



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA  
PERMUKAAN MATERIAL SKD 61 DENGAN  
PENDINGINAN *MINIMUM* *QUANTITY*  
*LUBRICATION (MQL)***

ABDUL HANIF HIDAYATULLAH  
NRP 2113106049

Dosen Pembimbing:

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

Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

PROGRAM SARJANA  
LABORATORIUM PROSES MANUFaktur  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



FINAL PROJECT - TM 141586

# STUDY EKSPERIMENTAL OF SURFACE GRINDING PROCESS OF MATERIAL SKD 61 WITH MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL) COOLANT

ABDUL HANIF HIDAYATULLAH  
NRP 2113106049

ADVISOR:

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

SARJANA PROGRAM  
MANUFACTURING PROCES LABORATORIUM  
DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA



2017

**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA  
PERMUKAAN MATERIAL SKD 61 DENGAN  
PENDINGINAN *MINIMUM QUANTITY*  
*LUBRICATION (MQL)***

Abdul Hanif Hidayatullah  
NRP 2113106049

Dosen Pembimbing:

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

Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

PROGRAM SARJANA  
LABORATORIUM PROSES MANUFAKTUR  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**STUDY EKSPERIMENTAL OF SURFACE GRINDING  
PROCESS OF MATERIAL SKD 61 WITH MINIMUM  
QUANTITY LUBRICATION (MQL) COOLANT**

Abdul Hanif Hidayatullah  
NRP 2113106049

Advisor:

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

SARJANA PROGRAM  
MANUFACTURING PROCES LABORATORIUM  
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA PERMUKAAN  
MATERIAL SKD 61 DENGAN PENDINGINAN *MINIMUM*  
*QUANTITY LUBRICATION (MQL)***

**TUGAS AKHIR**

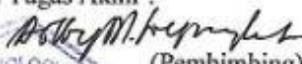
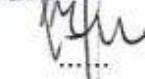
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Abdul Hanif Hidayatullah**

NRP. 2113106049

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Bobby Oedy Pramoedyo S. M.Sc.  (Pembimbing)  
Ph.D.  
NIP. 195305161978031001
2. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  (Penguji I)  
NIP. 196006231988031002
3. Ir. Winarto, DEA.  (Penguji II)  
NIP. 196012131988111001
4. Ir. Bustanul Arifin Noer, M.Sc.  (Penguji III)  
NIP. 195904301989031001

**SURABAYA**

**JULI, 2017**

**STUDI EKSPERIMENTAL PROSES GERINDA  
PERMUKAAN MATERIAL SKD 61 DENGAN  
PENDINGINAN *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION*  
(MQL)**

Nama Mahasiswa : Abdul Hanif Hidayatullah  
NRP : 2113106049  
Pembimbing I : Ir. Bobby Oedy P Soepangkat, M.Sc.,  
PhD.  
Pembimbing II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

**ABSTRAK**

Proses gerinda permukaan adalah suatu proses abrasif pada permukaan benda kerja dengan menggunakan batu gerinda yang berputar. Proses dari pemesinan tersebut dapat menghasilkan benda kerja dengan permukaan yang rata dan kehalusan permukaan yang telah ditentukan. Untuk mendapatkan hasil penggerindaan sesuai dengan yang diharapkan, maka digunakan cairan pendingin untuk membantu proses gerinda tersebut. Penggunaan cairan pendingin pada proses pemesinan gerinda permukaan ini memberikan efek pada batu gerinda agar tidak cepat aus. Jika terjadi keausan yang tinggi, maka akan menimbulkan gaya yang tinggi, pemanasan yang berlebihan, dan akan mengakibatkan kualitas permukaan menjadi buruk. Salah satu cara untuk menanggulangi masalah tersebut adalah menggunakan *minimum quantity lubrication* (MQL).

Penelitian dilakukan ditujukan untuk mempelajari pengaruh dari dua jenis metode pendingin (MQL dan *dry*), tiga level kecepatan makan (150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s) dan tiga level kedalaman potong (0.01 mm, 0.03 mm, 0.06 mm) terhadap gaya tangensial, gaya normal, kekasaran permukaan, mode pembentukan geram dan gerinda permukaan pada proses gerinda permukaan material baja perkakas SKD 61. Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen faktorial rancangan

2x3x3. Pengukuran gaya tangensial, gaya normal dilakukan dengan menggunakan dinamometer, kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan *surfacer*, serta analisa bentuk geram dan morfologi permukaan benda kerja dilakukan dengan mengamati foto hasil *scanningelectronmicroscope* (SEM).

