90	118	135
Kecepatan makan	mm/menit	50	100	150
Kecepatan spindel	Rpm	2000	2500	3000

Eksperimen dilakukan secara acak dengan kombinasi variabel proses mengacu pada rancangan percobaan yang sesuai dengan matriks ortogonal pada Tabel 3.2. Pengacakan ini dilakukan

dengan menggunakan fasilitas randomisasi bilangan melalui bantuan perangkat lunak Minitab 16. Masing-masing kombinasi variabel proses akan dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses penggurdian berlangsung. Bila data hasil eksperimen dikumpulkan sesuai dengan kombinasi *setting* variabel yang sejenis, maka susunan data yang akan diperoleh ditunjukkan seperti pada Tabel 3.4

Tabel 3.4 Tampilan data hasil eksperimen

Kombinas i ke-	F_z (N)		M_t (Nm)		Kebulatan	Kekasaran permukaan
	R1	R2	R1	R2		
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						

Keterangan:

R1 : replikasi 1

R2 : replikasi 2

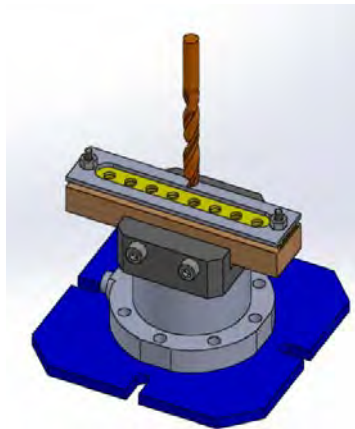
3.6 Prosedur Percobaan

Langkah-langkah percobaan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

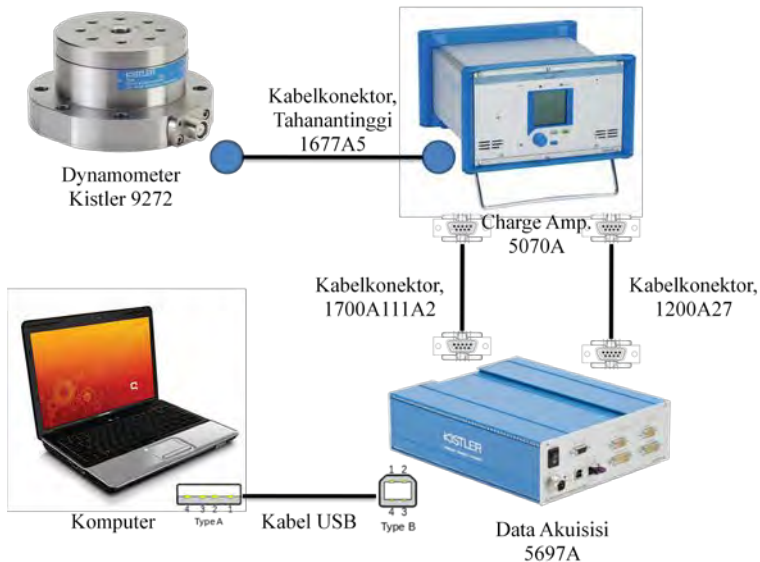
- a. Memberi tanda pada spesimen komposit sebagai titik pusat lubang saat proses penggurdian berlangsung.
- b. Memasang dua spesimen penelitian yang ditumpuk dan disusun pada *back up plate*.
- c. Memasang dinamometer pada bantalan mesin CNC *vertical machining center* dengan menggunakan mur dan baut.
- d. Memasang *back up plate* yang sudah dipasang spesimen pada dinamometer. Gambar 3.17 menunjukkan cara pemasangan *back up plate* pada dinamometer.
- e. Menghubungkan dinamometer dengan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A menggunakan kabel koneksi *type* KISTLER 16775A.
- f. Menghubungkan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A dengan DAQ KISTLER *type* 5697A menggunakan kabel koneksi 1700A111A2 dan 1200A27.
- g. Menghubungkan sistem DAQ KISTLER *type* 5697A dengan *notebook* menggunakan kabel USB.
- h. Menghubungkan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A dan sistem DAQ KISTLER *type* 5697A ke sumber listrik dengan kabel *power* listrik. Gambar 3.18 menunjukkan pemasangan instrumentasi dinamometer.
- i. Melakukan pengaturan variabel proses gudi yang meliputi pengaturan kecepatan spindle dan kecepatan makan pada mesin CNC *vertical machining center*.
- j. Memasang pahat *twist drill* pada pencekam pahat sesuai dengan kombinasi variabel proses.
- k. Menyalakan mesin CNC *vertical machining center* dan melakukan pengukuran kecepatan spindle

menggunakan *tachometer* digital sebelum proses pemotongan dilakukan.

- l. Melaksanakan proses penggurdian material komposit berdasarkan kombinasi yang telah ditentukan.
- m. melakukan pengukuran kecepatan spindel menggunakan *tachometer* digital saat proses pemotongan dilakukan.
- n. Melakukan proses pengambilan data berupa gaya tekan dan momen torsi selama proses penggurdian berlangsung.
- o. Menyimpan data grafik yang didapat dari dinamometer untuk kemudian diolah.
- p. Melakukan prosedur percobaan diatas pada 18 kombinasi percobaan secara acak beserta replikasinya.
- q. Melepas *back up plate* dari dinamometer.
- r. Melepas spesimen dari *back up plate*.
- s. Mengukur kebulatan lubang menggunakan *roundtest*.
- t. Mengukur kekasaran permukaan lubang hasil penggurdian dengan menggunakan peralatan Mitutuyo *surftest* SJ 310.



Gambar 3.17 Pemasangan benda kerja pada dinamometer



Gambar 3.18 Pemasangan instrumentasi dinamometer

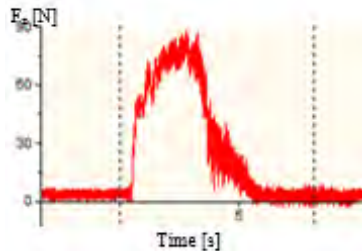
3.7 Pengukuran dan Pengambilan Data

Terdapat empat jenis respon yang akan diamati dan diukur pada penelitian ini. Respon yang akan diamati dan diukur adalah gaya tekan, momen torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan. Pengukuran dan pengambilan data untuk masing-masing respon tersebut dijelaskan sbagai berikut:

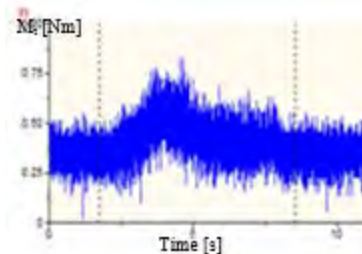
3.7.1 Pengukuran dan Pengambilan Data Gaya Tekan dan Momen Torsi

Pengambilan data gaya tekan dan momen torsi dilakukan dengan menggunakan dinamometer yang telah terpasang instalasinya pada mesin CNC *vertical machining center*. Pengambilan data gaya tekan dan delaminasi dilakukan saat proses penggurdian berlangsung. Data berupa grafik yang didapat dari perangkat lunak *dynoware* ini kemudian disimpan dan diolah. Perangkat lunak *dynoware* dilengkapi dengan fasilitas *measure* untuk mengukur nilai rata-rata dari grafik yang diperoleh. Grafik

gaya tekan dan momen torsi yang diperoleh dari percobaan kemudian diukur nilai rata-ratanya, kemudian nilai rata-rata ini akan dimasukkan pada tabel data penelitian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.5. Gambar 3.19 menunjukkan contoh grafik gaya tekan dan momen torsi yang diperoleh dari dinamometer dengan bantuan perangkat lunak *dynoware*.



a.



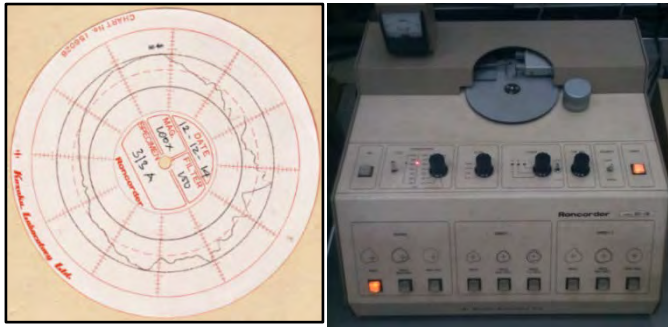
b.

Gambar 3.19 a.) Grafik gaya tekan b.) Grafik momen torsi

3.7.2 Pengukuran dan Pengambilan Data Kebulatan

Pengambilan data kebulatan dilakukan dengan menggunakan alat ukur kebulatan *roundtest* Roncorder model EC-3D. Pengambilan data kebulatan dilakukan dengan alat ukur yang dimiliki oleh PT. Boma Bisma Indra (BBI) yang berlokasi di Surabaya. Pengukuran kebulatan dilakukan dengan menggunakan dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan

sedemikian rupa dimana jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Titik tengah dari lingkaran minimum tersebut disebut sebagai *minimum zone center* (MZC), sedangkan ketidakbulatan adalah selisih diantara radius kedua lingkaran tersebut (ΔR) dan dinamakan *minimum radial zone* (MRZ). Gambar 3.20 menunjukkan grafik pengukuran kebulatan dengan metode *minimum zone center*.



a.

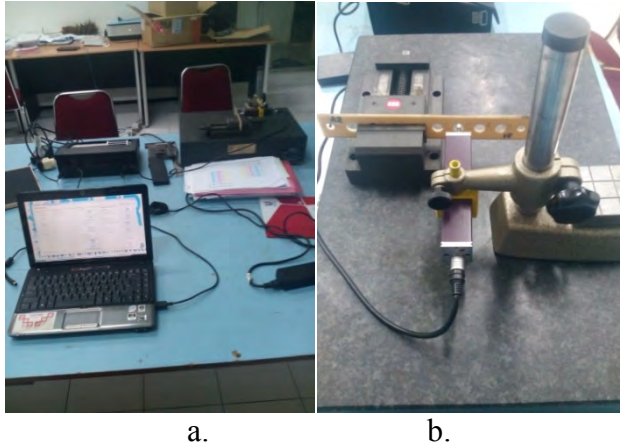
b.

Gambar 3.20 a.) Grafik pengukuran kebulatan b.) Alat ukur kebulatan

3.7.3 Pengukuran dan Pengambilan Data Kekasaran permukaan

Pengambilan data kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo *surf test* SJ-310. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan bantuan meja perata dan ragum sebagai pencekam spesimen komposit yang akan diukur kekasaran permukaannya. Lubang hasil penggurdian diukur nilai kekasaran permukaannya di dua tempat yang berbeda kemudian hasilnya dirata-ratakan. Nilai kekasaran yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai kekasaran aritmatik (R_a) yang dapat langsung terbaca pada peralatan instalasi pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *SJ Communication tool*. Pengaturan kondisi pengukuran dilakukan pada *notebook* yang sudah

dipasang perangkat lunak tersebut. Panjang sampel pengukuran kekasaran permukaan adalah 0,8 mm. Instalasi alat ukur kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21 a.) Instalasi peralatan pengukuran kekasaran permukaan b.) Pemasangan spesimen pada pengecam

3.8 Pengerjaan Optimasi Multi Respon

Optimasi multi respon proses gurdi menggunakan metode Taguchi-GRA dilakukan untuk memperoleh kombinasi yang paling optimum dari variabel proses untuk meminimalkan respon. Tahapan berikutnya adalah perbandingan antara hasil optimasi dengan hasil eksperimen dari kombinasi yang lain sesuai dengan rancangan matriks ortogonal.

3.9 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan apabila hasil optimasi lebih baik dibandingkan dengan kombinasi yang lain pada rancangan matriks ortogonal. Setelah itu dilakukan Perbandingan rata-rata hasil eksperimen konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi. Nilai rata-rata hasil eksperimen konfirmasi harus berada pada interval rata-rata prediksi.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB IV

HASIL DAN ANALISA DATA

4.1 Data Hasil Pengukuran

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel-variabel proses gurdi pada material komposit GFRP, yang diduga memiliki pengaruh terhadap gaya tekan (F_z), torsi (T), kebulatan (R) dan kekasaran permukaan (SR). Variabel-variabel proses tersebut adalah jenis pahat (TM), sudut ujung pahat (PA), kecepatan makan (VF) dan kecepatan spindle (N).

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 kebulatan yang diukur dengan menggunakan *round test* Roncorder model EC-3D. Data terakhir yang diambil adalah data kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo *surf test* SJ-310. Pengambilan data gaya tekan dan torsi dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk setiap kombinasi variabel proses. Pengambilan data kebulatan dilakukan hanya satu kali tanpa replikasi pada pelat atas dan bawah, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan di dua tempat berbeda pada satu lubang, yaitu di pelat bagian atas maupun pelat bagian bawah, kemudian dihitung rata-ratanya. Hasil eksperimen berupa gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen

No	FZ (N)			T (Nm)			R (μm)	SR (μm)
	R1	R2	RATA-RATA	R1	R2	RATA-RATA		
1	39.18	39.06	39.120	0.660	0.640	0.650	160	2.005
2	42.14	42.2	42.170	1.163	1.173	1.168	150	1.017
3	42.19	42.15	42.170	1.495	1.487	1.491	150	0.873
4	66.09	65.97	66.030	0.771	0.775	0.773	150	2.573
5	66.15	66.21	66.180	1.301	1.311	1.306	145	1.024
6	66.93	66.97	66.950	1.539	1.521	1.530	145	0.878
7	100.204	100.196	100.200	1.357	1.343	1.350	135	2.585
8	113.201	113.199	113.200	1.558	1.554	1.556	125	1.151
9	91.6	91.4	91.500	0.780	0.782	0.781	120	0.889
10	29.85	29.87	29.860	1.421	1.425	1.423	115	1.256
11	23.19	23.13	23.160	0.448	0.440	0.444	110	0.968
12	25.69	25.61	25.650	0.792	0.790	0.791	110	0.728
13	46.83	46.87	46.850	0.894	0.896	0.895	110	1.934
14	58.2	58	58.100	1.458	1.442	1.450	105	0.986
15	42.33	42.31	42.320	0.473	0.483	0.478	100	0.774
16	83.804	83.796	83.800	1.485	1.479	1.482	100	1.968
17	73.94	74.04	73.990	0.619	0.609	0.614	80	0.999
18	83.62	83.54	83.580	0.937	0.925	0.931	80	0.844

Sumber: Hasil pengukuran

Berdasarkan Tabel 4.1, gaya tekan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 8 dan besarnya adalah 113.2 N, sedangkan gaya tekan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 11 dan besarnya adalah 23.16 N. Torsi terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 8 dan besarnya adalah 1.556 Nm, sedangkan torsi terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 11 dan besarnya adalah 0.444 Nm. Kebulatan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 1 dan besarnya adalah 160 μm , sedangkan kebulatan terkecil didapatkan pada kombinasi

variabel proses ke 17 dan 18 dan besarnya adalah 80 μm . Kekasaran permukaan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 7 dan besarnya adalah 2.585 μm , sedangkan kekasaran permukaan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 12 dan besarnya adalah 0.728 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, kebulatan dan kekasaran permukaan memiliki kesamaan karakteristik kualitas, yaitu semakin kecil semakin baik (*smaller is better*) dan rasio S/N tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.56. Contoh penghitungan rasio S/N dari gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

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

$$S/N = -10 \log \frac{39,12^2}{1}$$

$$S/N = -31,8480$$

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	F _z (N)	T (Nm)	R (μm)	SR (μm)	SNRA_F _z	SNRA_T	SNRA_R	SNRA_SR
1	39.120	0.650	160	2.005	-31.8480	3.7417	-44.0824	-6.0423
2	42.170	1.168	150	1.017	-32.5001	-1.3489	-43.5218	-0.1421
3	42.170	1.491	150	0.873	-32.5001	-3.4696	-43.5218	1.1772
4	66.030	0.773	150	2.573	-36.3948	2.2364	-43.5218	-8.2096
5	66.180	1.306	145	1.024	-36.4145	-2.3189	-43.2274	-0.2060
6	66.950	1.530	145	0.878	-36.5150	-3.6938	-43.2274	1.1276
7	100.200	1.350	135	2.585	-40.0174	-2.6067	-42.6067	-8.2475
8	113.200	1.556	125	1.151	-41.0769	-3.8402	-41.9382	-1.2234
9	91.500	0.781	120	0.889	-39.2284	2.1470	-41.5836	1.0220
10	29.860	1.423	115	1.256	-29.5018	-3.0641	-41.2140	-1.9815
11	23.160	0.444	110	0.968	-27.2948	7.0523	-40.8279	0.2847
12	25.650	0.791	110	0.728	-28.1817	2.0365	-40.8279	2.7574
13	46.850	0.895	110	1.934	-33.4142	0.9635	-40.8279	-5.7291
14	58.100	1.450	105	0.986	-35.2835	-3.2274	-40.4238	0.1247
15	42.320	0.478	100	0.774	-32.5309	6.4114	-40.0000	2.2308
16	83.800	1.482	100	1.968	-38.4649	-3.4170	-40.0000	-5.8816
17	73.990	0.614	80	0.999	-37.3835	4.2366	-38.0618	0.0065
18	83.580	0.931	80	0.844	-38.4420	0.6210	-38.0618	1.4706

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 semakin besar semakin baik (*larger is better*). Karakteristik kualitas dari respon gaya tekan, torsi, kebulatan 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) = -27.29477
 Nilai minimum rasio S/N gaya tekan (F_z) = -41.07693
2. Penghitungan normalisasi rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.59, adalah:

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

$$X_i^*(1) = \frac{-31.8480 - (-27.29477)}{-27.29477 - (-41.07693)}$$

$$X_i^*(1) = 0.6696$$

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	xi_Fz	xi_T	xi_R	xi_SR
1	0.6696	0.6961	0.0000	0.2004
2	0.6223	0.2287	0.0931	0.7365
3	0.6223	0.0340	0.0931	0.8564
4	0.3397	0.5579	0.0931	0.0034
5	0.3383	0.1397	0.1420	0.7307
6	0.3310	0.0134	0.1420	0.8519
7	0.0769	0.1132	0.2451	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.3561	0.6383
9	0.1341	0.5497	0.4150	0.8423
10	0.8399	0.0713	0.4764	0.5694
11	1.0000	1.0000	0.5406	0.7753
12	0.9356	0.5395	0.5406	1.0000
13	0.5560	0.4410	0.5406	0.2288
14	0.4204	0.0563	0.6077	0.7608
15	0.6201	0.9412	0.6781	0.9522
16	0.1895	0.0389	0.6781	0.2150
17	0.2680	0.7415	1.0000	0.7500
18	0.1912	0.4096	1.0000	0.8831

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.3 Perhitungan *Deviation Sequence*

Sebelum penghitungan nilai GRC dilakukan, nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.62. Contoh penghitungan *deviation sequence* gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

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

$$\Delta_{0,1}(1) = |1 - 0.6696|$$

$$\Delta_{0,1}(1) = 0.3304$$

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	Δ_{F_z}	Δ_T	Δ_R	Δ_{SR}
1	0.3304	0.3039	1.0000	0.7996
2	0.3777	0.7713	0.9069	0.2635
3	0.3777	0.9660	0.9069	0.1436
4	0.6603	0.4421	0.9069	0.9966
5	0.6617	0.8603	0.8580	0.2693
6	0.6690	0.9866	0.8580	0.1481
7	0.9231	0.8868	0.7549	1.0000
8	1.0000	1.0000	0.6439	0.3617
9	0.8659	0.4503	0.5850	0.1577
10	0.1601	0.9287	0.5236	0.4306
11	0.0000	0.0000	0.4594	0.2247
12	0.0644	0.4605	0.4594	0.0000
13	0.4440	0.5590	0.4594	0.7712
14	0.5796	0.9437	0.3923	0.2392
15	0.3799	0.0588	0.3219	0.0478
16	0.8105	0.9611	0.3219	0.7850
17	0.7320	0.2585	0.0000	0.2500
18	0.8088	0.5904	0.0000	0.1169

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 2.63 yang didasarkan pada nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$. Penghitungan GRG dilakukan dengan merata-ratakan nilai GRC pada masing-masing respon. Contoh penghitungan GRC gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

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

$$\xi_1(1) = \frac{0 + (0,5 \times 1)}{0,3304 + (0,5 \times 1)}$$

$$\xi_1(1) = 0,6021$$

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	GRC F_z	GRC T	GRC R	GRC SR	GRG
1	0.6021	0.6219	0.3333	0.3847	0.4855
2	0.5697	0.3933	0.3554	0.6549	0.4933
3	0.5697	0.3411	0.3554	0.7769	0.5108
4	0.4309	0.5307	0.3554	0.3341	0.4128
5	0.4304	0.3676	0.3682	0.6500	0.4540
6	0.4277	0.3363	0.3682	0.7715	0.4759
7	0.3513	0.3606	0.3984	0.3333	0.3609
8	0.3333	0.3333	0.4371	0.5802	0.4210
9	0.3661	0.5261	0.4608	0.7602	0.5283
10	0.7574	0.3500	0.4885	0.5373	0.5333
11	1.0000	1.0000	0.5211	0.6900	0.8028
12	0.8860	0.5206	0.5211	1.0000	0.7319
13	0.5297	0.4721	0.5211	0.3933	0.4791
14	0.4631	0.3463	0.5603	0.6764	0.5115
15	0.5682	0.8947	0.6083	0.9127	0.7460
16	0.3815	0.3422	0.6083	0.3891	0.4303
17	0.4058	0.6592	1.0000	0.6667	0.6829
18	0.3820	0.4585	1.0000	0.8105	0.6628

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, kebulatan dan kekasaran permukaan. Contoh penghitungan nilai rata-rata dari GRG untuk variabel proses sudut ujung pahat pada level 1 adalah:

$$\bar{\eta}_{V1} = \frac{0.4855 + 0.4933 + 0.5108 + 0.5333 + 0.8028 + 0.7319}{6}$$

$$\bar{\eta}_{V1} = 0,5929$$

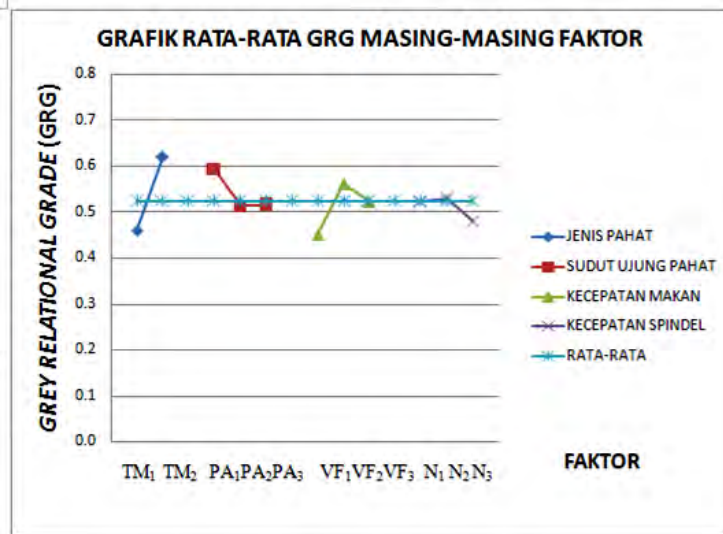
Penghitungan nilai rata-rata GRG dilakukan pada setiap level dari kombinasi variabel proses. Tabel 4.6 menunjukkan hasil penghitungan nilai rata-rata GRG dan berfungsi untuk memudahkan penentuan kombinasi variabel proses yang terbaik.