Hasil penelitian pada proses gerinda permukaan menunjukkan bahwa variabel proses jenis pendingin, kecepatan makan dan kedalaman potong berpengaruh signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Penggunaan MQL pada proses gerinda permukaan menurunkan gaya tangensial, gaya normal dan derajat *burning* berkurang, akan tetapi membuat kekasaran permukaan benda kerja menjadi meningkat. Peningkatan nilai kecepatan makan mengurangi derajat *burning*, tetapi gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan akan meningkat. Peningkatan kedalaman potong menyebabkan gaya tangensial, gaya normal, kekasaran permukaan dan derajat *burning* menjadi meningkat. Geram yang dihasilkan dari proses gerinda yang menggunakan MQL didominasi oleh bentuk-bentuk seperti *lamellar*, *leafy* dan geram yang berbentuk patahan-patahan kecil. Penggerindaan kering menghasilkan geram yang didominasi oleh bentuk-bentuk seperti *leafy*, *lamellar* dan *spherical*.

Kata kunci: gerinda permukaan, MQL, gaya tangensial, gaya normal, IPBK, mode pembentukan geram.

**STUDY EKSPERIMENTAL OF SURFACE  
GRINDING PROCESS OF MATERIAL SKD 61 WITH  
MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL)  
COOLANT**

Student Name : Abdul Hanif Hidayatullah

NRP : 2113106049

Advisor I : Ir. Bobby Oedy P Soepangkat, M.Sc., PhD.

Advisor II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

**ABSTRACT**

The surface grinding process is an abrasive process on the surface of the workpiece by using a rotating grinding wheel. The process of machining can produce a workpiece with a flat surface and a predetermined surface smoothness. To obtain the desired grinding results as expected, a cooling fluid is used to assist the grinding process. The use of coolant in the process of machining of surface grinding has an effect on the grinding wheel so as not to wear out quickly. If there is a high wear, it will cause a high force, excessive warming, and will lead to poor surface quality. One way to overcome the problem is to use minimum quantity lubrication (MQL).

The study was conducted to study the effect of two types of cooling methods (MQL and dry), three feeding rate levels (150 mm / s, 200 mm / s, 250 mm / s) and three levels of cutting depth (0.01 mm, 0.03 mm, 0.06 Mm) to tangential force, normal force, surface roughness, chips forming mode and surface grinding on surface process steel SKD 61 tool steel. This research uses 2x3x3 design factorial design.

Tangential force measurement, normal force is done by using dynamometer, surface roughness Measured using surfacetester, as well as analysis of chips and morphology of the workpiece surface is done by observing the photograph of scanningelectronmicroscope (SEM).

The results of the research on surface grinding process showed that the cooling type process variables, feeding speed and cutting depth had significant effect on tangential, normal force and surface roughness. The use of MQL on the surface grinding process decreases the tangential, normal force and degree of burning decreases, but makes the roughness of the workpiece surface increasing. Increasing the value of the feeding rate reduces the degree of burning, but the tangential force, normal force and surface roughness will increase. Increased cut depth causes the tangential force, normal force, surface roughness and degree of burning to increase. The chips generated from the grinding process using MQL is dominated by forms such as lamellar, leafy and friable in the form of small fractures. Dry grinding produces chips which is dominated by forms such as leafy, lamellar and spherical.

Keywords: surface grinding, MQL, tangential force, normal force, IPBK, formation mode of chips

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACK	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.2.1 Batasan Masalah.....	3
1.2.2 Asumsi Penelitian.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori .....	6
2.2.1 Proses Gerinda.....	6
2.2.2 Batu Gerinda .....	8
2.2.3 <i>Balancing</i> dan <i>Dressing</i> .....	9
2.2.4 Mekanisme Pembentukan Geram (MPG) .....	10
2.2.5 Kekasaran Permukaan Benda Kerja .....	16
2.2.6 <i>Surface Burning</i> .....	21
2.2.7 <i>Minimum Quantity Lubrication</i> (MQL) .....	21
2.2.8 Langkah-Langkah dalam Desain Eksperimen....	22
2.2.9 Desain Faktorial .....	24
2.2.10 Analisis Variansi (ANAVA) .....	25
2.2.11 Uji Distribusi F.....	26
2.2.12 Analisis Regresi.....	28
2.2.13 Uji Asumsi Residual.....	31
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33