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

Variabel proses Proses	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
Jenis pahat (TM)	0.4603	0.6201		0.1598
Sudut ujung pahat (PA)	0.5929	0.5132	0.5144	0.0797
Kecepatan makan (VF)	0.4503	0.5609	0.5222	0.1106
Kecepatan spindel (N)	0.5226	0.5303	0.4805	0.0499
Rata-rata		0.5243		

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, kecepatan spindel dan kecepatan makan 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	Level 2	HSS-Cobalt
Sudut ujung pahat (°)	Level 1	90
Kecepatan makan (mm/menit)	Level 2	100
Kecepatan spindel (rpm)	Level 2	2500

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 2.44 yang dijabarkan sebagai berikut:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{T^2}{N}$$

$$\begin{aligned} SS_T &= (0.4855 - 0.5243)^2 + (0.4933 - 0.5243)^2 + (0.5108 - 0.5243)^2 + \\ &(0.4128 - 0.5243)^2 + (0.4540 - 0.5243)^2 + (0.4759 - 0.5243)^2 + (0.3609 - \\ &0.5243)^2 + (0.4210 - 0.5243)^2 + (0.5283 - 0.5243)^2 + (0.5333 - 0.5243)^2 + \\ &(0.8028 - 0.5243)^2 + (0.7319 - 0.5243)^2 + (0.4791 - 0.5243)^2 + \\ &(0.5115 - 0.5243)^2 + (0.7460 - 0.5243)^2 + (0.4303 - 0.5243)^2 + \\ &(0.6829 - 0.5243)^2 + (0.6628 - 0.5243)^2 \end{aligned}$$

$$SS_T = 0.28046$$

Contoh penghitungan untuk jumlah kuadrat total variabel proses sudut ujung pahat dengan menggunakan persamaan 2.45 adalah sebagai berikut:

$$SS_{PA} = \left[\sum_{i=1}^{kA} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF$$

$$SS_{PA} = [(0.5929 - 0.5243)^2 + (0.5132 - 0.5243)^2 + (0.5144 - 0.5243)^2] - 3$$

$$SS_{PA} = 0.025054$$

Contoh penghitungan rata-rata kuadrat untuk variabel kecepatan spindle berdasarkan persamaan 2.45 adalah sebagai berikut:

$$MS_{PA} = \frac{SS_{PA}}{v_{PA}}$$

$$MS_{PA} = \frac{0.025054}{2}$$

$$MS_{PA} = 0.012527$$

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

Tabel 4.8 ANAVA untuk GRG

Source	DF	Seq SS	MS	F	P
TM	1	0.114872	0.114872	116.52	0
PA	2	0.025054	0.012527	12.71	0.002
VF	2	0.079687	0.039843	40.42	0
N	2	0.050989	0.025495	25.86	0
Error	10	0.009858	0.000986		
Total	17	0.28046			

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, kecepatan spindel dan kecepatan makan dipilih secara *fixed*, sehingga pengujian hipotesis yang digunakan adalah:

1. Variabel proses jenis pahat (TM)

$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$ (variabel proses jenis pahat (TM) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\alpha_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, a$ (variabel proses jenis pahat (TM) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 116.52$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_{TM}, v_E} = F_{0,05,1,10} = 4.96$, sehingga H_0 ditolak, karena $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses 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: $F_{hitung} = 12.71$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_{PA}, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4.10$, sehingga H_0 ditolak, karena $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses sudut ujung pahat (PA) memiliki pengaruh terhadap GRG.

3. Variabel proses kecepatan makan (VF)

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ (variabel proses kecepatan spindel (N) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

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

Kesimpulan: $F_{hitung} = 40.42$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_N, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4.10$, sehingga H_0 ditolak, karena $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses kecepatan makan (VF) memiliki pengaruh terhadap GRG.

4. Variabel proses kecepatan spindel (N)

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

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

Kesimpulan: $F_{hitung} = 25.86$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_A, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4.10$, sehingga H_0 ditolak, karena $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses kecepatan spindel (N) memiliki pengaruh terhadap GRG.

Dari ANAVA untuk GRG dapat disimpulkan bahwa jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan spindel dan kecepatan makan 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 kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besarnya kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka hal tersebut mengindikasikan adanya variabel proses yang berpengaruh terabaikan.

Persen kontribusi dihitung dengan menggunakan persamaan 2.65 dan 2.66. 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:

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

$$SS'_{PA} = 0.025054 - (2 \times 0.000986)$$

$$SS'_{PA} = 0.023082$$

sehingga

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

$$\rho_{PA} = \frac{0.023082}{0.28046} \times 100\%$$

$$\rho_{PA} = 8.23\%$$

Tabel 4.9 ANAVA dan Persen Kontribusi untuk GRG

Source	DF	SS	MS	F	P	% Kontribusi
TM	1	0.114872	0.114872	116.52	0	40.61%
PA	2	0.025054	0.012527	12.71	0.002	8.23%
VF	2	0.079687	0.039843	40.42	0	27.71%
N	2	0.050989	0.025495	25.86	0	17.48%
Error	10	0.009858	0.000986			5.98%
Total	17	0.28046				100%

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil penghitungan persen kontribusi menunjukkan bahwa variabel proses jenis pahat (TM) memberikan kontribusi sebesar 40.61% untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati secara serentak, diikuti oleh variabel proses kecepatan makan (VF) sebesar 27.71%, variabel proses kecepatan spindel (N) sebesar 17.48% dan variabel proses sudut ujung pahat (PA) sebesar 8.23%.

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 (TM) pada level 2
2. Variabel proses sudut ujung pahat (PA) pada level 1
3. Variabel proses kecepatan makan (VF) pada level 2
4. Variabel proses kecepatan makan (N) pada level 2

Penghitungan prediksi nilai GRG dengan menggunakan persamaan 2.64 dijabarkan sebagai berikut:

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

$$\hat{\gamma} = 0.5243 + (0.6201 - 0.5243) + (0.5929 - 0.5243) \\ + (0.5609 - 0.5243) + (0.5303 - 0.5243)$$

$$\hat{\gamma} = 0.7312$$

Dengan demikian, nilai GRG yang dihitung untuk menghasilkan respon yang optimum dari kombinasi variabel proses adalah 0.7312.

Penghitungan banyaknya pengamatan efektif (n_{eff}) dilakukan terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.69, kemudian penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.67 dan 2.68. 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 0.001239. Penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum adalah sebagai berikut:

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

$$CI_1 = \sqrt{\frac{4.96 \times 0.000986}{4.5}}$$

$$CI_1 = \pm 0.0330$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata GRG pada kombinasi yang optimal (GRG prediksi) adalah 0.7312 ± 0.0330 atau $0.6983 \leq GRG_{\text{prediksi}} \leq 0.7642$.

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, kebulatan 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				F _z (N)	M _t (Nm)	Kebulatan (μ m)	Kekasaran permukaan (μ m)
	TM	PA	N	VF				
1	2	1	2	2	25.75	0.43	115	0.973
2	2	1	2	2	26.41	0.46	105	0.972
3	2	1	2	2	24.34	0.45	110	0.98
Rata-rata					25.5	0.45	110	0.975

Sumber: Hasil pengukuran

Penghitungan rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.56 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	SNRA _{F_z}	SNRA _T	SNRA _R	SNRA _{SR}
1	-28.1308	6.9357	-40.8279	0.2199

Sumber: Hasil penghitungan

Normalisasi dilakukan pada rasio S/N dari masing-masing respon dengan menggunakan persamaan 2.59. Hasil penghitungan proses normalisasi ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi

No	xi _{F_z}	xi _T	xi _R	xi _{SR}
1	0.9393	0.9893	0.5406	0.7694

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.62 yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 *Deviation sequence* Masing-Masing Respon

No	Δ_{F_z}	Δ_T	Δ_R	Δ_{SR}
1	0.0607	0.0107	0.4594	0.2306

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan GRG dilakukan pada langkah akhir yang sebelumnya didahului dengan perhitungan GRC menggunakan persamaan 2.63. 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 F_z	GRC T	GRC R	GRC SR	GRG
1	0.8918	0.9790	0.5211	0.6844	0.7691

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:

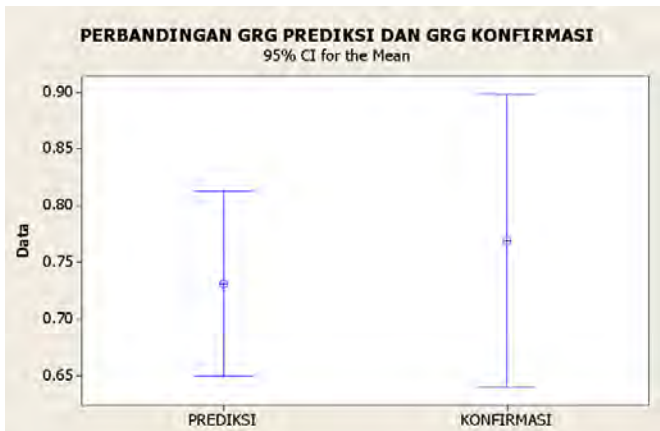
$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;vE} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_2 = \sqrt{4.96 \times 0.000986 \times \left[\frac{1}{4.5} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_2 = \pm 0.0521$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata GRG eksperimen konfirmasi adalah 0.7691 ± 0.0584 atau $0.7170 \leq GRG_{konfirmasi} \leq 0.8212$.

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 Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dengan Respon Hasil Kombinasi Optimum

Pada penelitian ini juga dilakukan perbandingan eksperimen menggunakan kombinasi optimum dengan eksperimen menggunakan kombinasi awal. Kombinasi awal merupakan kombinasi variabel proses yang diatur pada level tengah, dalam hal ini variabel proses diatur pada level 2 untuk variabel proses yang memiliki 3 level, sedangkan pada variabel proses yang memiliki 2 level akan dilakukan perbandingan dengan menggunakan level kondisi optimum yang didapat dari hasil optimasi. Hasil optimasi menunjukkan bahwa jenis pahat yang menghasilkan respon optimum adalah jenis pahat level 2 (*HSS-Cobalt*). Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk mengetahui *improvement* dari respon secara serentak maupun secara individu. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon pada kombinasi awal dengan hasil respon pada kombinasi optimum. Level dari variabel proses-variabel proses untuk kombinasi awal ditunjukkan oleh Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Kombinasi Variabel Proses untuk Kombinasi Awal

Variabel proses	Kombinasi Awal	
	Nilai	Level
Jenis pahat	HSS-Cobalt	2
Sudut ujung pahat	118°	2
Kecepatan spindel	2500 rpm	2
Kecepatan makan	100 m/menit	2

Sumber: Hasil pemilihan kombinasi awal

Eksperimen dengan kombinasi awal dilakukan sebanyak tiga kali replikasi, dan hasil dari masing-masing respon dari eksperimen tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal

No	Kombinasi Variabel proses				F_z (N)	M_t (Nm)	Kebulatan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)
	TM	PA	N	VF				
1	2	2	2	2	55.42	1.15	115	0.982
2	2	2	2	2	54.85	1.13	110	0.97
3	2	2	2	2	56.23	1.05	120	0.988
Rata-rata					55.5	1.11	115	0.98

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.56 yang didasarkan pada nilai-nilai respon yang didapatkan dari eksperimen konfirmasi. Hasil perhitungan rasio S/N dari masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Rasio S/N Eksperimen Kombinasi Awal

No	SNRA F_z	SNRA T	SNRA R	SNRA SR
1	-34.8858	-0.9064	-41.2139	0.1754

Sumber: Hasil penghitungan

Normalisasi dilakukan pada rasio S/N dari masing-masing respon dengan menggunakan persamaan 2.59. Hasil penghitungan proses normalisasi ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Kombinasi Awal

No	ξ_{FZ}	ξ_T	ξ_R	ξ_{SR}
1	0.4801	0.2693	0.4764	0.7654

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.62 yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 *Deviation Sequence* Masing-Masing Respon

No	Δ_{Fz}	Δ_T	Δ_R	Δ_{SR}
1	0.5199	0.7307	0.5236	0.2346

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan GRG dilakukan pada langkah akhir yang sebelumnya didahului dengan perhitungan GRC menggunakan persamaan 2.63. Tabel 4.20 menunjukkan nilai GRC dan GRG hasil dari eksperimen konfirmasi. Nilai GRG didapatkan dari penghitungan rata-rata nilai GRC pada respon.

Tabel 4.20 GRG Eksperimen Kombinasi Awal

No	GRC _{Fz}	GRC _T	GRC _R	GRC _{SR}	GRG
1	0.4902	0.4063	0.4885	0.6806	0.5164

Sumber: Hasil penghitungan

Tabel 4.21 menunjukkan perbandingan antara GRG pada kombinasi awal dengan kombinasi optimum. Nilai GRG berdasarkan eksperimen konfirmasi adalah sebesar 0.7691 dan nilai GRG pada kombinasi awal adalah sebesar 0.5164.

Dengan demikian, nilai GRG berdasarkan eksperimen konfirmasi mengalami peningkatan sebesar 48.9% dibandingkan dengan nilai GRG kombinasi awal.

Tabel 4.21 Perbandingan GRG Kombinasi Awal dengan Kombinasi optimum

Kombinasi	GRG
Kombinasi awal	0.5164
Kombinasi optimum	0.7691
Peningkatan	48.9%

Sumber: Hasil penghitungan

Perbandingan dari masing-masing respon secara individu antara kombinasi awal dengan kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.22. Karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari semua respon terpenuhi. Hal ini ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai dari semua respon tersebut pada kombinasi optimum. Besarnya penurunan respon gaya tekan adalah sebesar 54%, torsi sebesar 59%, kebulatan sebesar 4% dan kekasaran permukaan sebesar 1%.

Tabel 4.22 Perbandingan Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum

Respon	Kombinasi Awal	Kombinasi Optimum	Keterangan	
Gaya tekan (N)	55.5	25.50	54%	Turun
Torsi (Nm)	1.11	0.45	59%	Turun
Kebulatan (μm)	115	110	4%	Turun
Kekasaran permukaan (μm)	0.980	0.975	1%	Turun

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.10 Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum

Nilai respon hasil kombinasi awal dan nilai repon hasil kombinasi optimum perlu diuji secara statistik untuk mengetahui apakah nilai-nilai tersebut sama atau berbeda. Adapun uji statistik yang digunakan adalah:

- a. Uji kenormalan
- b. Uji kesamaan variansi
- c. Uji kesamaan rata-rata

a. Uji kenormalan data

- Hipotesis untuk uji kenormalan data adalah sebagai berikut:

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual berdistribusi lain

- Kriteria penolakan adalah:

H_0 ditolak jika nilai $p\text{-value} < \alpha = 5\% = 0,05$

- Kesimpulan:

Berdasarkan kriteria penolakan, hasil dari uji kenormalan ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Hasil Uji Kenormalan

Respon	P-value	Kondisi H_0	Keterangan
Gaya tekan	>0.15	Gagal tolak	Berdistribusi normal
Torsi	>0.15	Gagal tolak	Berdistribusi normal
Kebulatan	>0.15	Gagal tolak	Berdistribusi normal
Kekasaran permukaan	>0.15	Gagal tolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil penghitungan dengan Minitab 16

b. Uji kesamaan variansi

- Hipotesis untuk uji kesamaan variansi adalah sebagai berikut:

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

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

Dengan:

σ_1^2 : variansi respon hasil eksperimen kombinasi awal

σ_2^2 : variansi respon hasil eksperimen kombinasi optimum

- Kriteria penolakan adalah:
 H_0 ditolak jika nilai $p_{value} < \alpha = 5\% = 0,05$
- Kesimpulan:
 Berdasarkan kriteria penolakan, hasil dari uji kesamaan variansi ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Hasil Uji Kesamaan Variansi

Respon	P-value	Kondisi H_0	Variansi
Gaya tekan	0.602	Gagal tolak	Sama
Torsi	0.154	Gagal tolak	Sama
Kebulatan	1.000	Gagal tolak	Sama
Kekasaran permukaan	0.369	Gagal tolak	Sama

Sumber: Hasil penghitungan dengan Minitab 16

c. Uji kesamaan rata-rata

- Hipotesis untuk uji kesamaan rata-rata adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Dengan:

μ_1 : rata-rata respon hasil eksperimen kombinasi awal

μ_2 : rata-rata respon hasil eksperimen kombinasi optimum

- Kriteria penolakan adalah:
 H_0 ditolak jika nilai $p_{value} < \alpha = 5\% = 0,05$
- Kesimpulan:

Berdasarkan kriteria penolakan, hasil dari uji kesamaan rata-rata ditunjukkan pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Hasil Uji Kesamaan Rata-Rata

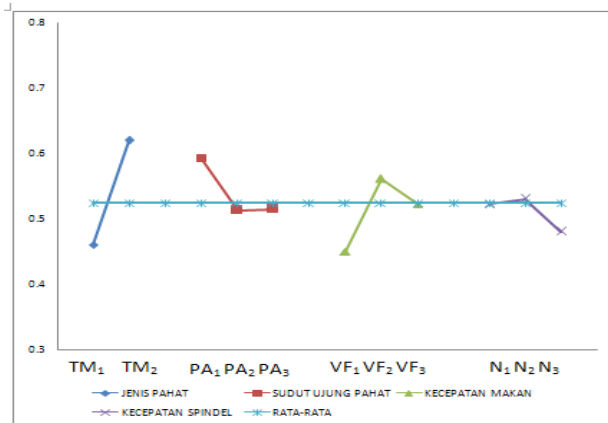
Respon	P-value	Kondisi H_0	Rata-rata
Gaya tekan	0.000	Ditolak	Berbeda
Torsi	0.002	Ditolak	Berbeda
Kebulatan	0.288	Gagal tolak	Sama
Kekasaran permukaan	0.483	Gagal tolak	Sama

Sumber: Hasil penghitungan dengan Minitab

Hasil uji kesamaan rata-rata menunjukkan bahwa rata-rata dari respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan pada kombinasi optimum turun jika dibandingkan dengan rata-rata pada kombinasi awal.

4.2.11 Pengaruh Variabel proses yang Signifikan Terhadap GRG

Analisis variansi pada tabel 4.9 menunjukkan bahwa variabel proses jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan, dan kecepatan spindel memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRG yang mewakili respon gaya tekan (F_z), torsi (T), kebulatan (R) dan kekasaran permukaan (SR). Hasil penghitungan persen kontribusi menunjukkan bahwa jenis pahat (TM) memberikan persen kontribusi terhadap variansi total respon yang diamati sebesar 40.61%, diikuti oleh variabel proses kecepatan makan (VF) sebesar 27.71%, variabel proses putaran spindel (N) sebesar 17.48%, dan variabel proses sudut ujung pahat sebesar 8.23%. Pengaruh masing-masing variabel proses untuk mengukur variansi total dari respon yang diamati ditunjukkan pada grafik rata-rata GRG seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik rata-rata untuk respon GRG

Berdasarkan grafik rata-rata GRG yang ditunjukkan pada gambar 4.3, dapat dilihat pengaruh dari masing-masing variabel proses untuk mengurangi variansi total dari respon secara serentak. Variabel proses jenis pahat (TM) 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. Pahat HSS-Cobalt memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan pahat HSS. Hal ini menunjukkan bahwa semakin keras material pahat yang digunakan, maka kualitas lubang yang dihasilkan semakin baik. Pada penelitian ini dapat diketahui bahwa untuk semua respon yang diamati dengan menggunakan pahat HSS-Cobalt (level 2) yaitu gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan memiliki karakteristik kualitas yang lebih baik dibanding dengan pahat HSS. Jenis pahat HSS dan HSS-Cobalt memiliki geometri yang berbeda. Jenis pahat HSS memiliki bentuk mata potong tipe S, sedangkan pahat HSS-Cobalt memiliki bentuk mata potong tipe X. Bentuk mata potong tipe S memiliki bidang potong yang lebih besar jika

dibandingkan dengan mata potong tipe X pada sudut ujung pahat yang sama. Pahat dengan mata potong tipe X menghasilkan gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan yang lebih kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa pahat HSS-*Cobalt* menghasilkan kualitas lubang yang lebih baik jika dibandingkan dengan pahat HSS. Variabel jenis pahat (TM) memiliki pengaruh paling signifikan pada respon kebulatan.

Variabel proses sudut ujung pahat (PA) memiliki pengaruh yang signifikan untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati. Sudut ujung pahat level 1 adalah sudut ujung pahat yang besarnya 90° , sedangkan sudut ujung pahat level 2 dan 3 masing-masing besarnya adalah 118° dan 135° . Dari grafik rata-rata GRG untuk variabel proses sudut ujung pahat nilai GRG terbesar didapatkan pada level 1. Pada penelitian ini kondisi optimum dapat dicapai dengan menggunakan pahat yang memiliki sudut ujung pahat lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil sudut ujung pahat maka karakteristik kualitas lubang hasil penggurdian semakin baik. Variabel proses sudut ujung pahat memiliki pengaruh paling signifikan pada respon gaya tekan.

Variabel proses kecepatan makan (VF) memiliki pengaruh yang signifikan untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati. Pada penelitian ini kondisi optimum dapat dicapai dengan menggunakan kecepatan makan level 2. Kecepatan makan level 2 adalah kecepatan makan yang besarnya adalah 100 m /menit. Semakin besar kecepatan makan maka kualitas lubang yang dihasilkan semakin baik, hal ini dapat dilihat dari kenaikan nilai rata-rata GRG dari level 1 ke level 2. Akan tetapi terjadi penurunan rata-rata nilai GRG dari level 2 ke level 3. Yang berarti bahwa kecepatan makan yang direkomendasikan untuk melakukan penggurdian material komposit adalah pada nilai tertentu karena kenaikan kecepatan makan dari level 2 ke level 3 tidak menaikkan rata-

rata GRG yang mewakili seluruh respon yang diamati. Variabel proses kecepatan makan memiliki pengaruh paling signifikan pada respon torsi.

Variabel proses kecepatan spindel (N) memiliki pengaruh yang signifikan untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati. Pada penelitian ini kondisi optimum dapat dicapai dengan menggunakan kecepatan spindel level 2. Jika dilihat dari grafik rata-rata GRG untuk kecepatan spindel tidak terdapat kenaikan yang signifikan dari level 1 ke level 2. Hal ini terjadi karena pemilihan level yang digunakan untuk penelitian. Level yang digunakan memiliki rentang yang terlalu kecil, sehingga sulit untuk melihat perbedaan atau pengaruh dari variabel proses terhadap rata-rata GRG pada level 1 dan level 2. Terjadi penurunan rata-rata GRG dari level 2 ke level 3, sehingga dapat disimpulkan semakin besar kecepatan spindel semakin kecil nilai rata-rata GRG yang mewakili seluruh respon yang diamati. Variabel proses kecepatan spindel memiliki pengaruh paling signifikan pada respon kekasaran permukaan.

4.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Respon Individu

Besar kontribusi variabel proses yaitu jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan spindel dalam mengurangi variansi masing-masing respon yang diamati yaitu gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan dapat diketahui dengan menggunakan analisis variansi. Tabel 4.22 menunjukkan besarnya kontribusi variabel proses terhadap respon individu.

Tabel 4.26 Persen Kontribusi Variabel Proses terhadap Respon Individu

Sumber	Gaya tekan		Torsi		Kebulatan		Kekasaran permukaan	
	F	%	F	%	F	%	F	%
Jenis pahat (TM)	98.59	14.85%	15.7	6.73%	468.02	71.94%	7.5	10.77%
Sudut ujung pahat (PA)	351.73	80.75%	3.35	2.36%	68.84	21.67%	2.28	3.18%
Kecepatan makan (VF)	2.18	0.29%	0.68	76.77%	11.42	3.29%	55.84	0.43%
kecepatan spindel (N)	9.3	1.91%	56.08	0.74%	1.21	0.07%	1.53	73.75%
Error	2.19%		13.40%		3.03%		12.72%	

Sumber: Hasil perhitungan

4.3.1 Pengaruh Variabel Proses terhadap Gaya Tekan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi gaya tekan adalah sudut ujung pahat dan jenis pahat seperti terlihat pada Tabel 4.26. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi gaya tekan paling besar diberikan oleh variabel sudut ujung pahat sebesar 80.75%, diikuti oleh jenis pahat sebesar 14.85%, kecepatan spindel sebesar 1.91% dan kecepatan makan sebesar 0.29%. Sudut ujung pahat memiliki kontribusi paling besar untuk mengurangi variansi gaya tekan, hal ini dikarenakan semakin besar sudut ujung pahat maka semakin besar nilai K_r . Semakin besar nilai K_r , maka semakin besar gaya tekan yang dihasilkan pada proses penggurdian. Hal ini sesuai dengan persamaan untuk menghitung gaya tekan seperti ditunjukkan pada persamaan 2.30. Gaya tekan selain dipengaruhi oleh sudut K_r , juga dipengaruhi oleh besarnya selisih diameter pahat dengan diameter yang dibentuk oleh *chisel edge*. Semakin besar sudut ujung pahat maka semakin kecil diameter yang dibentuk oleh

chisel edge. Sehingga selisih antara diameter pahat dan diameter yang dibentuk oleh *chisel edge* semakin besar. Semakin besar selisih nilai ini maka semakin besar gaya tekan yang terjadi. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.30 untuk menghitung gaya tekan.

4.3.2 Pengaruh Variabel Proses terhadap Torsi

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi torsi adalah kecepatan makan dan jenis pahat seperti terlihat pada Tabel 4.26. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi torsi paling besar diberikan oleh variabel kecepatan makan sebesar 76.77%, diikuti oleh jenis pahat sebesar 6.73%, sudut ujung pahat sebesar 2.36% dan kecepatan spindel sebesar 0.74%. Kecepatan makan memiliki kontribusi paling besar untuk mengurangi variansi torsi, hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung torsi yang terjadi selama proses penggurdian yang dipengaruhi oleh kecepatan 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 Kebulatan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi kebulatan adalah jenis pahat dan sudut ujung pahat seperti terlihat pada Tabel 4.26. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi kebulatan paling besar diberikan oleh variabel jenis pahat sebesar 71.94%, diikuti oleh sudut ujung pahat sebesar 21.67%, kecepatan makan sebesar 3.29% dan kecepatan spindel sebesar 0.07%. Jenis pahat memiliki pengaruh yang paling besar untuk mengurangi variansi dari respon kebulatan, hal ini disebabkan karena material pahat yang digunakan pada penelitian ini memiliki nilai kekerasan yang berbeda, sifat dari material komposit yang tersusun atas serat fiber gelas yang keras

memerlukan material pahat yang memiliki nilai kekerasan lebih tinggi. Selain memiliki kekerasan yang berbeda jenis pahat yang digunakan juga memiliki geometri yang berbeda. Pahat HSS memiliki bentuk mata potong tipe S dan pahat HSS-*Cobalt* memiliki bentuk mata potong tipe X. Bentuk mata potong tipe X menghasilkan kebulatan yang lebih baik dari tipe S karena bentuk mata potong tipe X memiliki bidang kontak yang lurus. Hal ini berbeda jika dibandingkan bentuk mata potong tipe S yang memiliki bidang kontak melengkung.

4.3.4 Pengaruh Variabel Proses terhadap kekasaran Permukaan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi kekasaran permukaan adalah kecepatan spindle dan jenis pahat seperti terlihat pada Tabel 4.26. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi kekasaran permukaan paling besar diberikan oleh variabel kecepatan spindle sebesar 73.75%, diikuti oleh jenis pahat sebesar 10.77%, sudut ujung pahat sebesar 3.18% dan kecepatan makan sebesar 0.74%. Kecepatan spindle memiliki pengaruh yang paling besar untuk mengurangi variansi kekasaran permukaan. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi kecepatan spindle maka akan menimbulkan panas yang semakin tinggi pada material komposit yang dipotong. Timbulnya panas ini akan menurunkan kekerasan dari fasa penyusun komposit yaitu matriks *epoxy*. Melunaknya matriks pada komposit akan memudahkan material untuk terpotong sehingga kekasaran permukaan yang dihasilkan juga semakin kecil. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Tsao (2008).

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB V

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 dengan Gabungan Metode Taguchi- GRA pada Penggurdian Komposit *Glass 7781/epoxy* yang ditumpuk,” dapat disimpulkan, bahwa:

1. Kontribusi dari variabel-variabel proses dalam mengurangi variansi total dari respon yang diamati yaitu gaya tekan (F_z), torsi (T), kebulatan (R) dan kekasaran permukaan (SR) secara serentak adalah:

- Jenis pahat (TM) sebesar 40.61%.
- Sudut ujung pahat (PA) sebesar 8.23%.
- Kecepatan makan (VF) sebesar 27.71%.
- Kecepatan spindel (N) sebesar 17.48%.

2. Pengaturan yang tepat dari kombinasi variabel-variabel proses untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati yaitu gaya tekan (F_z), torsi (T), kebulatan (R), dan kekasaran permukaan (SR) secara serentak adalah:

- Jenis pahat (TM) pada level 2 (pahat HSS-*Cobalt*).
- Sudut ujung pahat (PA) pada level 1 sebesar 90°.
- Kecepatan makan (VF) pada level 2 sebesar 100 mm/menit.
- Kecepatan spindel (N) pada level 2 sebesar 2500 rpm.

5.2 Saran

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

1. Pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan pemilihan variabel proses dan level dengan rentang yang tepat agar kondisi optimum dapat dicapai dengan akurat.
2. Memperbaiki metode pengepakan material komposit yang ditumpuk pada *back up plate*. Metode pengepakan benda kerja yang digunakan pada penelitian ini perlu dilakukan penyempurnaan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrao, A.M., P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, P. Reis, J. Paulo Davim, 2007. "Drilling of fiber reinforced plastics." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, hal. 1-7.
- Callister, W. D., 2007. *Material Science and Engineering: An Introduction*. United States of America: Quebeecor Versailles.
- 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 (5), hal. 162-183.
- Deng, J., 1989. "Introduction to Grey System." *Journal of Grey System*, Vol. 1, hal. 1-24.
- Faraz, A., Biermann, D., dan Weinert, K., 2009. "Cutting Edge Rounding: An Innovative Tool Wear Criterion in Drilling CFRP Composite Laminate." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, hal. 1185-1196.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., dan Davim, J. P., 2007. "Taguchi Multiple-Performance Characteristics Optimization in Drilling of Medium Density Fibreboard (MDF) to Minimize Delamination Using Utility Concept." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, hal. 73-78.
- Hill, R., dan Jensen, H. C., 1969. *Modern Engineering Tolerancing*, McGraw-Hill Book Company, Canada.
- 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.
- Jones, P. M., 1975. *Mechanics of Composite Materials*, Scripta Book Company, Washington D.C.
- Kilickap, E., 2010. "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of

- GFRP composite.” *ExpertSystAppli.*, Vol. 37, hal. 6116–6122.
- 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.
- Montgomery, D. C., 2009. *Design and Analysis of Experiment*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Nagaraja, Herbert, M. A., Shetty, D., Shetty, R., dan Shivamurthy, B., 2013. “Effect of Process Parameters on Delamination, Thrust Force, and Torque in Drilling of Carbon Fiber Epoxy Composite.” *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 2(8), hal. 47-51.
- Palanikumar, K., S. Prakash, dan K. Shanmugam, 2008. “Evaluation of Delamination in Drilling GFRP Composites.” *Materials and Manufacturing Process*, Vol. 23(8), hal. 858-864.
- Palanikumar, K., 2011. “Experimental investigation and optimization in drilling of GFRP composites.” *Original Research Article Measurement*, Vol. 44, hal. 2138-2148.
- Palanikumar, K., B. Latha, V.S. Shentilkumar, dan J. Paulo Davim, 2012. “Analysis on Drilling of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Composites Using Grey Relational Analysis.” *Materials and Manufacturing Process*, Vol. 27(3), hal. 297-305.
- Park, S. H., 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering 1st edition*. London: Chapman & Hall.
- Park, K. H., B. Aaron, K. Dave, K. Patrick, dan L. Jeff, 2011. “Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools.” *Original Research Article Wear*, Vol. 271, hal. 2826-2835.
- Ranganathan, S., Senthilvelan, T., dan Gopalakannan, S., 2012. “Multiple Performance Optimization in Drilling of GFRP Composites Using Grey Analysis.” *IEEE-International*

- Conference On Advance in Engineering, Science, And Management (ICAESM-2012).*
- Ross, P. J., 2008. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill Companies, Inc., Taiwan.
- Rochim, T., 1993. *Proses Permesinan, Institut Teknologi Bandung*, Bandung.
- Rochim, T., 2001. *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik, Modul 3 & 4*, Lab. Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung.
- Rijswijk, K. V., W. D. Brouwer, dan A. Beukers, 2001. *Application of Natural Fibre Composites in the Development of Rural Societies*. FAO, Rome.
- Schwartz, W. F., 1986. *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill Inc., New York.
- Soejanto, I., 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- 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 terhadap Keausan Tepi Pahat, Kekerasan Permukaan, dan Gaya Tekan pada Proses Gurdi material Baja AISI 4340." Tugas akhir yang tidak dipublikasikan, Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Tsao, C.C., 2008. "Experimental study of drilling composite materials with step-core drill." *Materials and Design*, Vol. 29, hal. 1740–1744.
- 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 Permesinan Jilid 2*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

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

NO	JP	PA	N	VF	R1	R2	RATA-RATA
1	1	1	1	1	39.18	39.06	39.12
2	1	1	2	2	42.14	42.2	42.17
3	1	1	3	3	42.19	42.15	42.17
4	1	2	1	1	66.09	65.97	66.03
5	1	2	2	2	66.15	66.21	66.18
6	1	2	3	3	66.93	66.97	66.95
7	1	3	1	2	100.204	100.196	100.2
8	1	3	2	3	113.201	113.199	113.2
9	1	3	3	1	91.6	91.4	91.5
10	2	1	1	3	29.85	29.87	29.86
11	2	1	2	1	23.19	23.13	23.16
12	2	1	3	2	25.69	25.61	25.65
13	2	2	1	2	46.83	46.87	46.85
14	2	2	2	3	58.2	58	58.1
15	2	2	3	1	42.33	42.31	42.32
16	2	3	1	3	83.804	83.796	83.8
17	2	3	2	1	73.94	74.04	73.99
18	2	3	3	2	83.62	83.54	83.58

Keterangan:

R1 : replikasi 1

R2 : replikasi 2

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

NO	JP	PA	N	VF	R1	R2	RATA-RATA
1	1	1	1	1	0.66	0.64	0.65
2	1	1	2	2	1.163	1.173	1.168
3	1	1	3	3	1.495	1.487	1.491
4	1	2	1	1	0.771	0.775	0.773
5	1	2	2	2	1.301	1.311	1.306
6	1	2	3	3	1.539	1.521	1.53
7	1	3	1	2	1.357	1.343	1.35
8	1	3	2	3	1.558	1.554	1.556
9	1	3	3	1	0.78	0.782	0.781
10	2	1	1	3	1.421	1.425	1.423
11	2	1	2	1	0.448	0.44	0.444
12	2	1	3	2	0.792	0.79	0.791
13	2	2	1	2	0.894	0.896	0.895
14	2	2	2	3	1.458	1.442	1.45
15	2	2	3	1	0.473	0.483	0.478
16	2	3	1	3	1.485	1.479	1.482
17	2	3	2	1	0.619	0.609	0.614
18	2	3	3	2	0.937	0.925	0.931

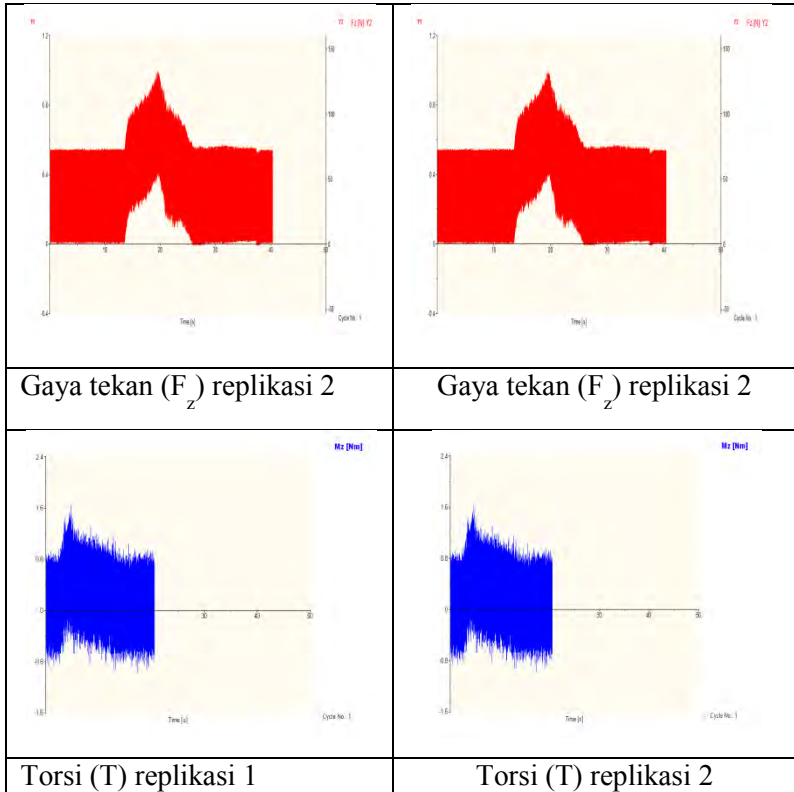
Keterangan:

R1 : replikasi 1

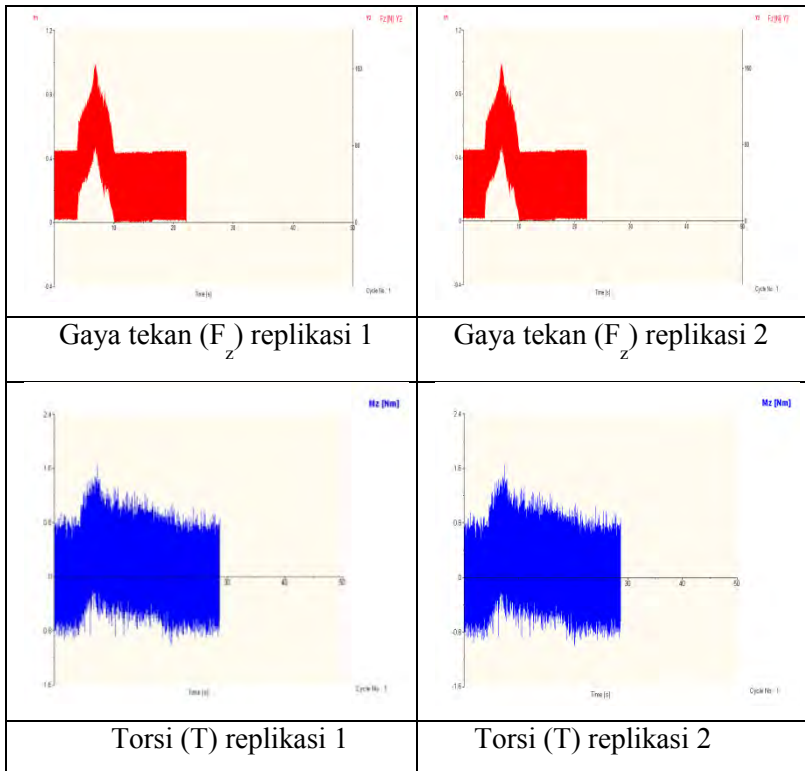
R2 : replikasi 2

LAMPIRAN 3 GRAFIK GAYA TEKAN DAN TORSI

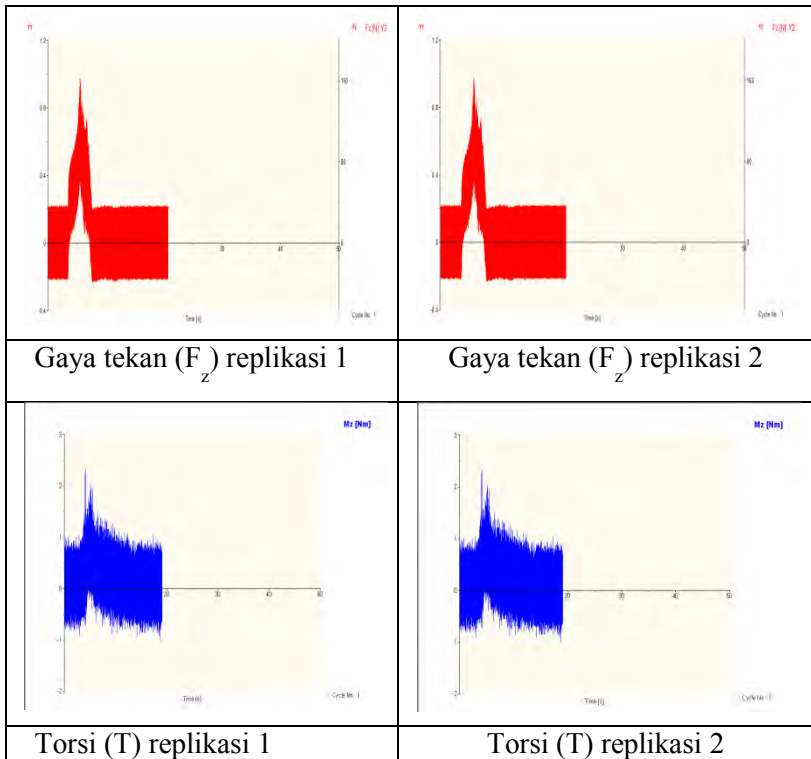
Kombinasi variabel proses 1111



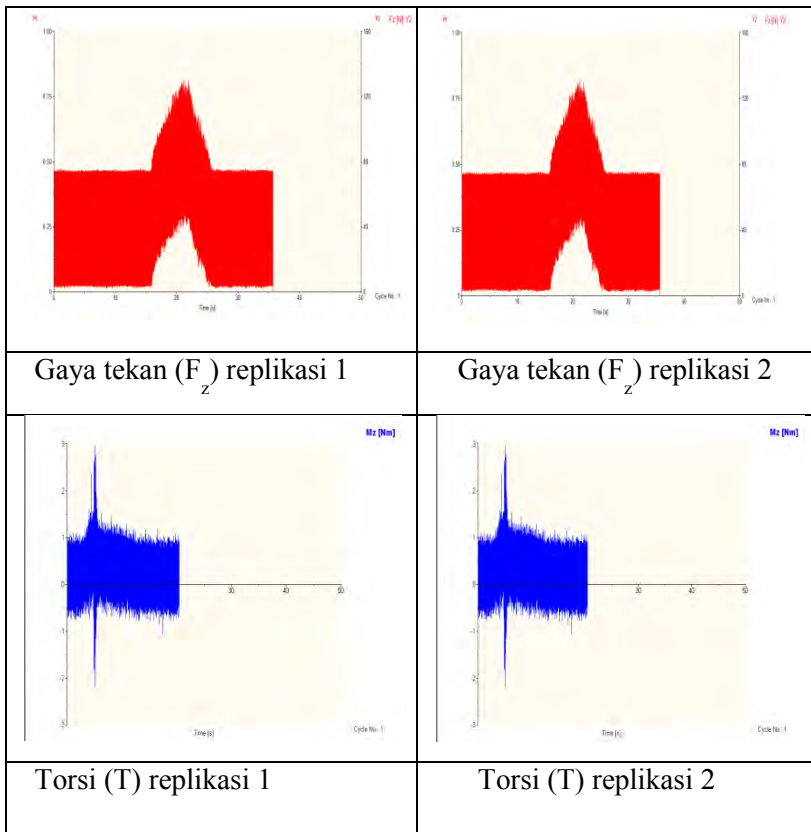
Kombinasi variabel proses 1122



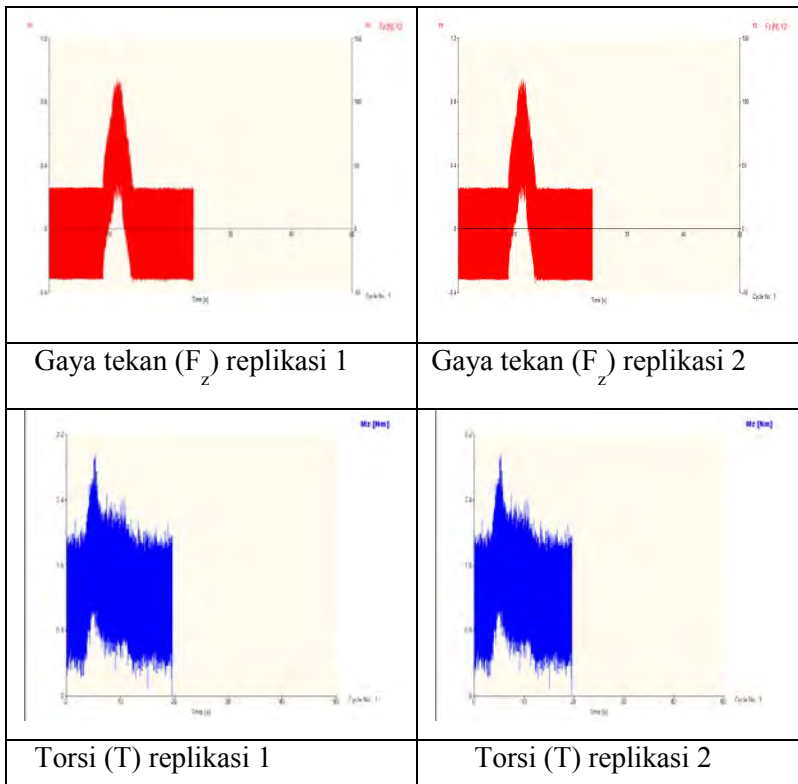
Kombinasi variabel proses 1133



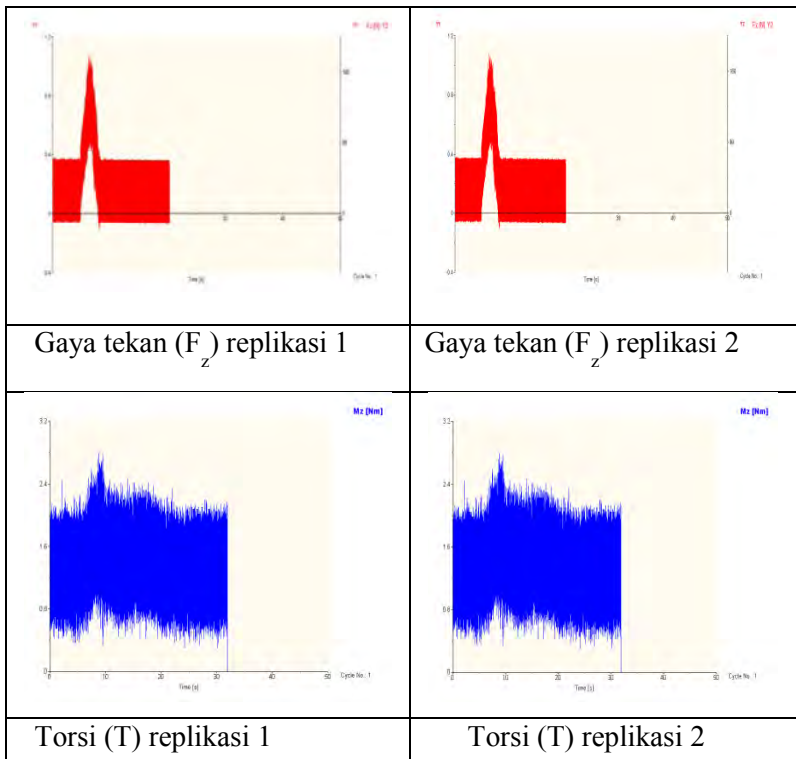
Kombinasi variabel proses 1211



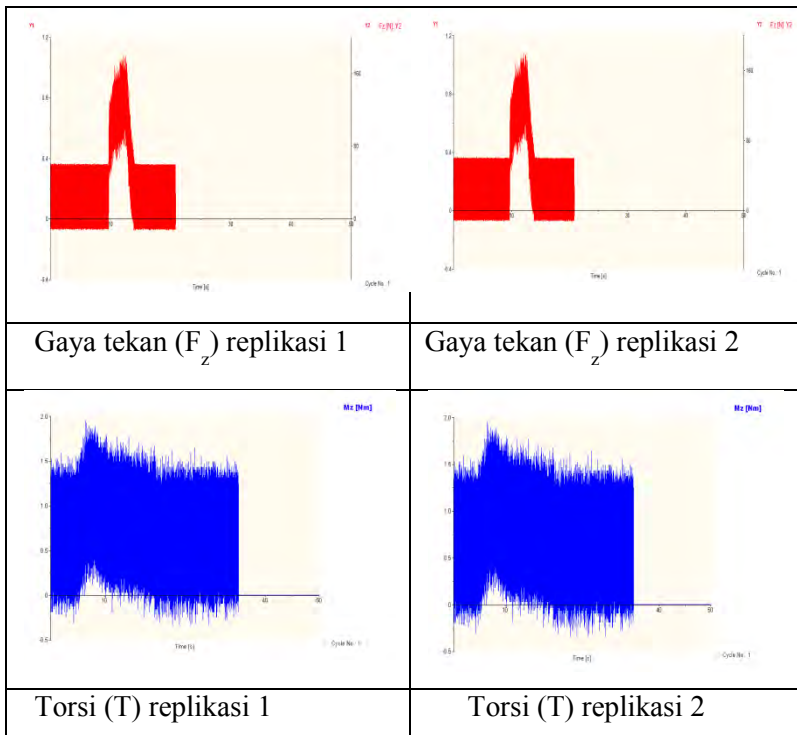
Kombinasi variabel proses 1222



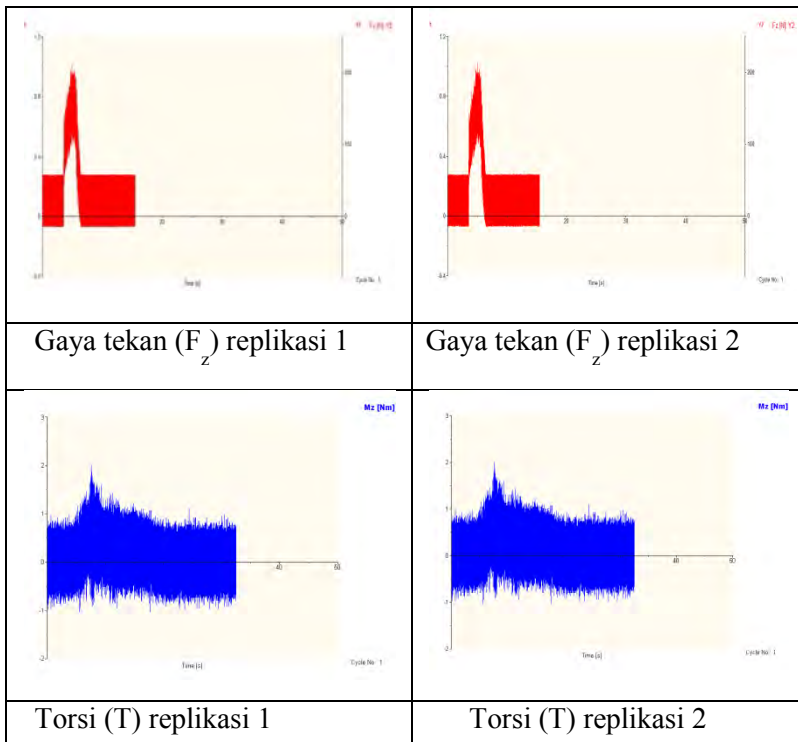
Kombinasi variabel proses 1233



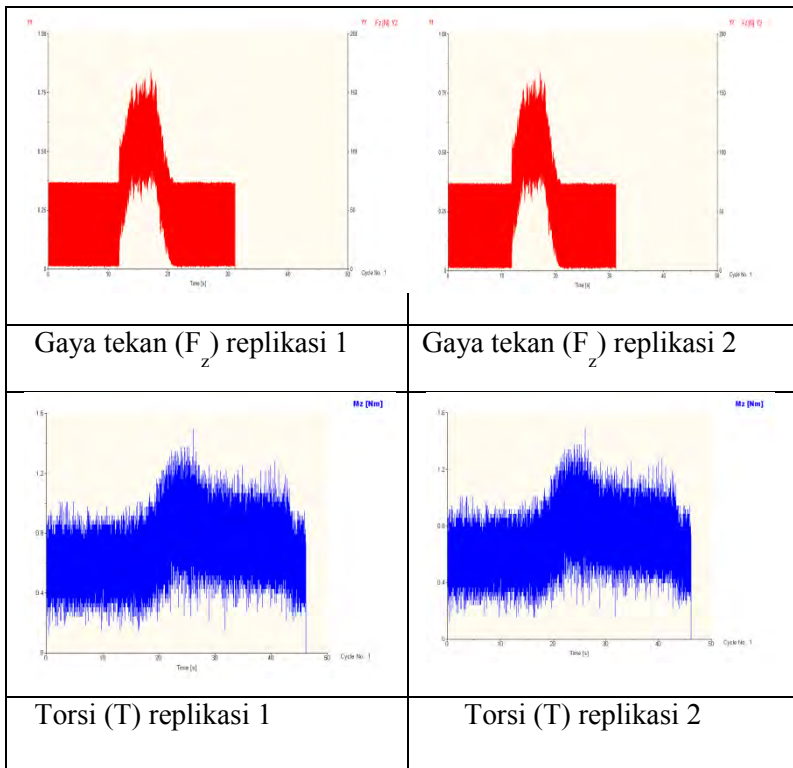
Kombinasi variabel proses 1312



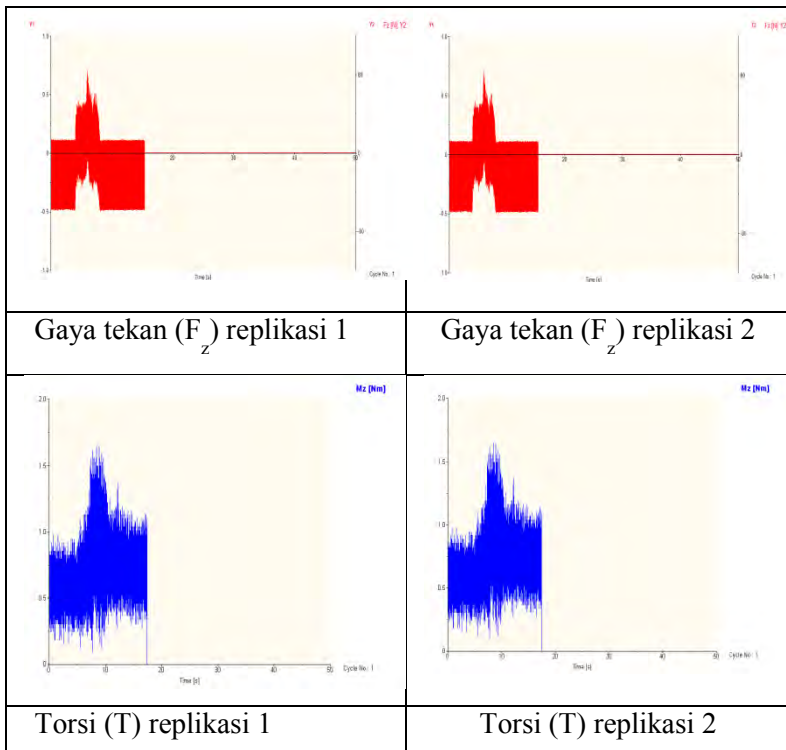
Kombinasi variabel proses 1323



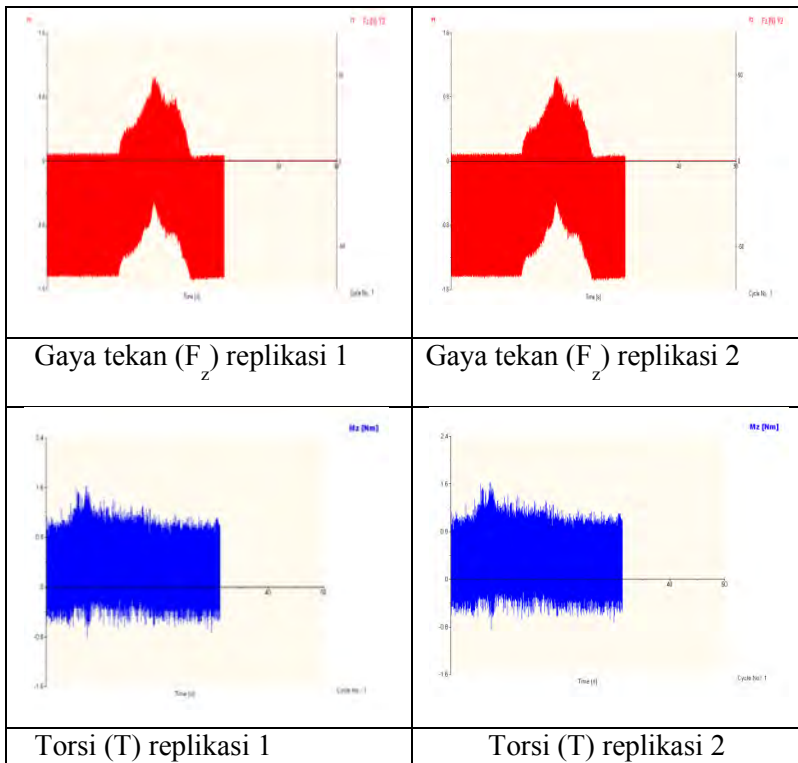
Kombinasi variabel proses 1331



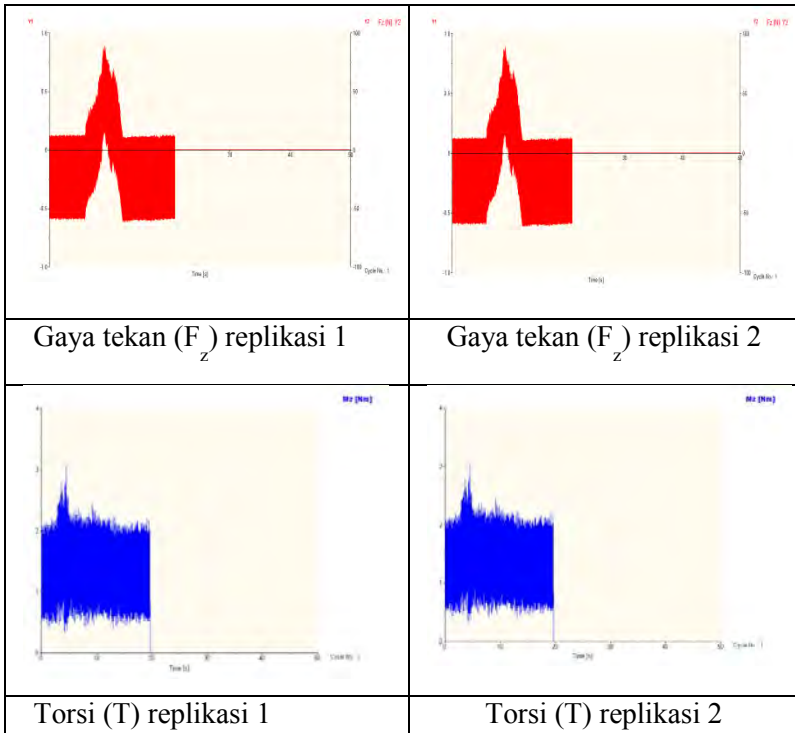
Kombinasi variabel proses 2113



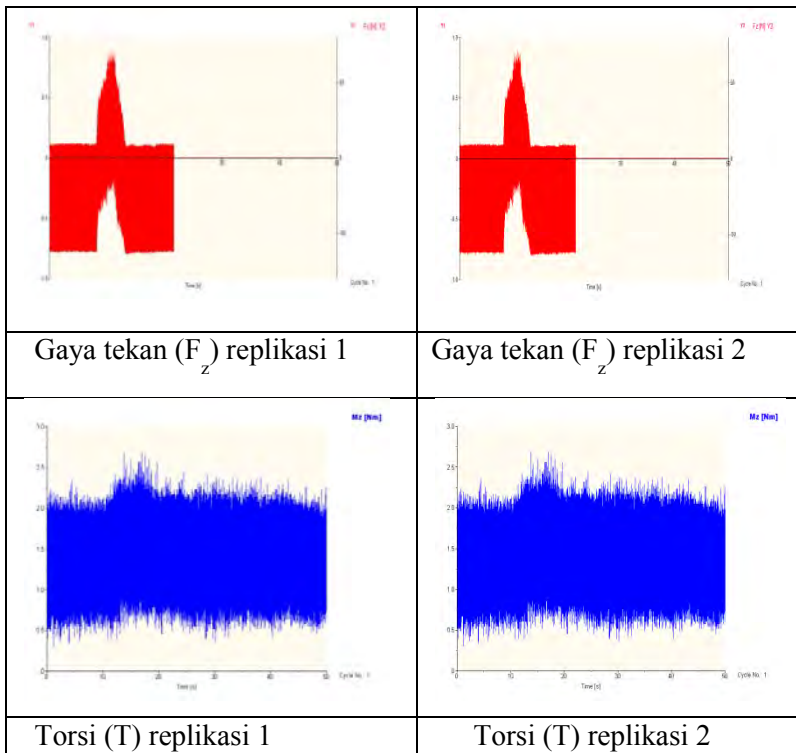
Kombinasi variabel proses 2121



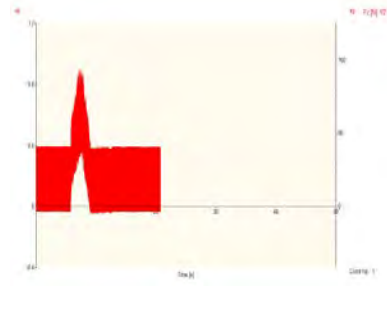
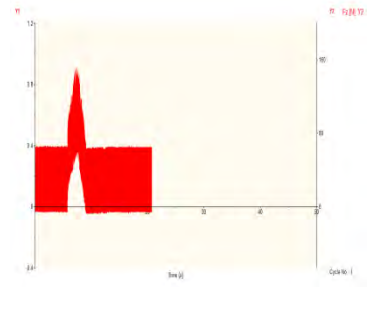
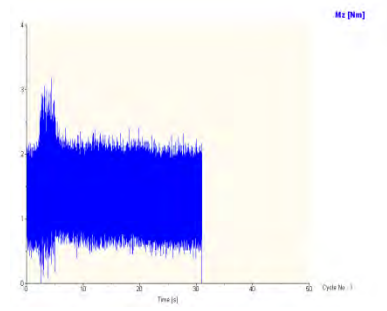
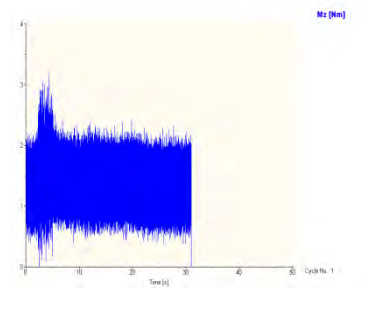
Kombinasi variabel proses 2132



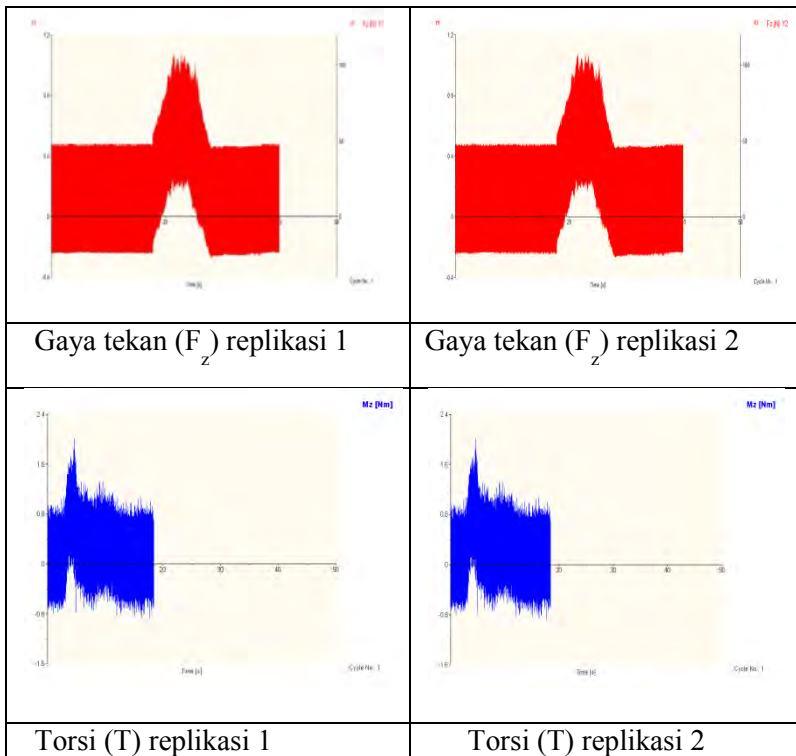
Kombinasi variabel proses 2212



Kombinasi variabel proses 2223

	
<p>Gaya tekan (F_z) replikasi 1</p>	<p>Gaya tekan (F_z) replikasi 2</p>
	
<p>Torsi (T) replikasi 1</p>	<p>Torsi (T) replikasi 2</p>

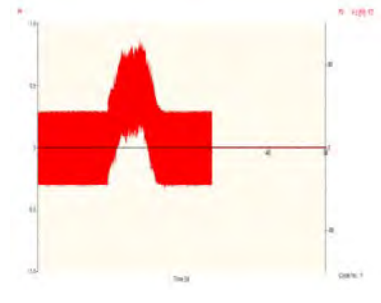
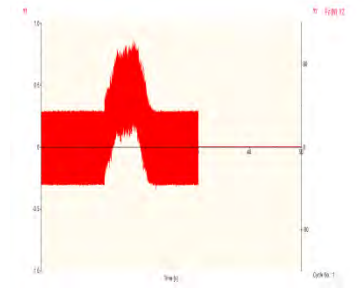
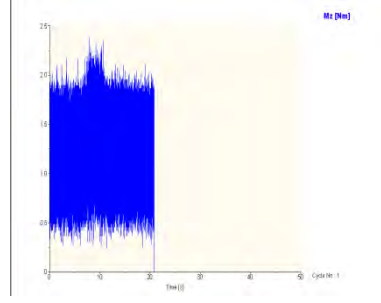
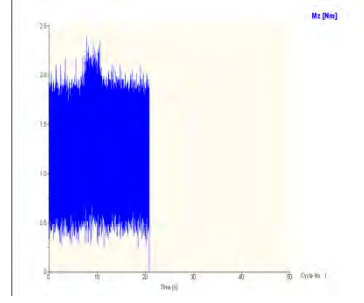
Kombinasi variabel proses 2231



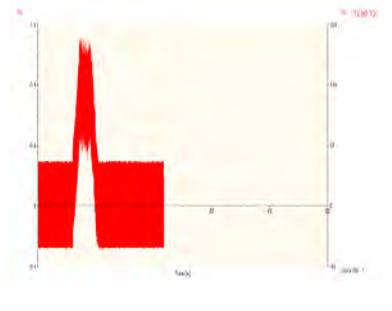
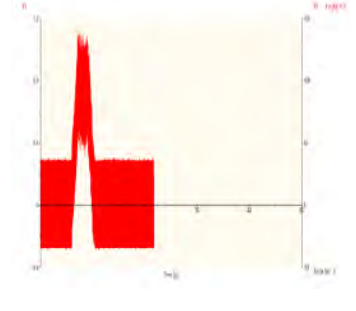
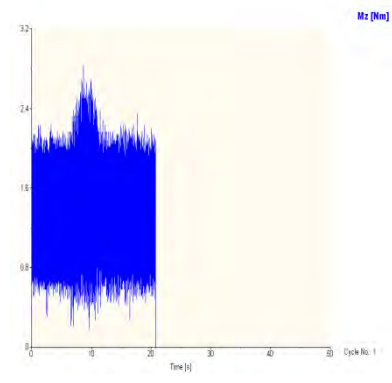
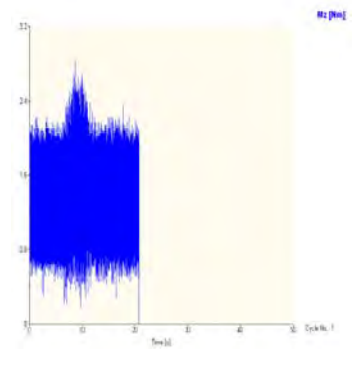
Kombinasi variabel proses 2313

<p>Gaya tekan (F_z) replikasi 1</p>	<p>Gaya tekan (F_z) replikasi 2</p>
<p>Torsi (T) replikasi 1</p>	<p>Torsi (T) replikasi 2</p>