3.1 Tahapan Penelitian .....	33
3.2 Variabel-Variabel dalam Penelitian .....	35
3.2.1 Variabel Bebas .....	35
3.2.2 Variabel Respon .....	35
3.2.3 Variabel Konstan.....	36
3.3 Alat dan Bahan Penelitian .....	36
3.3.1 Alat Penelitian .....	36
3.3.2 Bahan Penelitian.....	43
3.4 Prosedur Penelitian.....	43
3.5 Pengukuran dan Pengambilan Data.....	45
3.5.1 Pengukuran Kekasaran Permukaan .....	45
3.5.2 Pengamatan <i>Surface Burning</i> .....	45
3.5.3 Pengambilan Foto Bentuk Geram .....	46
3.6 Rancangan Percobaan.....	46
<b>BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b>	<b>49</b>
4.1 Data Hasil Eksperimen .....	49
4.2 Analisis Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial	50
4.2.1 Analisis Variabel Proses Terhadap Gaya	
Tangensial .....	50
4.2.2 Pengujian Asumsi Residual Gaya Tangensial....	56
4.2.3 Analisis Variabel Proses Terhadap Gaya Normal	
.....	60
4.2.4 Pengujian Asumsi Residual Gaya Normal.....	66
4.3 Analisis Variabel Proses Terhadap Kekasaran	
Permukaan.....	69
4.3.1 Pengujian Asumsi Residual Kekasaran Permukaan	
.....	75
4.4 Pemodelan Matematis Untuk Gaya Tangensial ....	79
4.4.1 Uji Regresi.....	80
4.4.2 Uji Asumsi Residual.....	80
4.5 Pemodelan Matematis Untuk Gaya Normal.....	83

4.5.1 Uji Regresi.....	83
4.5.2 Uji Asumsi Residual.....	84
4.6 Pemodelan Matematis Untuk Kekasaran Permukaan	87
4.6.1 Uji Regresi.....	87
4.6.2 Uji Asumsi Residual.....	88
4.7 Pengaruh Variabel Proses Terhadap <i>Surface Burning</i>	91
4.8 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Morfologi Permukaan Benda Kerja.....	96
4.9 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Bentuk Geram	99
4.10 Diskusi dan Pembahasan .....	102
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>107</b>
4.11 Kesimpulan.....	107
4.12 Saran .....	108
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>109</b>
<b>LAMPIRAN 1</b>	<b>111</b>
<b>LAMPIRAN 2</b>	<b>115</b>
<b>LAMPIRAN 3</b>	<b>120</b>
<b>LAMPIRAN 4</b>	<b>138</b>
<b>LAMPIRAN 5</b>	<b>145</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>6</b>
	<b>Erro</b>

**r! Bookmark not defined.**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses gerinda permukaan (Rochim, 1993)	7
Gambar 2.2 Kodifikasi batu gerinda (Rochim, 1993)	9
Gambar 2.3 Tiga tipe aksi abrasif: (a) Cutting (b) Ploughing (c) Rubbing (Rowe, 2009)	10
Gambar 2.4 Lingkaran gaya pemotongan (Rochim, 1993)	12
Gambar 2.5 Garis-garis isoterm pada geram pada waktu pemotongan berlangsung (Rochim, 1993)	14
Gambar 2.6 Geometri pahat dengan sudut geram (a) positif dan (b) negatif (Black dan Kohser, 2008)	15
Gambar 2.7 Ilustrasi proses gerinda (a) up grinding (b) down grinding (Rochim, 1993)	16
Gambar 2.8 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)	16
Gambar 2.9 External MQL supply dan Internal MQL supply (Klocke, 2011)	21
Gambar 2.10 Sistem suplai MQL (Klocke, 2011)	22
Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian	32
Gambar 3.2 Mesin gerinda permukaan model KGS818AH	36
Gambar 3.3 Unit MQL	36
Gambar 3.4 Skema sistem kerja unit MQL	37
Gambar 3.5 Dinamometer Kistler 9272	37
Gambar 3.6 DAQ Kistler 567A	38
Gambar 3.7 Charge Amplifier 5070A	38
Gambar 3.8 <i>Notebook</i>	39
Gambar 3.9 Mitutoyo Surftest 301	39
Gambar 3.10 Scanning Electron Microscope (SEM) EVO MA10	40
Gambar 3.11 Alat bantu cekam	40
Gambar 3.12 Mistar insut	41
Gambar 3.13 Bentuk spesimen benda kerja	41
Gambar 3.14 Daerah penggerindaan	42
Gambar 3.15 Skema pengukuran kekasaran permukaan	44
Gambar 4.1 Gaya tangensial searah sumbu Y ( $F_y$ ) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan dry, kecepatan makan 200 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm	47