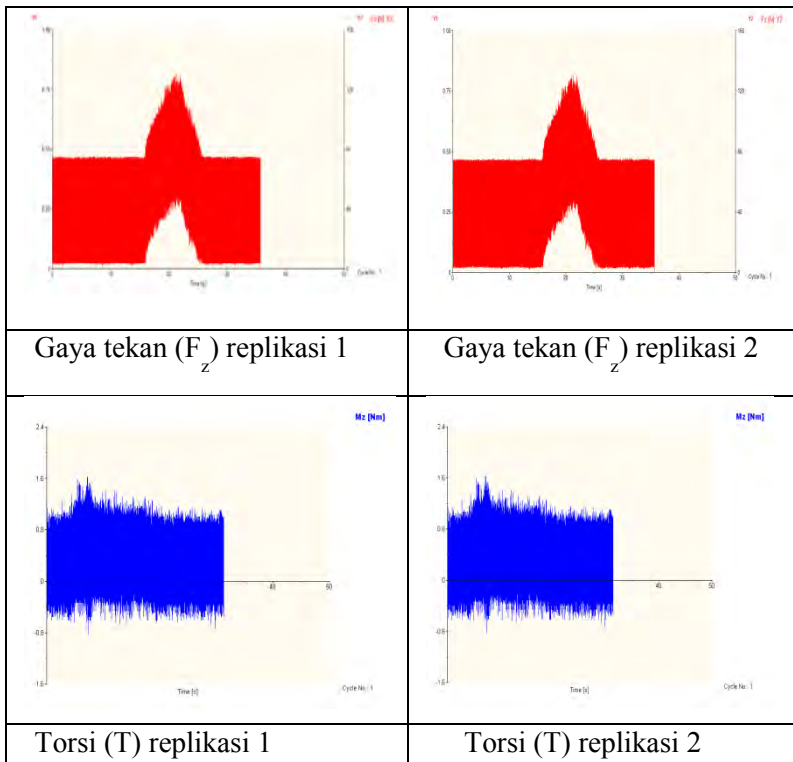
Kombinasi variabel proses 2321

	
<p>Gaya tekan (F_z) replikasi 1</p>	<p>Gaya tekan (F_z) replikasi 2</p>
	
<p>Torsi (T) replikasi 1</p>	<p>Torsi (T) replikasi 2</p>

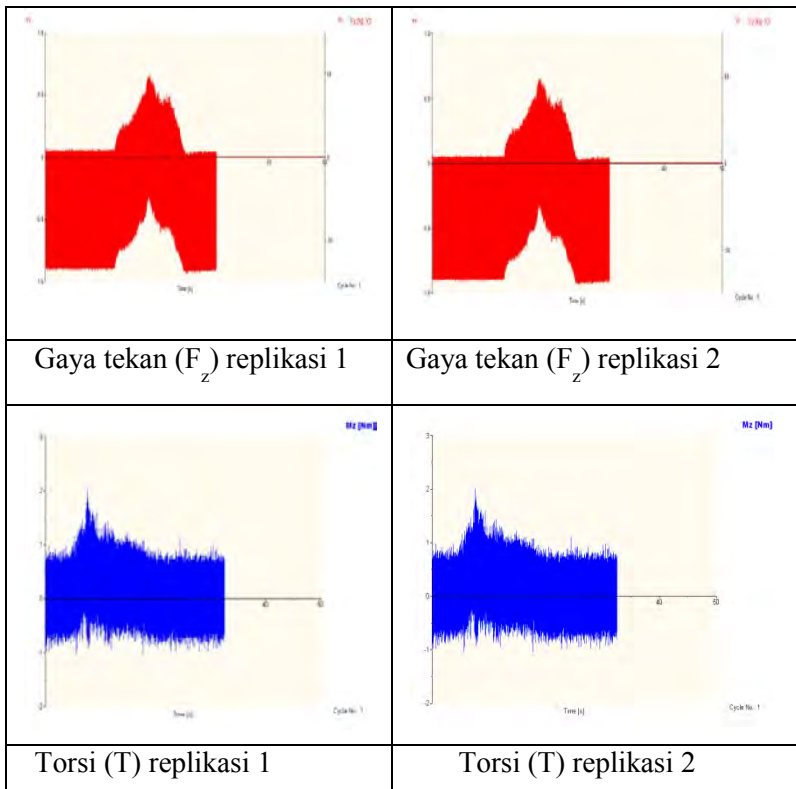
Kombinasi variabel proses 2332

 <p>The graph shows Force (F₂) in Newtons (N) on the y-axis (ranging from -10 to 10) against Time in seconds (s) on the x-axis (ranging from 0 to 50). A red shaded area represents the force profile, which is mostly constant at approximately -5 N, with a sharp positive peak reaching about 10 N between 5 and 15 seconds.</p>	 <p>The graph shows Force (F₂) in Newtons (N) on the y-axis (ranging from -10 to 10) against Time in seconds (s) on the x-axis (ranging from 0 to 50). A red shaded area represents the force profile, which is mostly constant at approximately -5 N, with a sharp positive peak reaching about 10 N between 5 and 15 seconds.</p>
<p>Gaya tekan (F_2) replikasi 1</p>	<p>Gaya tekan (F_2) replikasi 2</p>
 <p>The graph shows Torque (T) in Newton-meters (Nm) on the y-axis (ranging from 0 to 3.2) against Cycle No. on the x-axis (ranging from 0 to 50). A blue shaded area represents the torque profile, showing a noisy signal that fluctuates between approximately 0.8 and 2.8 Nm during the first 20 cycles.</p>	 <p>The graph shows Torque (T) in Newton-meters (Nm) on the y-axis (ranging from 0 to 3.2) against Cycle No. on the x-axis (ranging from 0 to 50). A blue shaded area represents the torque profile, showing a noisy signal that fluctuates between approximately 0.8 and 2.8 Nm during the first 20 cycles.</p>
<p>Torsi (T) replikasi 1</p>	<p>Torsi (T) replikasi 2</p>

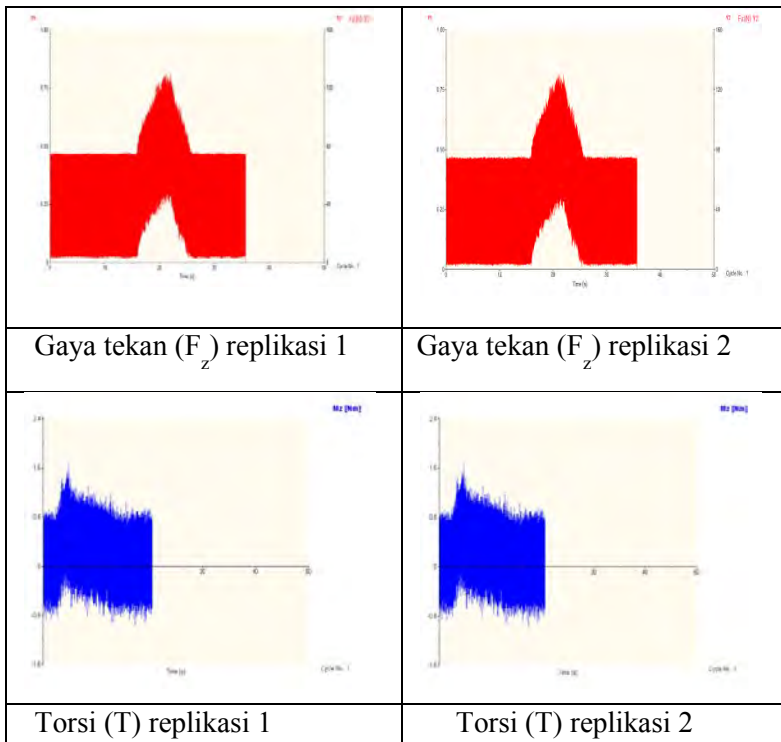
Kombinasi variabel proses 2122 A (optimum)



Kombinasi variabel proses 2122 B (optimum)



Kombinasi variabel proses 2122 C (optimum)



LAMPIRAN 4
HASIL PENGUKURAN KEBULATAN
PADA PELAT ATAS DAN PELAT BAWAH


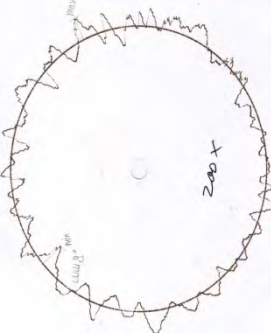
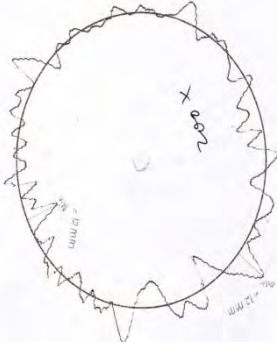
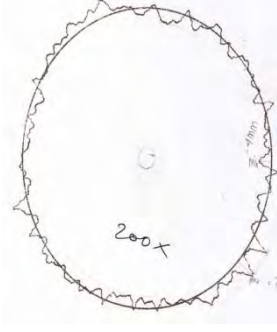
NO	ΔR PELAT ATAS	ΔR PELAT BAWAH	MAG NIFI KASI	KEBUL ATAN PELAT ATAS	KEBULA TAN PELAT BAWAH	KEBULAT AN RATA- RATA
1	17	15	10	170	150	160
2	16	14	10	160	140	150
3	16	14	10	160	140	150
4	32	28	5	160	140	150
5	31	27	5	155	135	145
6	31	27	5	155	135	145
7	29	25	5	145	125	135
8	27	23	5	135	115	125
9	26	22	5	130	110	120
10	25	21	5	125	105	115
11	24	20	5	120	100	110
12	24	20	5	120	100	110
13	24	20	5	120	100	110
14	23	19	5	115	95	105
15	22	18	5	110	90	100
16	22	18	5	110	90	100
17	9	7	10	90	70	80
18	9	7	10	90	70	80

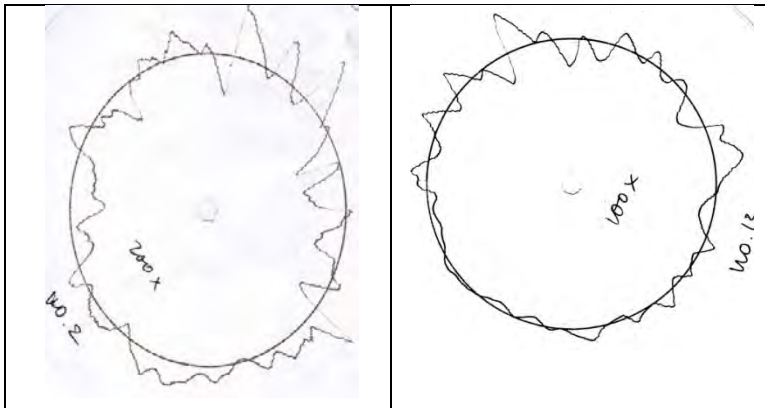
Keterangan:

ΔR : selisih jari-jari terbesar dan terkecil

Magnifikasi : skala perbesaran yang digunakan

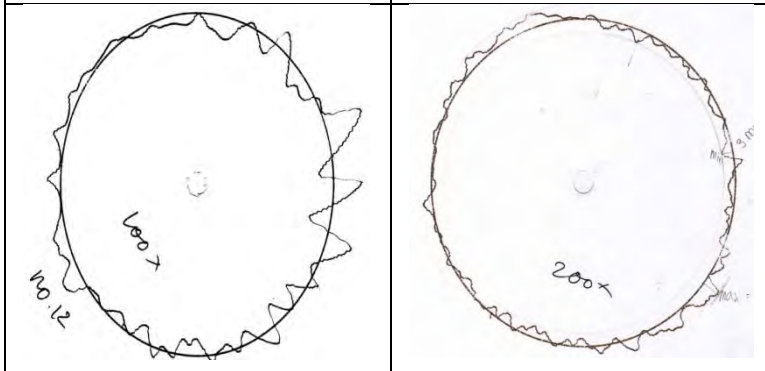
LAMPIRAN 5 GRAFIK PENGUKURAN KEBULATAN

	
<p>Kebulatan lubang 1 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 1 pada pelat bawah</p>
	
<p>Kebulatan lubang 2 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 2 pada pelat bawah</p>



Kebulatan lubang 3 pada pelat atas

Kebulatan lubang 3 pa da pelat bawah

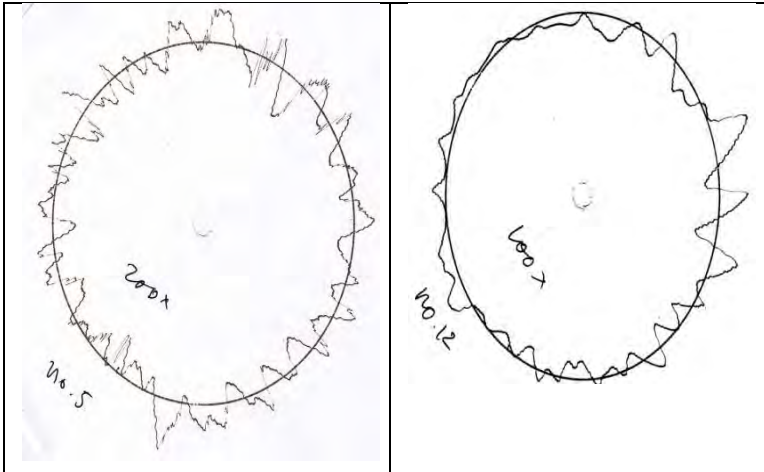


Kebulatan lubang 4 pada pelat atas

Kebulatan lubang 4 pada pelat bawah

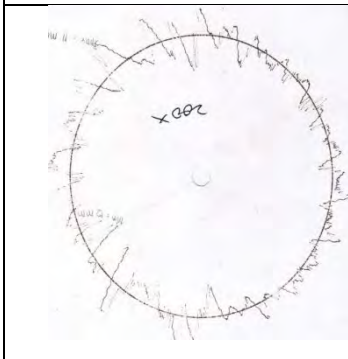
<p>Kebulatan lubang 5 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 5 pada pelat bawah</p>
<p>Kebulatan lubang 6 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 6 pada pelat bawah</p>

pelat

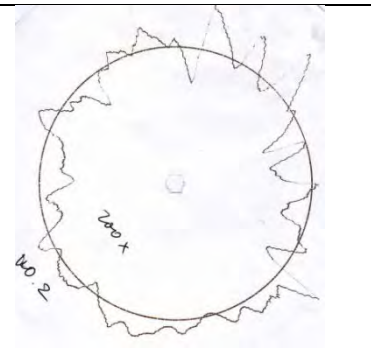


Kebulatan lubang 7 pada pelat atas

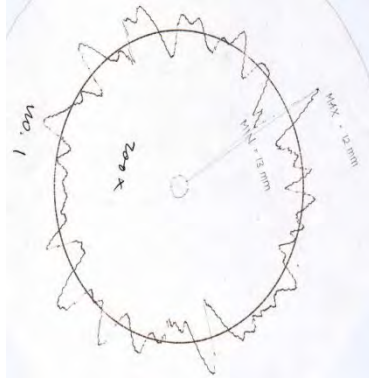
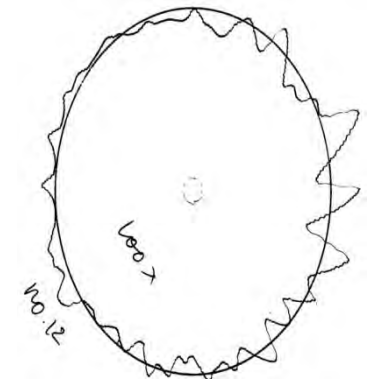
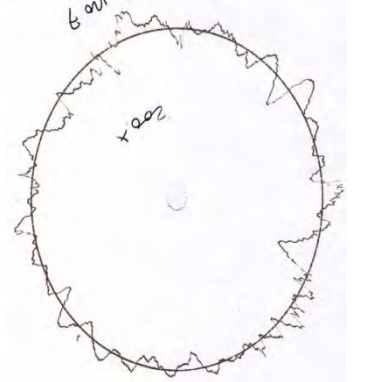
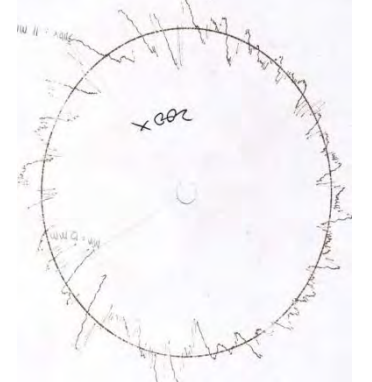
Kebulatan lubang 7 pada pelat bawah

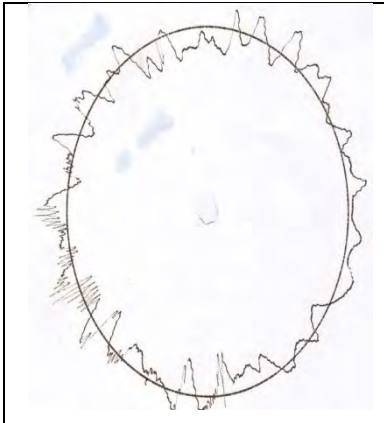


Kebulatan lubang 8 pada pelat atas

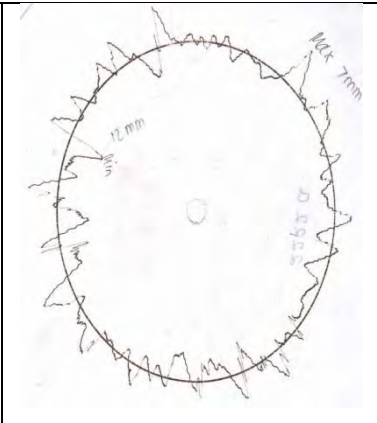


Kebulatan lubang 8 pada pelat bawah

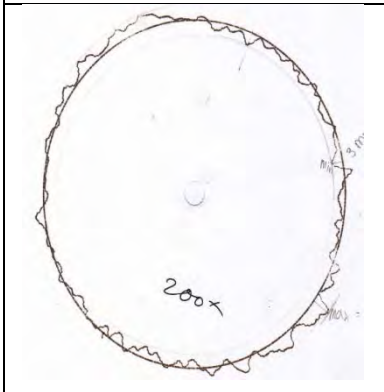
	
<p>Kebulatan lubang 9 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 9 pada pelat bawah</p>
	
<p>Kebulatan lubang 10 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 10 pada pelat bawah</p>



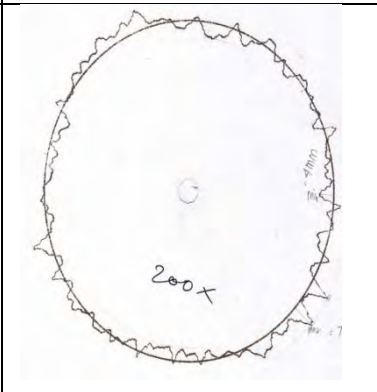
Kebulatan lubang 11 pada pelat atas



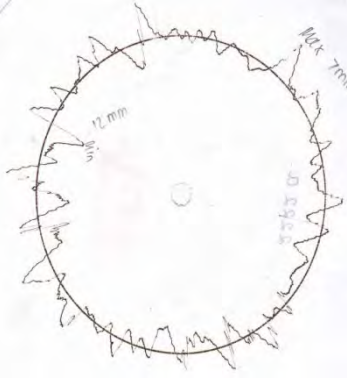
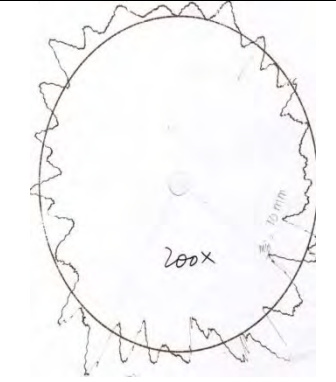
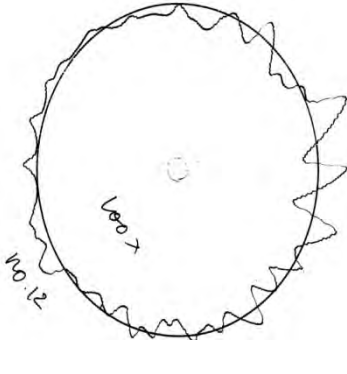
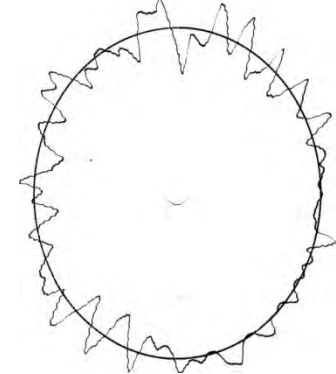
Kebulatan lubang 11 pada pelat bawah

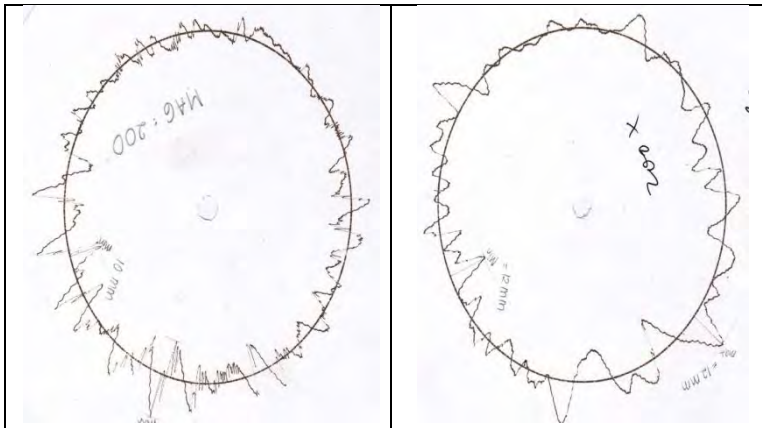


Kebulatan lubang 12 pada pelat atas



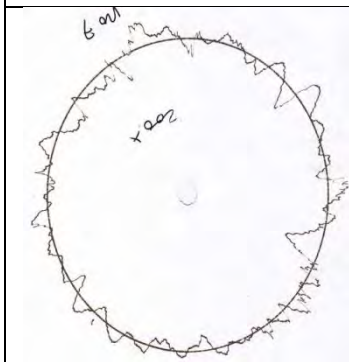
Kebulatan lubang 12 pada pelat bawah

	
<p>Kebulatan lubang 13 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 13 pada pelat bawah</p>
	
<p>Kebulatan lubang 14 pada pelat atas</p>	<p>Kebulatan lubang 14 pada pelat bawah</p>

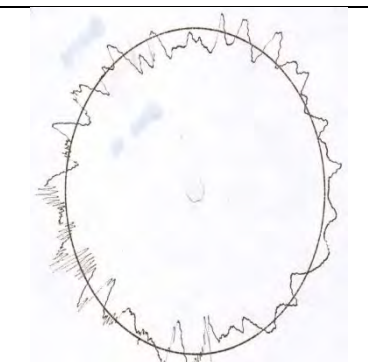


Kebulatan lubang 15 pada pelat atas

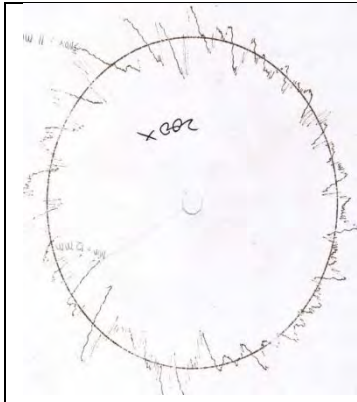
Kebulatan lubang 15 pada pelat bawah



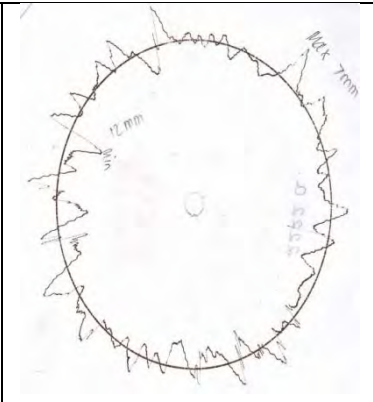
Kebulatan lubang 16 pada pelat atas



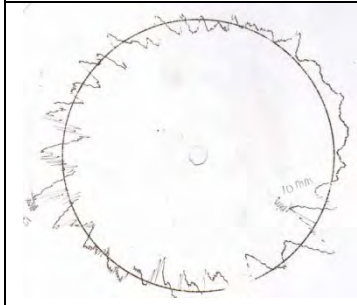
Kebulatan lubang 16 pada pelat bawah



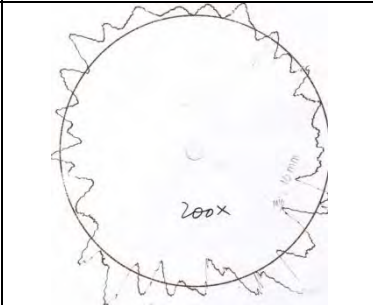
Kebulatan lubang 17 pada pelat atas



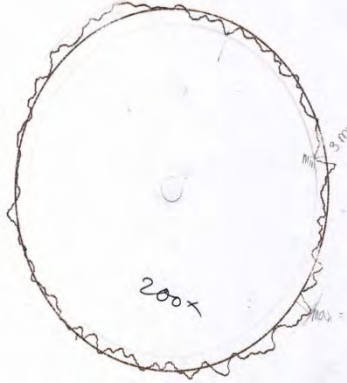

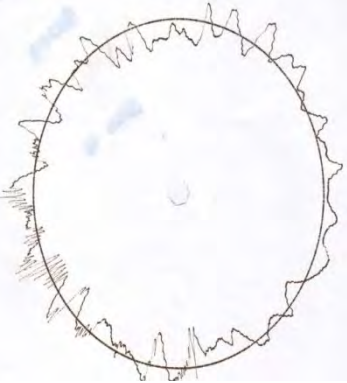
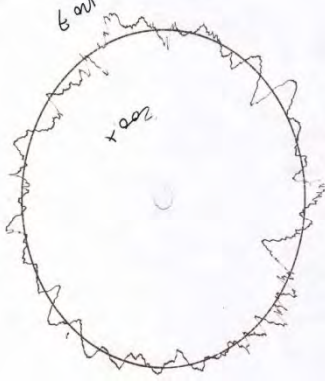
Kebulatan lubang 17 pada pelat bawah

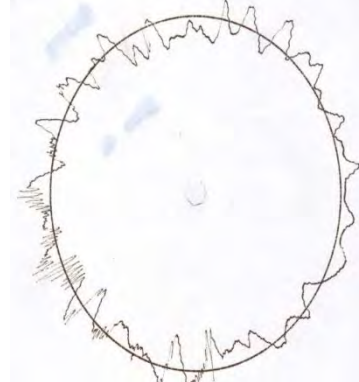
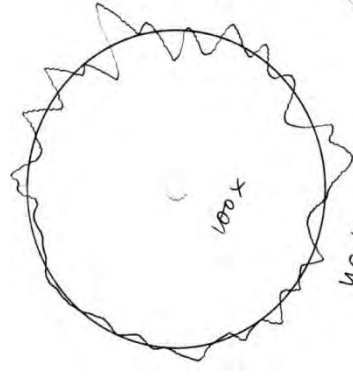


Kebulatan lubang 18 pada pelat atas



Kebulatan lubang 18 pada pelat bawah

	
<p>Kebulatan lubang 1, p ada pelat atas hasil eksperimen konfirmasi</p>	<p>Kebulatan lubang 1, p ada pelat bawah hasil eksperimen konfirmasi</p>
	
<p>Kebulatan lubang 2, p ada pelat atas hasil eksperimen konfirmasi</p>	<p>Kebulatan lubang 2, p ada pelat bawah hasil eksperimen konfirmasi</p>

	
<p>Kebulatan lubang 3, p ada pelat atas hasil eksperimen konfirmasi</p>	<p>Kebulatan lubang 3, p ada pelat bawah hasil eksperimen konfirmasi</p>

LAMPIRAN 6
HASIL PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN
PADA PELAT ATAS DAN PELAT BAWAH

NO	KOMBINASI				KEKASARAN PERMUKAAN				RATA-RATA
					PELAT ATAS		PELAT BAWAH		
					A1	A2	B1	B2	
1	1	1	1	1	1.951	1.638	2.482	1.949	2.005
2	1	1	2	2	0.895	0.916	0.946	1.309	1.017
3	1	1	3	3	0.905	0.801	1.148	0.639	0.873
4	1	2	1	1	1.924	2.549	3.197	2.623	2.573
5	1	2	2	2	1.126	1.37	0.719	0.881	1.024
6	1	2	3	3	0.817	0.847	0.933	0.916	0.878
7	1	3	1	2	1.699	2.429	2.82	3.39	2.585
8	1	3	2	3	0.944	0.745	1.106	1.81	1.151
9	1	3	3	1	0.64	0.475	0.767	1.674	0.889
10	2	1	1	3	1.094	1.063	1.876	0.992	1.256
11	2	1	2	1	0.864	0.939	0.967	1.101	0.968
12	2	1	3	2	0.791	0.662	0.748	0.711	0.728
13	2	2	1	2	1.696	1.038	2.53	2.472	1.934
14	2	2	2	3	0.952	0.769	1.055	1.167	0.986
15	2	2	3	1	0.624	0.624	0.764	1.082	0.774
16	2	3	1	3	0.928	1.483	2.73	2.732	1.968
17	2	3	2	1	1.038	0.998	0.781	1.18	0.999
18	2	3	3	2	0.777	1.088	0.751	0.761	0.844

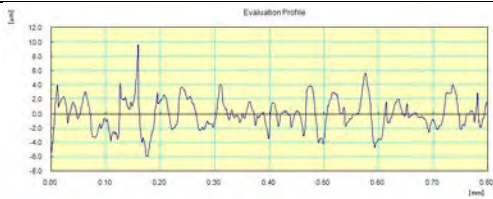
Keterangan:

R1 : replikasi 1

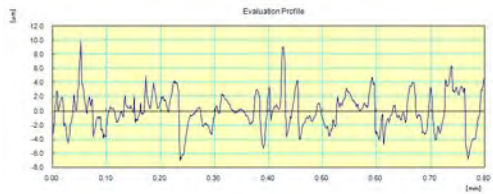
R2 : replikasi 2

LAMPIRAN 7

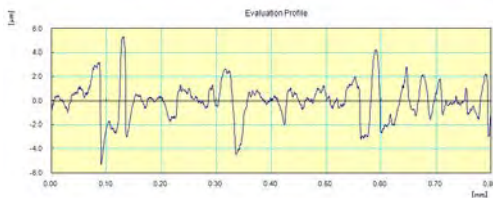
GRAFIK KEKASARAN PERMUKAAN



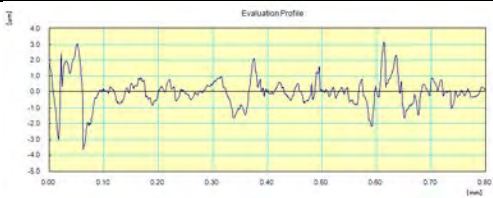
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 titik A1



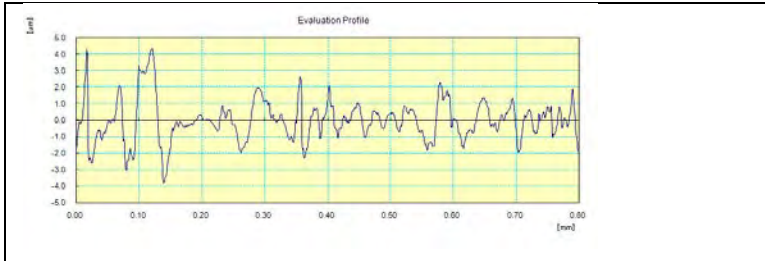
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 titik A2



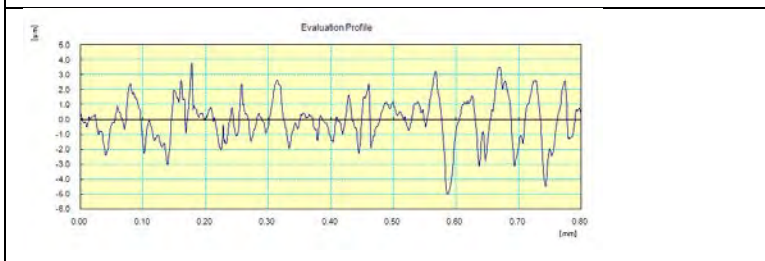
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 titik B1



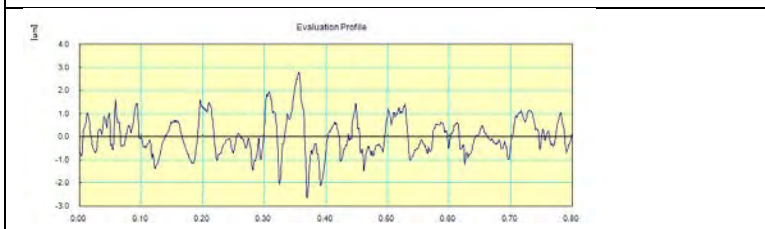
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 titik B2



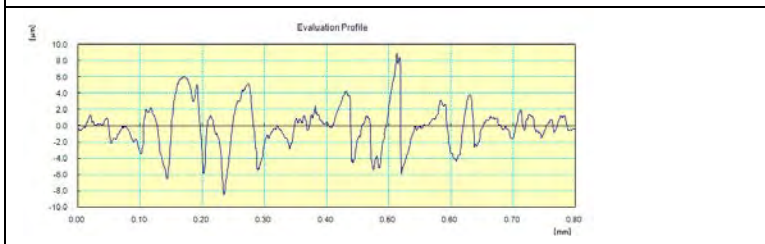
Grafik kekasaran permukaan lubang 2 pada titik A1



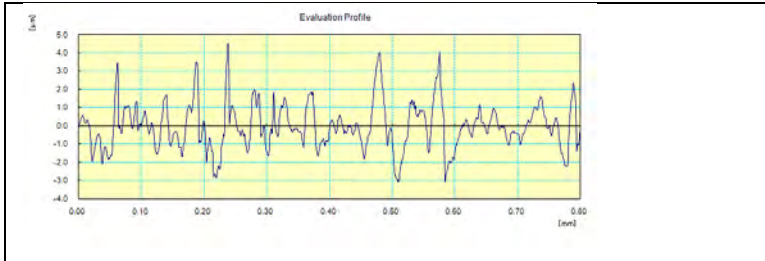
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 titik A2



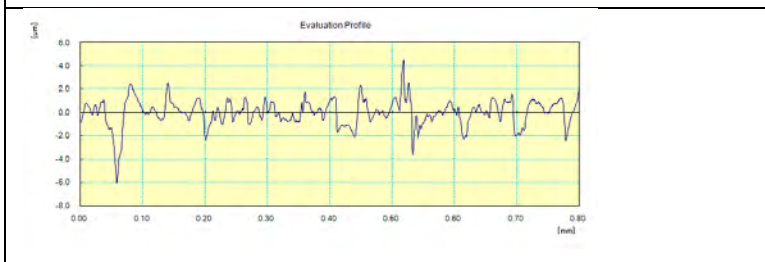
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 titik B1



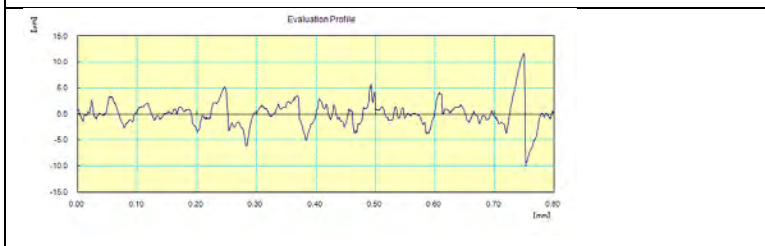
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 titik B2



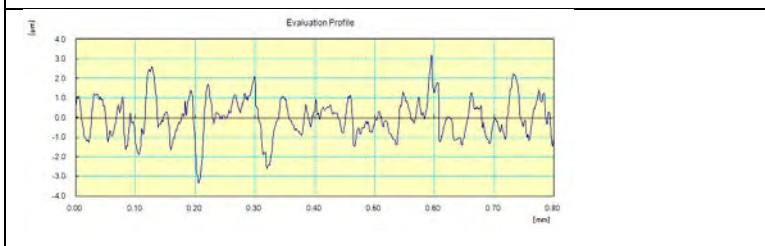
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 titik A1



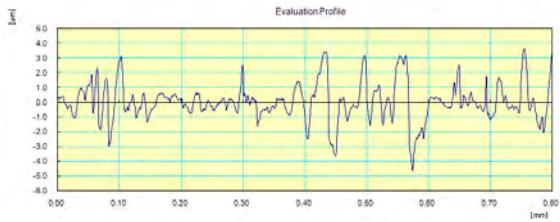
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 titik A2



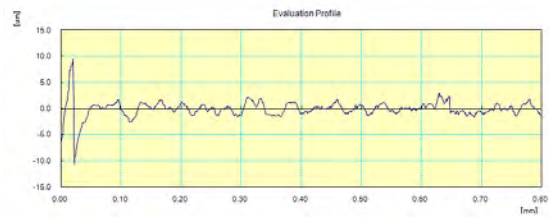
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 titik B1



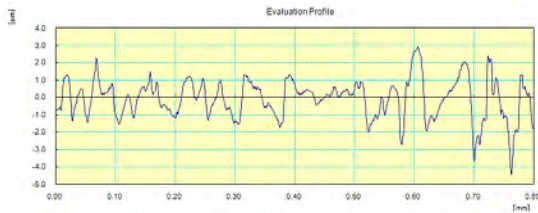
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 titik B2



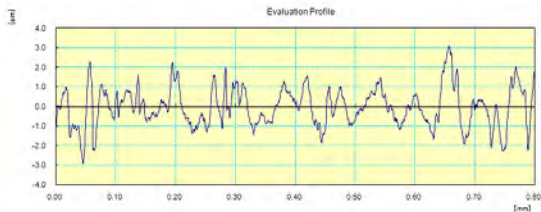
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 4 titik A1



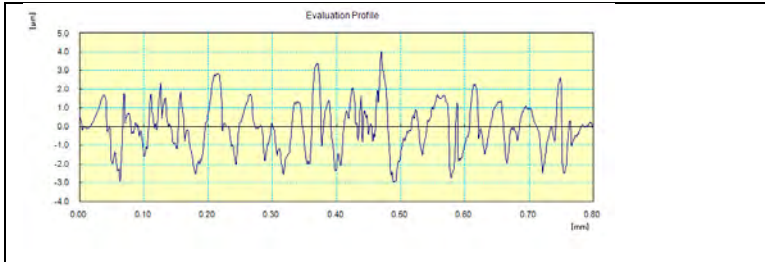
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 4 titik A2



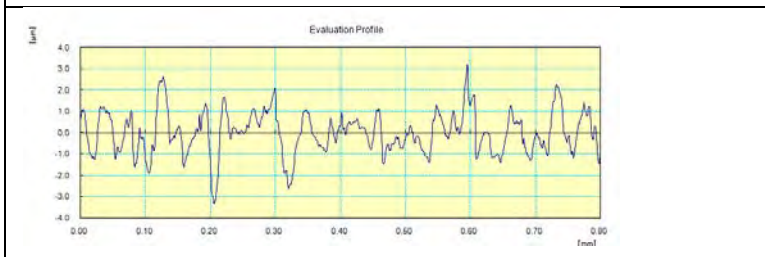
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 4 titik B1



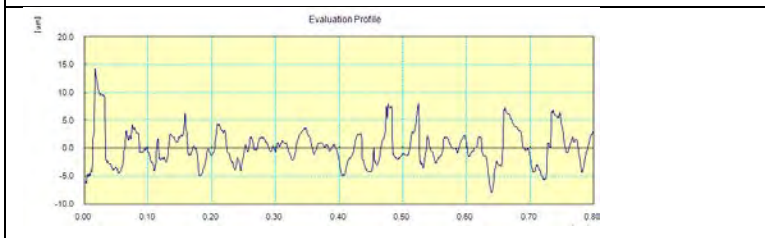
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 4 titik B2



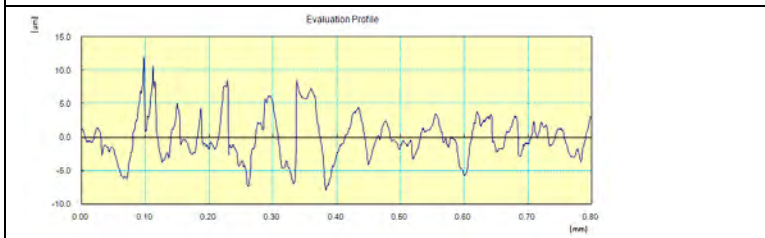
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 5 titik A1



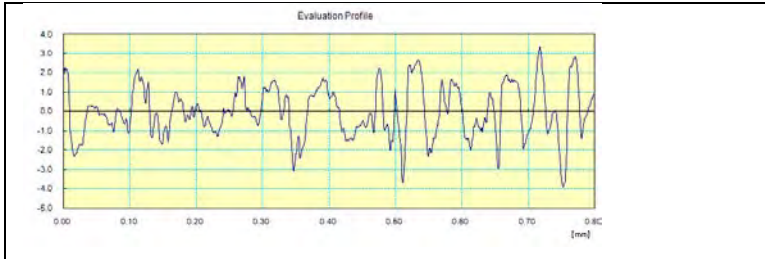
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 5 titik A2



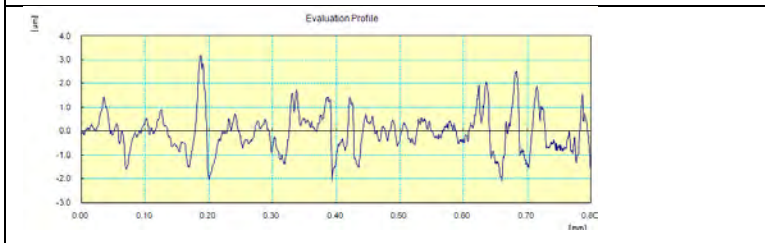
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 5 titik B1



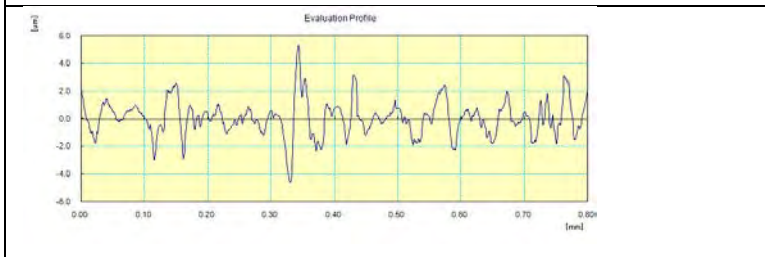
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 5 titik B2



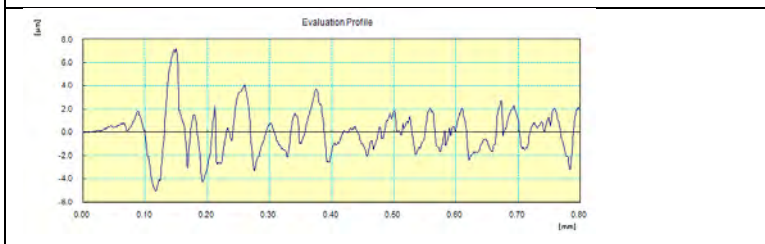
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 6 titik A1



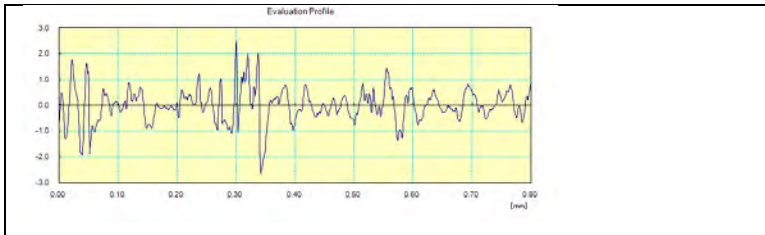
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 6 titik A2



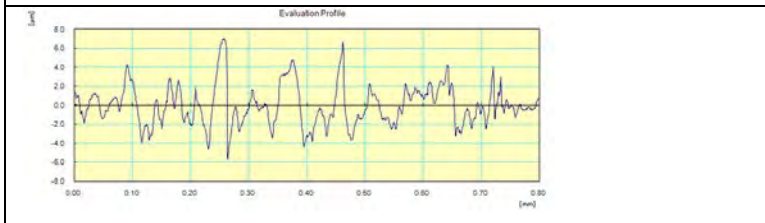
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 6 titik B1



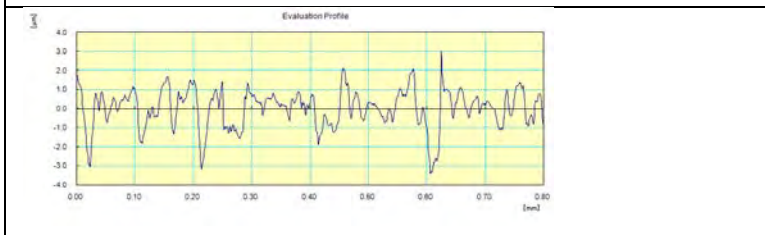
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 6 titik B2



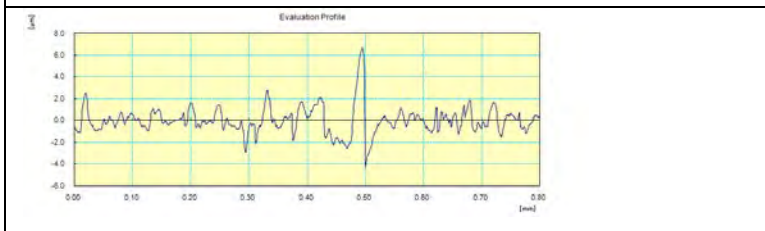
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 7 titik A1



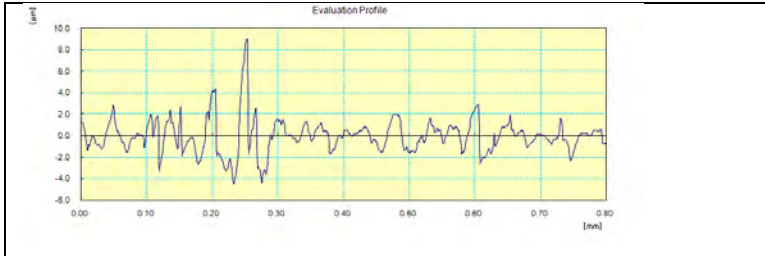
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 7 titik A2



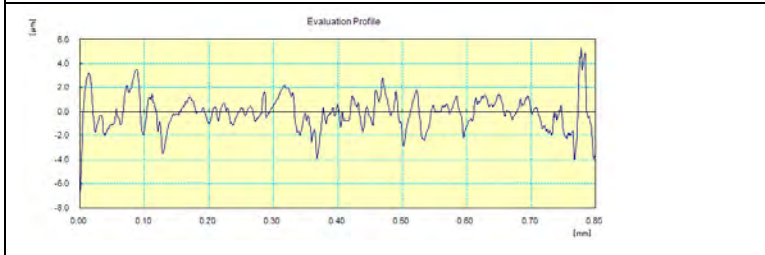
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 7 titik B1



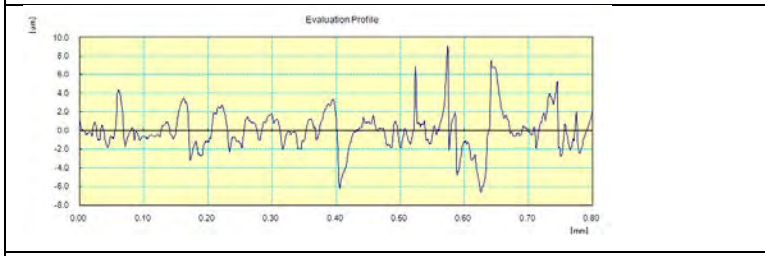
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 7 titik B2



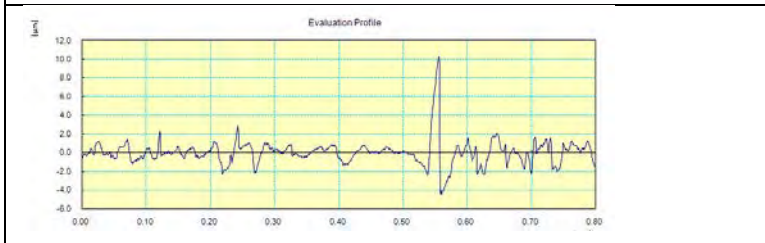
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 8 titik A1



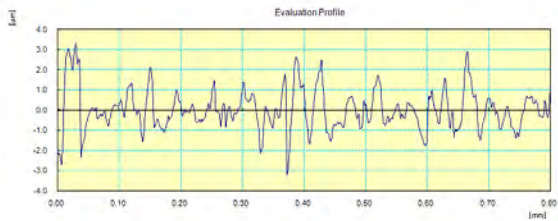
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 8 titik A2



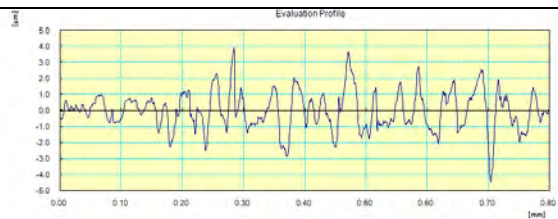
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 8 titik B1



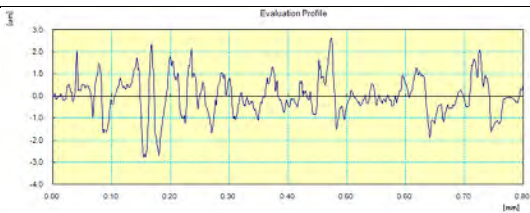
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 8 titik B2