Gambar 4.2	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial pada kecepatan makan 150 mm/s	50
Gambar 4.3	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial pada kecepatan makan 200 mm/s	51
Gambar 4.4	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial pada kecepatan makan 250 mm/s	52
Gambar 4.5	Plot residual gaya tangensial versus order	53
Gambar 4.6	Plot ACF pada respon gaya tangensial	53
Gambar 4.7	Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial	54
Gambar 4.8	Grafik pengaruh jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya tangensial	55
Gambar 4.9	Gaya normal ( $F_z$ ) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan dry, kecepatan makan 200 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm	56
Gambar 4.10	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal pada kecepatan makan 150 mm/s	60
Gambar 4.11	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal pada kecepatan makan 200 mm/s	61
Gambar 4.12	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal pada kecepatan makan 250 mm/s	62
Gambar 4.13	Plot residual gaya normal versus order	63
Gambar 4.14	Plot ACF pada respon gaya normal	63
Gambar 4.15	Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal	64
Gambar 4.16	Grafik pengaruh jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya normal	65
Gambar 4.17	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan pada kecepatan makan 150 mm/s	69
Gambar 4.18	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan pada kecepatan makan 200 mm/s	70
Gambar 4.19	Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan pada kecepatan makan 250 mm/s	71
Gambar 4.20	Plot residual kekasaran permukaan versus order	72
Gambar 4.21	Plot ACF pada respon kekasaran permukaan	72

Gambar 4.22 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan	73
Gambar 4.23 Grafik pengaruh jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan	74
Gambar 4.24 Plot residual gaya tangensial versus order	77
Gambar 4.25 Plot ACF pada respon gaya tangensial	77
Gambar 4.26 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial	78
Gambar 4.27 Plot residual gaya normal versus order	81
Gambar 4.28 Plot ACF pada respon gaya normal	81
Gambar 4.29 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal	82
Gambar 4.30 Plot residual kekasaran permukaan versus order	85
Gambar 4.31 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan	85
Gambar 4.32 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan	86
Gambar 4.33 Surface burning pada proses gerinda permukaan dengan kondisi pemesinan dry, (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250 mm/s	88
Gambar 4.34 Surface burning pada proses gerinda permukaan dengan kondisi pemesinan MQL, (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250 mm/s	88
Gambar 4.35 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan dry, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm	92
Gambar 4.36 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan dry, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.06 mm	92
Gambar 4.37 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm	93

Gambar 4.38 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm 94

Gambar 4.39 Foto SEM geram dengan pendinginan dry, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm 95

Gambar 4.40 Foto SEM geram dengan pendinginan dry, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.06 mm 95

Gambar 4.41 Foto SEM geram dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm 97

Gambar 4.42 Foto SEM geram dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.06 mm 97

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Angka kekasaran dan panjang sampel standar	19
Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan	20
Tabel 2.3 Rancangan penelitian desain faktorial	24
Tabel 2.4 Tabel analisis variansi (ANAVA) dua arah	25
Tabel 3.1 Rancangan percobaan	45
Tabel 4.1 Data hasil eksperimen proses gerinda permukaan	46
Tabel 4.2 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap gaya tangensial	48
Tabel 4.3 Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap gaya tangensial	49
Tabel 4.4 Hasil uji Tukey pada jenis pendinginan	49
Tabel 4.5 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan	49
Tabel 4.6 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong	49
Tabel 4.7 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap gaya normal	57
Tabel 4.8 Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap gaya normal	58
Tabel 4.9 Hasil uji Tukey pada jenis pendinginan	58
Tabel 4.10 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan	58
Tabel 4.11 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong	59
Tabel 4.12 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap kekasaran permukaan	66
Tabel 4.13 Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap kekasaran permukaan	67
Tabel 4.14 Hasil uji Tukey pada jenis pendinginan	67
Tabel 4.15 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan	68
Tabel 4.16 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong	68
Tabel 4.17 Hasil ANAVA untuk gaya tangensial	75
Tabel 4.18 Koefisien regresi untuk model gaya tangensial	75
Tabel 4.19 Hasil ANAVA untuk gaya normal	79