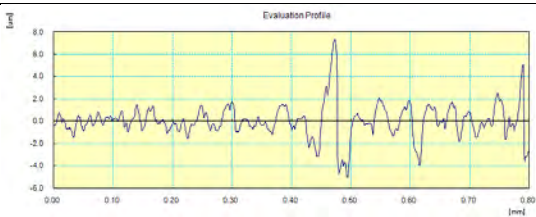
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 9 titik A1



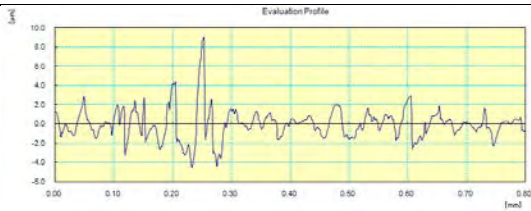
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 9 titik A2



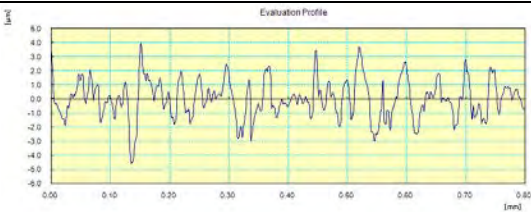
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 9 titik B1



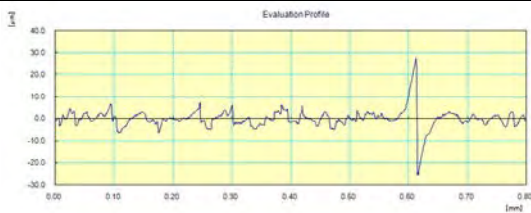
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 9 titik B2



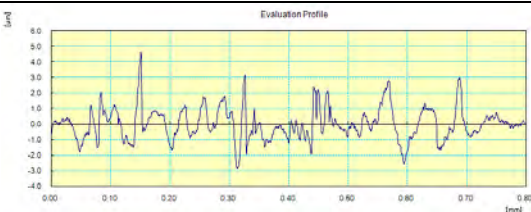
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 10 titik A1



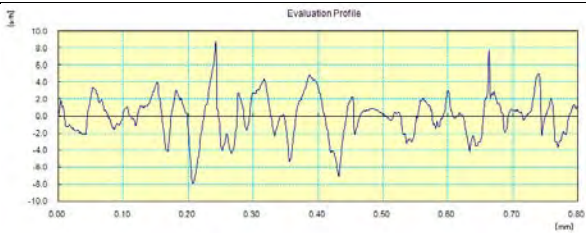
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 10 titik A2



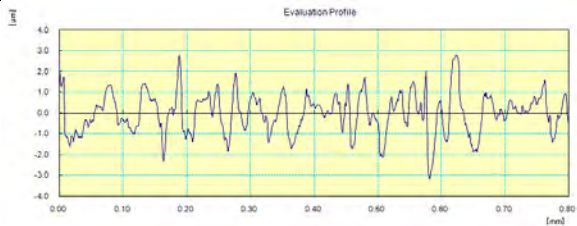
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 10 titik B1



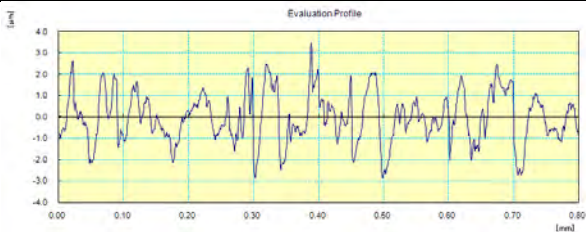
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 10 titik B2



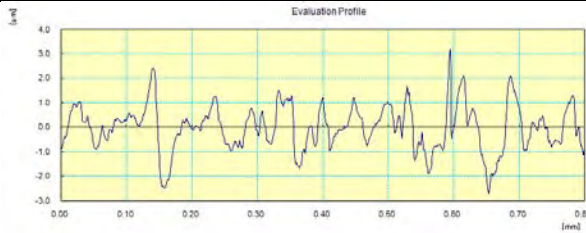
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 11 titik A1



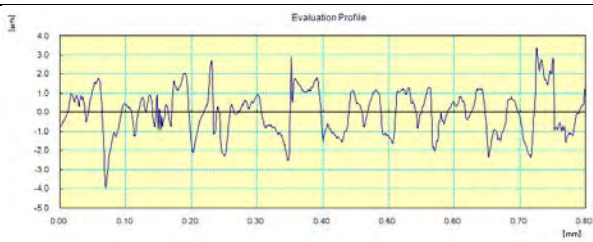
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 11 titik A2



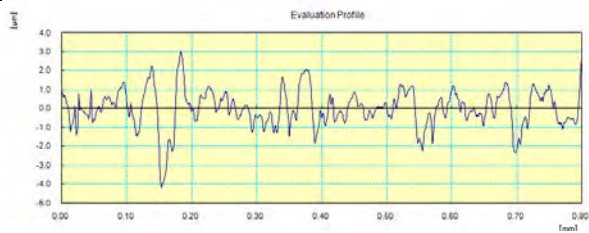
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 11 titik B1



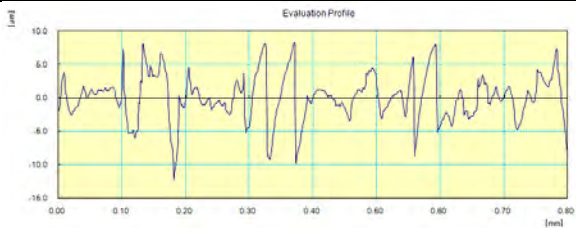
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 11 titik B2



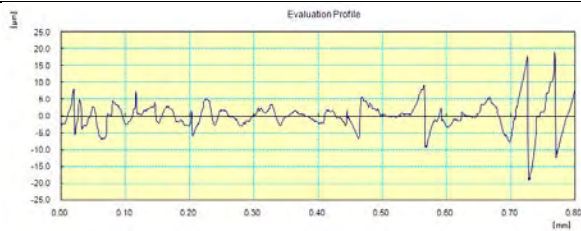
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 12 titik A1



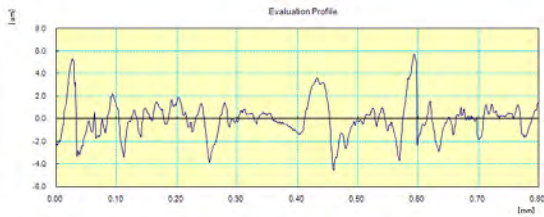
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 12 titik A2



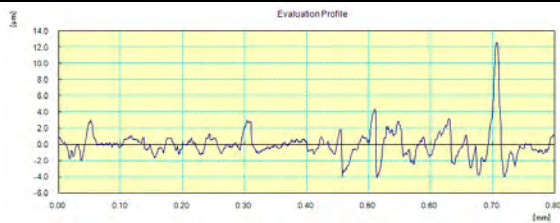
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 12 titik B1



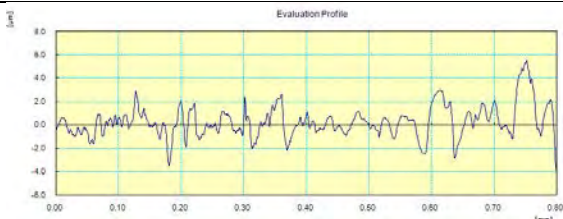
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 12 titik B2



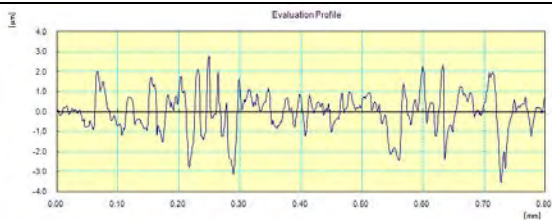
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 13 titik A1



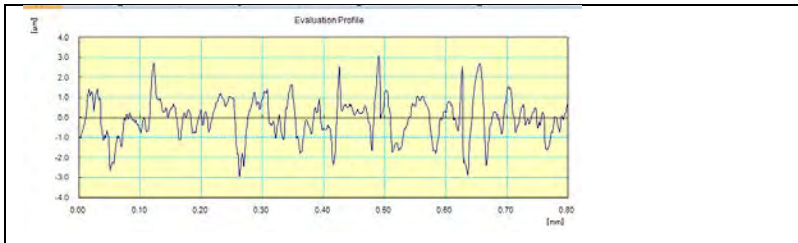
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 13 titik A2



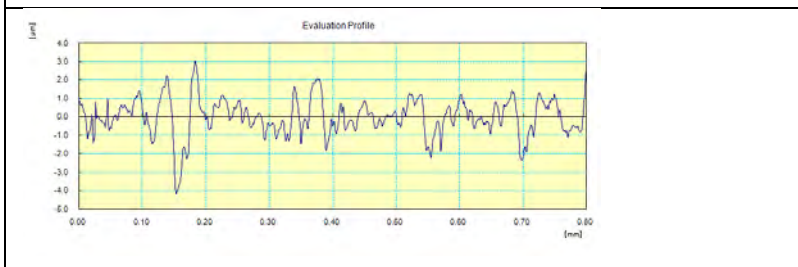
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 13 titik B1



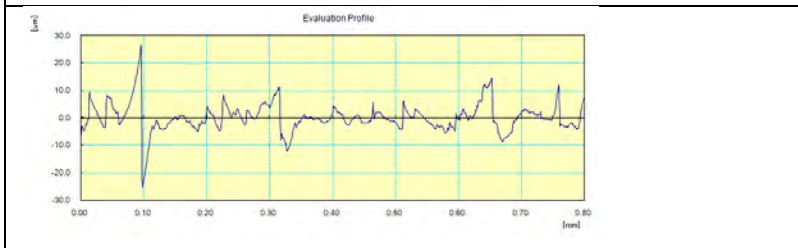
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 13 titik B2



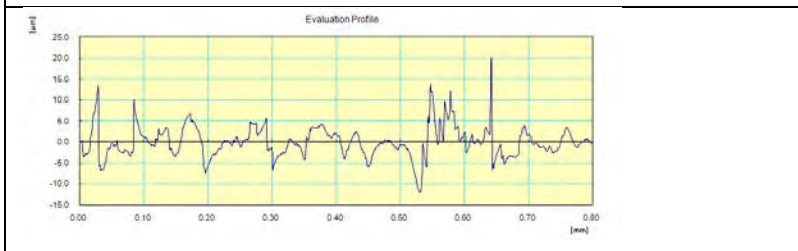
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 14 titik A1



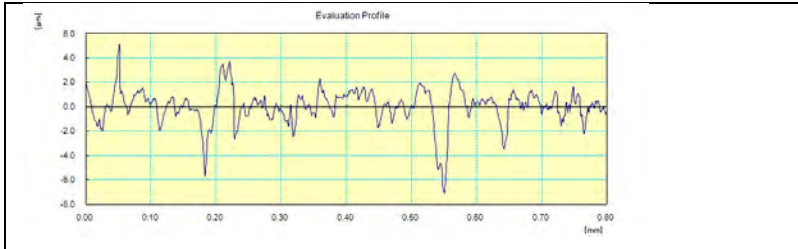
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 14 titik A2



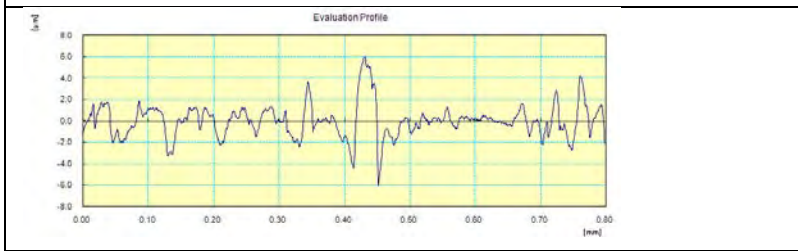
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 14 titik B1



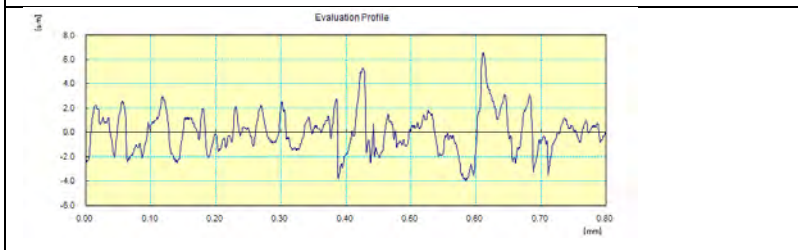
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 14 titik B2



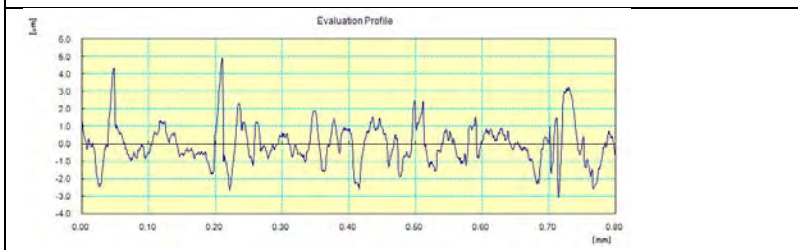
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 15 titik A1



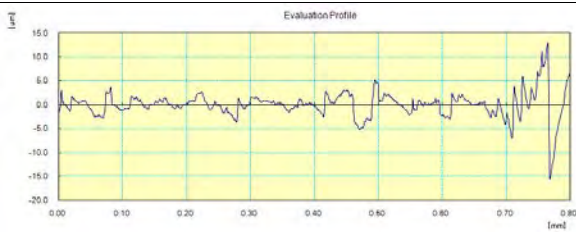
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 15 titik A2



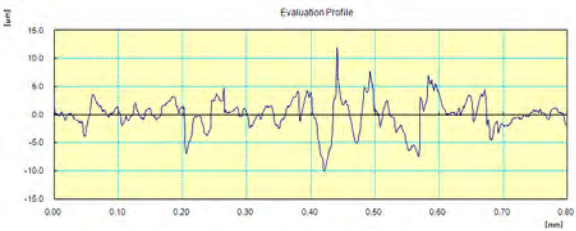
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 15 titik B1



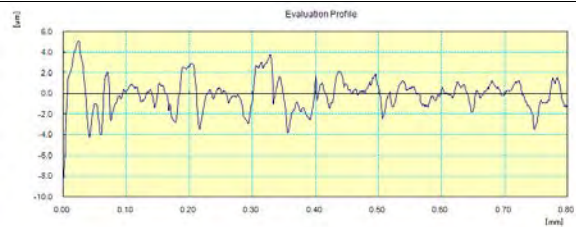
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 15 titik B2



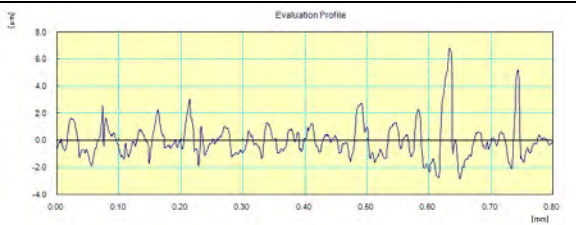
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 16 titik A1



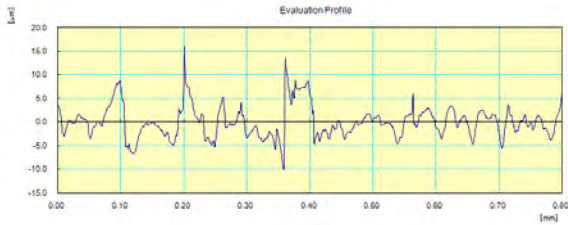
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 16 titik A2



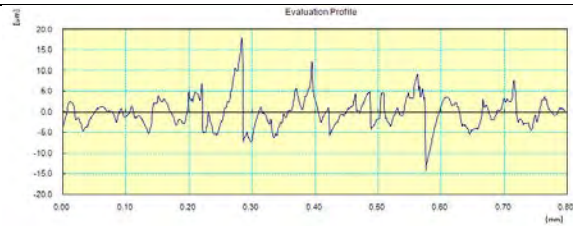
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 16 titik B1



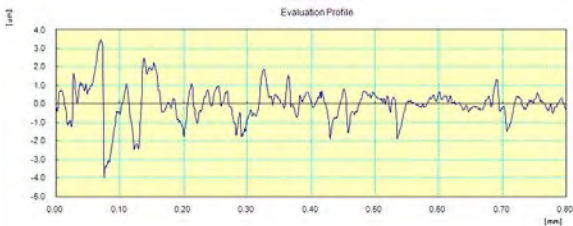
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 16 titik B2



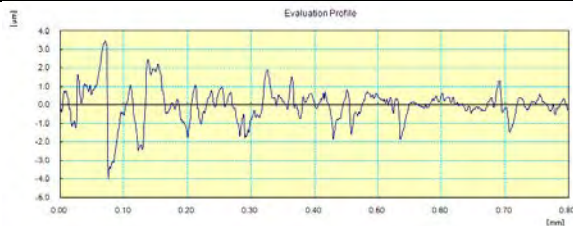
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 17 titik A1



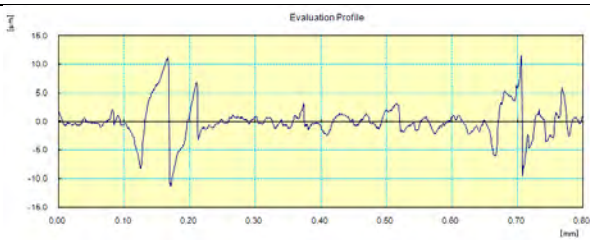
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 17 titik A2



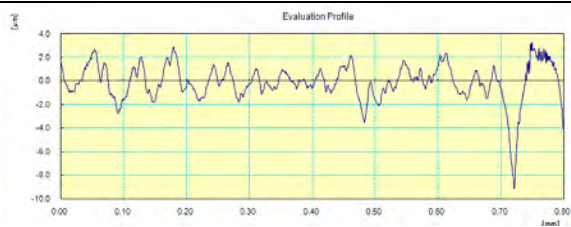
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 17 titik B1



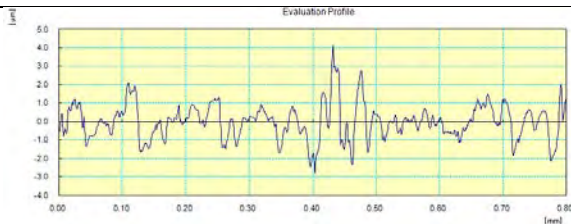
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 17 titik B2



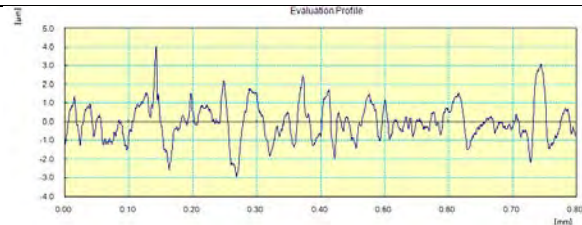
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 18 titik A1



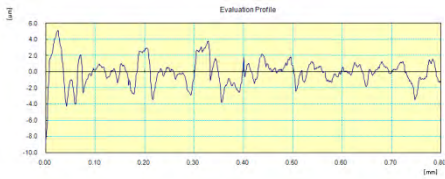
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 18 titik A2



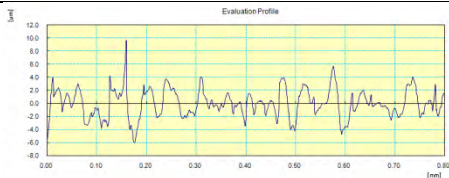
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 18 titik B1



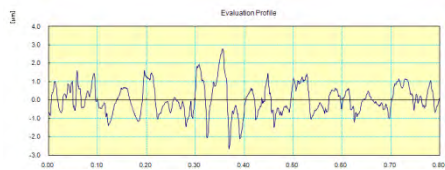
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 18 titik B2



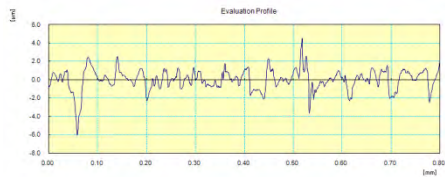
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 ha sil eksperimen konfirmasi titik A1



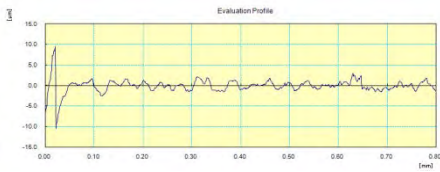
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 hasil eksperimen konfirmasi titik A2



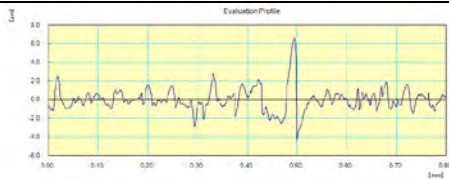
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 hasil eksperimen konfirmasi titik B1



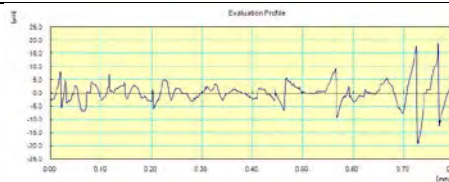
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 1 hasil eksperimen konfirmasi titik B2



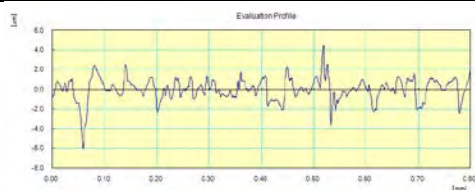
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 hasil eksperimen konfirmasi titik A1



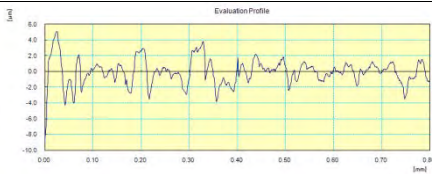
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 hasil eksperimen konfirmasi titik A2



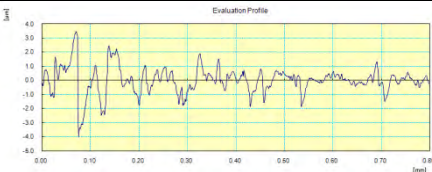
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 hasil eksperimen konfirmasi titik B1



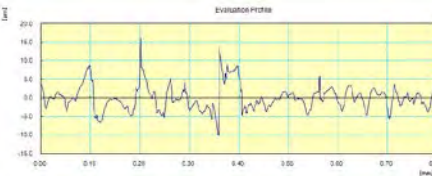
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 2 hasil eksperimen konfirmasi titik B2



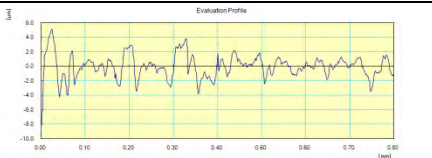
Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 hasil eksperimen konfirmasi titik A1



Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 hasil eksperimen konfirmasi titik A2



Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 hasil eksperimen konfirmasi titik B1



Grafik kekasaran permukaan pada lubang 3 hasil eksperimen konfirmasi titik B2

LAMPIRAN 8 HASIL UJI STATISTIK

A.) UJI KENORMALAN

<p style="text-align: center;">Probability Plot of FZK Normal</p> <table border="1" style="float: right;"> <tr><td>Mean</td><td>25.1</td></tr> <tr><td>SDev</td><td>1.651</td></tr> <tr><td>N</td><td>3</td></tr> <tr><td>KS</td><td>0.268</td></tr> <tr><td>P-Value</td><td>>0.150</td></tr> </table>	Mean	25.1	SDev	1.651	N	3	KS	0.268	P-Value	>0.150	<p style="text-align: center;">Probability Plot of TK Normal</p> <table border="1" style="float: right;"> <tr><td>Mean</td><td>0.4407</td></tr> <tr><td>SDev</td><td>0.01528</td></tr> <tr><td>N</td><td>3</td></tr> <tr><td>KS</td><td>0.223</td></tr> <tr><td>P-Value</td><td>>0.150</td></tr> </table>	Mean	0.4407	SDev	0.01528	N	3	KS	0.223	P-Value	>0.150
Mean	25.1																				
SDev	1.651																				
N	3																				
KS	0.268																				
P-Value	>0.150																				
Mean	0.4407																				
SDev	0.01528																				
N	3																				
KS	0.223																				
P-Value	>0.150																				
<p>Hasil Uji kenormalan pada variabel proses gaya tekan eksperimen konfirmasi</p>	<p>Hasil Uji kenormalan pada variabel proses torsi eksperimen konfirmasi</p>																				
<p style="text-align: center;">Probability Plot of RK Normal</p> <table border="1" style="float: right;"> <tr><td>Mean</td><td>110</td></tr> <tr><td>SDev</td><td>5</td></tr> <tr><td>N</td><td>3</td></tr> <tr><td>KS</td><td>0.175</td></tr> <tr><td>P-Value</td><td>>0.150</td></tr> </table>	Mean	110	SDev	5	N	3	KS	0.175	P-Value	>0.150	<p style="text-align: center;">Probability Plot of SRK Normal</p> <table border="1" style="float: right;"> <tr><td>Mean</td><td>0.975</td></tr> <tr><td>SDev</td><td>0.004059</td></tr> <tr><td>N</td><td>3</td></tr> <tr><td>KS</td><td>0.343</td></tr> <tr><td>P-Value</td><td>>0.150</td></tr> </table>	Mean	0.975	SDev	0.004059	N	3	KS	0.343	P-Value	>0.150
Mean	110																				
SDev	5																				
N	3																				
KS	0.175																				
P-Value	>0.150																				
Mean	0.975																				
SDev	0.004059																				
N	3																				
KS	0.343																				
P-Value	>0.150																				
<p>Hasil Uji kenormalan pada variabel proses kebulatan eksperimen konfirmasi</p>	<p>Hasil Uji kenormalan pada variabel proses kekasaran permukaan eksperimen konfirmasi</p>																				

B.) UJI KESAMAAN VARIANSI

Test and CI for Two Variances: FZA, FZK

Method

Null hypothesis Variance(FZA) / Variance(FZK) = 1
Alternative hypothesis Variance(FZA) / Variance(FZK) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
FZA	3	0.693	0.481
FZK	3	1.057	1.118

Ratio of standard deviations = 0.656
Ratio of variances = 0.430

95% Confidence Intervals

Distribution	CI for StDev	CI for Variance
of Data	Ratio	Ratio
Normal	(0.105, 4.096)	(0.011, 16.774)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	0.43	0.602
Levene's Test (any continuous)	1	4	0.24	0.652

Test and CI for Two Variances: TA, TK

Method

Null hypothesis Variance(TA) / Variance(TK) = 1
Alternative hypothesis Variance(TA) / Variance(TK) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
TA	3	0.053	0.003
TK	3	0.015	0.000

Ratio of standard deviations = 3.464
Ratio of variances = 12.000

95% Confidence Intervals

Distribution	CI for StDev	CI for Variance
of Data	Ratio	Ratio
Normal	(0.555, 21.633)	(0.308, 468.000)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests				Test
Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	12.00	0.154
Levene's Test (any continuous)	1	4	0.89	0.399

Test and CI for Two Variances: RA, RK

Method
Null hypothesis Variance(RA) / Variance(RK) = 1
Alternative hypothesis Variance(RA) / Variance(RK) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics
Variable N StDev Variance
RA 3 5.000 25.000
RK 3 5.000 25.000
Ratio of standard deviations = 1.000
Ratio of variances = 1.000

95% Confidence Intervals

Distribution	CI for StDev	CI for Variance
of Data	Ratio	Ratio
Normal	(0.160, 6.245)	(0.026, 39.000)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests				Test
Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	2	2	1.00	1.000
Levene's Test (any continuous)	1	4	0.00	1.000

Test and CI for Two Variances: SRA, SRK

Method
Null hypothesis Variance(SRA) / Variance(SRK) = 1
Alternative hypothesis Variance(SRA) / Variance(SRK) not = 1
Significance level Alpha = 0.05

Statistics
Variable N StDev Variance
SRA 3 0.009 0.000
SRK 3 0.004 0.000
Ratio of standard deviations = 2.103
Ratio of variances = 4.421

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0.337, 13.131)	(0.113, 172.421)
Continuous	(*, *)	(*, *)

Tests Method	DF1	DF2	Statistic	Test P-Value
F Test (normal)	2	2	4.42	0.369
Levene's Test (any continuous)	1	4	0.66	0.461

C.) UJI KESAMAAN RATA-RATA Two-Sample T-Test and CI: FZA, FZK

Two-sample T for FZA vs FZK

	N	Mean	StDev	SE Mean
FZA	3	55.500	0.693	0.40
FZK	3	25.50	1.06	0.61

Difference = mu (FZA) - mu (FZK)
Estimate for difference: 30.000
95% CI for difference: (27.677, 32.323)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 41.09 P-Value = 0.000 DF = 3

Two-Sample T-Test and CI: TA, TK

Two-sample T for TA vs TK

	N	Mean	StDev	SE Mean
TA	3	1.1100	0.0529	0.031
TK	3	0.4467	0.0153	0.0088

Difference = mu (TA) - mu (TK)
Estimate for difference: 0.6633
95% CI for difference: (0.5265, 0.8001)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 20.86 P-Value = 0.002 DF = 2

Two-Sample T-Test and CI: RA, RK

Two-sample T for RA vs RK

	N	Mean	StDev	SE Mean
RA	3	115.00	5.00	2.9
RK	3	110.00	5.00	2.9

Difference = μ (RA) - μ (RK)
 Estimate for difference: 5.00
 95% CI for difference: (-6.33, 16.33)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.22 P-Value = 0.288 DF = 4

Two-Sample T-Test and CI: SRA, SRK

Two-sample T for SRA vs SRK

	N	Mean	StDev	SE Mean
SRA	3	0.98000	0.00917	0.0053
SRK	3	0.97500	0.00436	0.0025

Difference = μ (SRA) - μ (SRK)
 Estimate for difference: 0.00500
 95% CI for difference: (-0.02021, 0.03021)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0.85 P-Value = 0.483 DF = 2

LAMPIRAN 9
HASIL PENGUKURAN RESPON PADA
EKSPERIMEN KONFIRMASI DAN EKSPERIMEN
LEVEL TENGAH

Hasil Eksperimen Konfirmasi pada Masing-masing Respon

No	Kombinasi Variabel proses				F _z (N)	M _t (Nm)	Kebulatan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)
	TM	PA	N	VF				
1	2	1	2	2	25.75	0.43	115	0.973
2	2	1	2	2	26.41	0.46	105	0.972
3	2	1	2	2	24.34	0.45	110	0.98
Rata-rata					25.5	0.45	110	0.975

Hasil Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal

No	Kombinasi Variabel proses				F _z (N)	M _t (Nm)	Kebulatan (μm)	Kekasaran permukaan (μm)
	TM	PA	N	VF				
1	2	2	2	2	55.42	1.15	115	0.982
2	2	2	2	2	54.85	1.13	110	0.97
3	2	2	2	2	56.23	1.05	120	0.988
Rata-rata					55.5	1.11	115	0.98

LAMPIRAN 10 KATALOG PAHAT

a. Pahat HSS

Program, Programm, Programme, Programa

List 520

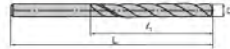
STRAIGHT SHANK DRILLS



DIN 338

HSS

- UK** For ordinary hardness materials up to approx. 1000 N/mm².
- D** Für Werkstoffe normaler Festigkeit bis ca. 1000 N/mm².
- F** Pour matière jusqu'à 1000 N/mm².
- E** Para materiales de resistencia normal de hasta aprox. 1.000 N/mm².



unit: mm

D	ℓ ₁	L	STOCK
0.20	2.5	19	•
0.25	3	19	•
0.30	3	19	•
0.36	4	19	•
0.40	5	20	•
0.45	5	20	•
0.50	6	22	•
0.55	7	24	•
0.60	7	24	•
0.65	8	26	•
0.70	9	28	•
0.75	9	28	•
0.80	10	30	•
0.85	10	30	•
0.90	11	32	•
0.95	11	32	•
1.00	12	34	•
1.05	12	34	•
1.10	14	36	•
1.15	14	36	•
1.20	16	38	•
1.25	16	38	•
1.30	16	38	•
1.35	18	40	•
1.40	18	40	•
1.45	18	40	•
1.50	18	40	•
1.55	20	43	•
1.60	20	43	•
1.65	20	43	•
1.70	20	43	•
1.75	22	46	•
1.80	22	46	•
1.85	22	46	•
1.90	22	46	•
1.95	24	49	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
2.00	24	49	•
2.05	24	49	•
2.10	24	49	•
2.15	27	53	•
2.20	27	53	•
2.25	27	53	•
2.30	27	53	•
2.35	27	53	•
2.40	30	57	•
2.45	30	57	•
2.50	30	57	•
2.55	30	57	•
2.60	30	57	•
2.65	30	57	•
2.70	33	61	•
2.75	33	61	•
2.80	33	61	•
2.85	33	61	•
2.90	33	61	•
2.95	33	61	•
3.00	33	61	•
3.05	36	65	•
3.10	36	65	•
3.15	36	65	•
3.20	36	65	•
3.25	36	65	•
3.30	36	65	•
3.35	36	65	•
3.40	39	70	•
3.45	39	70	•
3.50	39	70	•
3.55	39	70	•
3.60	39	70	•
3.65	39	70	•
3.70	39	70	•
3.75	39	70	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
3.80	43	75	•
3.85	43	75	•
3.90	43	75	•
3.95	43	75	•
4.00	43	75	•
4.05	43	75	•
4.10	43	75	•
4.15	43	75	•
4.20	43	75	•
4.25	43	75	•
4.30	47	80	•
4.35	47	80	•
4.40	47	80	•
4.45	47	80	•
4.50	47	80	•
4.55	47	80	•
4.60	47	80	•
4.65	47	80	•
4.70	47	80	•
4.75	47	80	•
4.80	52	86	•
4.85	52	86	•
4.90	52	86	•
4.95	52	86	•
5.00	52	86	•
5.05	52	86	•
5.10	52	86	•
5.15	52	86	•
5.20	52	86	•
5.25	52	86	•
5.30	52	86	•
5.35	57	93	•
5.40	57	93	•
5.45	57	93	•
5.50	57	93	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
5.55	57	93	•
5.60	57	93	•
5.65	57	93	•
5.70	57	93	•
5.75	57	93	•
5.80	57	93	•
5.85	57	93	•
5.90	57	93	•
5.95	57	93	•
6.00	57	93	•
6.05	63	101	•
6.10	63	101	•
6.20	63	101	•
6.25	63	101	•
6.30	63	101	•
6.35	63	101	•
6.40	63	101	•
6.45	63	101	•
6.50	63	101	•
6.55	63	101	•
6.60	63	101	•
6.70	63	101	•
6.75	69	109	•
6.80	69	109	•
6.85	69	109	•
6.90	69	109	•
6.95	69	109	•
7.00	69	109	•
7.10	69	109	•
7.20	69	109	•
7.25	69	109	•
7.30	69	109	•
7.40	69	109	•
7.50	69	109	•
7.60	75	117	•
7.70	75	117	•
7.75	75	117	•
7.80	75	117	•
7.90	75	117	•

• marked items are NACHI EUROPE stock products,
for all other sizes please contact us.

• Markierte Artikel sind NACHI EUROPE Standardprodukte,
für alle übrigen Produkte: Lieferzeit auf Anfrage.

NACHI

List 520 STRAIGHT SHANK DRILLS

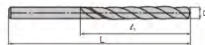
DIN 338

HSS



D_{h8}13,1

- UK** For ordinary hardness materials up to approx. 1000 N/mm².
- D** Für Werkstoffe normaler Festigkeit bis ca. 1000 N/mm².
- F** Pour matière jusqu'à 1000 N/mm².
- E** Para materiales de resistencia normal de hasta aprox. 1.000 N/mm².



unit: mm

D	f ₁	L	STOCK
8,00	75	117	•
8,10	75	117	•
8,20	75	117	•
8,25	75	117	•
8,30	75	117	•
8,40	75	117	•
8,50	75	117	•
8,60	81	125	•
8,70	81	125	•
8,75	81	125	•
8,80	81	125	•
8,90	81	125	•
9,00	81	125	•
9,10	81	125	•
9,20	81	125	•
9,25	81	125	•
9,30	81	125	•
9,40	81	125	•
9,50	81	125	•
9,50	87	133	•
9,70	87	133	•
9,75	87	133	•
9,80	87	133	•
9,90	87	133	•
10,00	87	133	•
10,10	87	133	•
10,20	87	133	•
10,25	87	133	•
10,30	87	133	•
10,40	87	133	•
10,50	87	133	•
10,80	87	133	•
10,70	94	142	•
10,75	94	142	•
10,80	94	142	•

D	f ₁	L	STOCK
10,90	94	142	•
11,00	94	142	•
11,10	94	142	•
11,20	94	142	•
11,25	94	142	•
11,30	94	142	•
11,40	94	142	•
11,50	94	142	•
11,60	94	142	•
11,70	94	142	•
11,75	94	142	•
11,80	94	142	•
11,90	101	151	•
12,00	101	151	•
12,10	101	151	•
12,20	101	151	•
12,25	101	151	•
12,30	101	151	•
12,40	101	151	•
12,50	101	151	•
12,60	101	151	•
12,70	101	151	•
12,75	101	151	•
12,80	101	151	•
12,90	101	151	•
13,00	101	151	•
13,10	101	151	•
13,20	101	151	•
13,25	108	160	•
13,30	108	160	•
13,40	108	160	•
13,50	108	160	•
13,60	108	160	•
13,70	108	160	•
13,75	108	160	•

D	f ₁	L	STOCK
13,80	108	160	•
13,90	108	160	•
14,00	108	160	•
14,25	114	169	•
14,50	114	169	•
14,75	114	169	•
15,00	114	169	•
15,25	120	178	•
15,50	120	178	•
15,75	120	178	•
16,00	120	178	•
16,25	125	184	•
16,50	125	184	•
16,75	125	184	•
17,00	125	184	•
17,25	130	191	•
17,50	130	191	•
17,75	130	191	•
18,00	130	191	•
18,25	135	198	•
18,50	135	198	•
18,75	135	198	•
19,00	135	198	•
19,25	140	205	•
19,50	140	205	•
19,75	140	205	•
20,00	140	205	•

Packing Unit:
Verpackungseinheit:
Unité d'emballage:
Unidad de embalaje:

D	pcs
0,2 ~ 8,0	10
8,1 ~ 13,0	5
13,1 ~	2

b. Pahat HSS-Cobalt

• marked items are NACHI EUROPE stock products,
for all other sizes please contact us.

• Markierte Artikel sind NACHI EUROPE Standardprodukte,
für alle übrigen Produkte: Lieferzeit auf Anfrage.

NACHI

List 6522 COBALT STRAIGHT SHANK DRILLS

DIN 338

HSS-E CoB



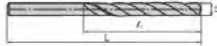
D_z1,6

UK For hard, tough materials with thermal stresses.

D Für schwer zerspanbare Werkstoffe bei hoher thermischer Beanspruchung.

F Pour matériaux difficiles à usiner très bonne résistance thermique.

E Para materiales de difícil arranque de viruta con fuerte sollicitación térmica.



unit: mm

D	ℓ ₁	L	STOCK
0,20	2,5	19	•
0,25	3	19	•
0,30	3	19	•
0,35	4	19	•
0,40	5	20	•
0,45	5	20	•
0,50	6	22	•
0,55	7	24	•
0,60	7	24	•
0,65	8	26	•
0,70	9	28	•
0,75	9	28	•
0,80	10	30	•
0,85	10	30	•
0,90	11	32	•
0,95	11	32	•
1,00	12	34	•
1,05	12	34	•
1,10	14	36	•
1,15	14	36	•
1,20	16	38	•
1,25	16	38	•
1,30	16	38	•
1,35	18	40	•
1,40	18	40	•
1,45	18	40	•
1,50	18	40	•
1,55	20	43	•
1,60	20	43	•
1,65	20	43	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
1,70	20	43	•
1,75	22	46	•
1,80	22	46	•
1,85	22	46	•
1,90	22	46	•
1,95	24	49	•
2,00	24	49	•
2,05	24	49	•
2,10	24	49	•
2,15	27	53	•
2,20	27	53	•
2,25	27	53	•
2,30	27	53	•
2,35	27	53	•
2,40	30	57	•
2,45	30	57	•
2,50	30	57	•
2,55	30	57	•
2,60	30	57	•
2,65	30	57	•
2,70	33	61	•
2,75	33	61	•
2,80	33	61	•
2,85	33	61	•
2,90	33	61	•
2,95	33	61	•
3,00	33	61	•
3,05	36	65	•
3,10	36	65	•
3,20	36	65	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
3,25	36	65	•
3,30	36	65	•
3,40	39	70	•
3,50	39	70	•
3,60	39	70	•
3,70	39	70	•
3,75	39	70	•
3,80	43	75	•
3,90	43	75	•
4,00	43	75	•
4,10	43	75	•
4,20	43	75	•
4,25	47	80	•
4,30	47	80	•
4,40	47	80	•
4,50	47	80	•
4,60	47	80	•
4,70	47	80	•
4,75	47	80	•
4,80	52	86	•
4,90	52	86	•
5,00	52	86	•
5,10	52	86	•
5,20	52	86	•
5,25	52	86	•
5,30	52	86	•
5,40	57	93	•
5,50	57	93	•
5,60	57	93	•
5,70	57	93	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
5,75	57	93	•
5,80	57	93	•
5,90	57	93	•
6,00	57	93	•
6,10	63	101	•
6,20	63	101	•
6,25	63	101	•
6,30	63	101	•
6,40	63	101	•
6,50	63	101	•
6,60	63	101	•
6,70	63	101	•
6,75	69	109	•
6,80	69	109	•
6,90	69	109	•
7,00	69	109	•
7,10	69	109	•
7,20	69	109	•
7,25	69	109	•
7,30	69	109	•
7,40	69	109	•
7,50	69	109	•
7,60	75	117	•
7,70	75	117	•
7,75	75	117	•
7,80	75	117	•
7,90	75	117	•
8,00	75	117	•
8,10	75	117	•
8,20	75	117	•

Program, Programm, Programme, Programa

List 6522

COBALT STRAIGHT SHANK DRILLS

DIN 338

HSS-E Co8



h8

D±1,6

UK For hard, tough materials with thermal stresses.

D Für schwer zerspanbare Werkstoffe bei hoher thermischer Beanspruchung.

F Pour matières difficiles à usiner très bonne résistance thermique.

E Para materiales de difícil arranque de viruta con fuerte sollicitación térmica.



unit: mm

D	ℓ ₁	L	STOCK
8,25	75	117	•
8,30	75	117	•
8,40	75	117	•
8,50	75	117	•
8,60	81	125	•
8,70	81	125	•
8,75	81	125	•
8,80	81	125	•
8,90	81	125	•
9,00	81	125	•
9,10	81	125	•
9,20	81	125	•
9,25	81	125	•
9,30	81	125	•
9,40	81	125	•
9,50	81	125	•
9,60	87	133	•
9,70	87	133	•
9,75	87	133	•
9,80	87	133	•
9,90	87	133	•
10,00	87	133	•
10,10	87	133	•
10,20	87	133	•
10,25	87	133	•
10,30	87	133	•
10,40	87	133	•
10,50	87	133	•
10,60	87	133	•
10,70	94	142	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
10,75	94	142	•
10,80	94	142	•
10,90	94	142	•
11,00	94	142	•
11,10	94	142	•
11,20	94	142	•
11,25	94	142	•
11,30	94	142	•
11,40	94	142	•
11,50	94	142	•
11,60	94	142	•
11,70	94	142	•
11,75	94	142	•
11,80	94	142	•
11,90	101	151	•
12,00	101	151	•
12,10	101	151	•
12,20	101	151	•
12,25	101	151	•
12,30	101	151	•
12,40	101	151	•
12,50	101	151	•
12,60	101	151	•
12,70	101	151	•
12,75	101	151	•
12,80	101	151	•
12,90	101	151	•
13,00	101	151	•
13,10	101	151	•
13,20	101	151	•

D	ℓ ₁	L	STOCK
13,30	108	160	•
13,40	108	160	•
13,50	108	160	•
13,60	108	160	•
13,70	108	160	•
13,80	108	160	•
13,90	108	160	•
14,00	108	160	•
14,25	114	169	•
14,50	114	169	•
14,75	114	169	•
15,00	114	169	•
15,25	120	178	•
15,50	120	178	•
15,75	120	178	•
16,00	120	178	•
16,50	125	184	•
17,00	125	184	•
17,50	130	191	•
18,00	130	191	•
18,50	135	198	•
19,00	135	198	•
19,50	140	205	•
20,00	140	205	•

Packing Unit:
Verpackungseinheit:
Unité d'emballage:
Unidad de embalaje:

D	pcs
~ 8,0	10
8,1 ~ 13,0	5
13,1 ~	2

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIODATA PENULIS



Gallih Bagus Wicaksono, dilahirkan di Grobogan pada tanggal 22 Mei 1993. Penulis adalah putra pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Kusnadi dan Ibu Indarwati. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri Kentengsari 1 Grobogan, pada saat menginjak kelas 3 SD, penulis pindah sekolah di SD Kedungjati 1 dan lulus pada tahun 2004. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMP Negeri 1

Kedungjati, lulus pada tahun 2007. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMK Negeri 1 Madiun, lulus pada tahun 2010. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Di Jurusan Teknik Mesin ini, penulis mengambil Bidang Studi Teknik Manufaktur. Selama kuliah di Jurusan Teknik Mesin ITS penulis aktif dalam berbagai bidang kegiatan kemahasiswaan diantaranya adalah sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin pada periode 2011-2012 sebagai staf dan pada periode 2012-2013 penulis menjabat sebagai kepala departemen hubungan luar. Penulis juga mengikuti jenjang latihan keterampilan manajemen mahasiswa (LKMM) mulai dari tingkat pra-dasar hingga tingkat dasar dan dilanjutkan dengan pelatihan pemandu LKMM. Penulis juga aktif di kegiatan keolahragaan yaitu voli dan bulutangkis. Pada kedua cabang olahraga ini penulis pernah menorehkan prestasi sebagai juara 1 pada pekan olahraga mahasiswa ITS (POMITS) dan FTI *Olympic Games*.

Dalam kegiatan pengkaderan penulis juga aktif sebagai *organizing committee* dan *instructure committee*. Dalam kegiatan kepanitiaan penulis pernah menjabat sebagai koordinator sie acara pada acara *Indonesia Energy Marathon Challenge* tahun 2013. Pada kegiatan karya tulis ilmiah penulis pernah menorehkan prestasi sebagai juara 1 Science Writing Competition (SWC) yang diselenggarakan di Jurusan Teknik Mesin ITS dan pernah membuat karya tulis ilmiah berupa program kreativitas mahasiswa (PKM) karsa cipta (KC) bersama dengan tim. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan ekstrakurikuler yaitu paduan suara mahasiswa (PSM) ITS. Setelah menyelesaikan tugas akhir ini penulis juga mengikuti seminar internasional yang diadakan oleh Jurusan Teknik Mesin ITS yaitu *The 2nd International Conference On Mechanical Engineering (ICOME)* yang diadakan di pulau dewata Bali sebagai peserta.