Tabel 4.20 Koefisien regresi untuk model gaya normal	79
Tabel 4.21 Hasil ANAVA untuk kekasaran permukaan	83
Tabel 4.22 Koefisien regresi untuk model kekasaran permukaan	83
Tabel 4.23 Klasifikasi derajat burning	89
Tabel 4.24 Derajat burning hasil eksperimen	90

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses gerinda permukaan adalah suatu proses abrasif pada permukaan benda kerja dengan menggunakan batu gerinda yang berputar. Proses dari pemesinan tersebut dapat menghasilkan benda kerja dengan permukaan yang rata dan kehalusan permukaan yang telah ditentukan. Proses gerinda permukaan menggunakan batu gerinda sebagai alat iris. Batu gerinda adalah butir-butir abrasif yang diikat menggunakan bahan pengikat dengan komposisi tertentu pada sebuah roda yang dengan seksama diseimbangkan untuk penggunaan putaran tinggi. Kekuatan ikatan pada batu gerinda dipengaruhi oleh kuantitas, jenis dan distribusi bahan pengikat dengan komposisi dan pemilihan yang tepat sehingga grit terikat dan ditahan dengan baik, namun masih dimungkinkan untuk rontok. Batu gerinda merupakan alat iris yang rumit, untuk itu pembuatan batu gerinda pada lingkungan manufaktur harus dengan kontrol yang ketat.

Setiap benda yang bergesekan akan menimbulkan gaya dan panas yang mempengaruhi integritas permukaan benda kerja (IPBK), maka proses gerinda permukaan ini membutuhkan *cutting fluid* untuk mendinginkan batu gerinda, benda kerja, dan juga agar dapat meminimalisir setiap kemungkinan yang terjadi akibat gesekan tersebut. Fungsi *cutting fluid* selain untuk mendinginkan pahat dan benda kerja, juga berfungsi untuk membuang geram dan melindungi permukaan benda kerja dari korosi. Penggunaan *cutting fluid* pada proses pemesinan gerinda permukaan ini memberikan efek pada batu gerinda agar tidak cepat aus. Jika terjadi keausan yang tinggi, maka akan menimbulkan gaya yang tinggi, pemanasan yang berlebihan, dan akan mengakibatkan kualitas permukaan menjadi buruk. Di sisi lain, *cutting fluid* memiliki pengaruh negatif pada lingkungan kerja dari segi kesehatan operator mesin, polusi dan kemungkinan

ledakan (untuk minyak). Selanjutnya, penyaringan dan pembuangan limbah cairan tersebut merupakan bagian besar dari total biaya produksi. Salah satu cara untuk menanggulangi masalah tersebut adalah menggunakan *minimum quantity lubrication* (MQL). Laju penggunaan pelumasan pada MQL sangat kecil, yaitu kurang dari 30 ml/jam, sehingga benda kerja, batu gerinda, mesin dan lingkungannya relatif tetap kering. Penggunaan MQL dapat menghemat penggunaan cairan pendingin tetapi tidak mempengaruhi fungsi dari pendinginan itu sendiri.

Tawakoli dkk. (2009) meneliti tentang penggunaan MQL pada proses gerinda. Variabel-variabel proses yang digunakan meliputi kecepatan potong ( $v_c$ ), kecepatan makan ( $v_f$ ), kedalaman potong ( $a$ ), kondisi pemesinan dan material benda kerja yang digunakan. Hasil yang diperoleh adalah kualitas permukaan akhir secara signifikan lebih baik ketika MQL digunakan pada proses penggerindan dengan material benda kerja 100Cr6. Barczak dkk. (2010) melakukan penelitian tentang penggerindaan permukaan dengan menggunakan pendinginan MQL. Variabel-variabel yang digunakan meliputi kecepatan potong ( $v_c$ ), kecepatan makan ( $v_f$ ), kedalaman potong ( $a$ ), *dressing* dan material benda kerja. Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut membuktikan bahwa dalam kondisi tertentu MQL mampu menghasilkan kualitas permukaan yang lebih baik jika dibandingkan dengan pendinginan konvensional. Bianchi dkk. (2010) juga melakukan penelitian yang serupa. Variabel yang divariasikan adalah kedalaman potong ( $a$ ). Hasil eksperimennya menunjukkan bahwa proses gerinda menggunakan pendinginan MQL dapat dilakukan pada kedalaman potong yang rendah.

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, dilakukan penelitian tentang pengaruh variabel-variabel proses terhadap gaya tangensial, gaya normal, integritas permukaan benda kerja (IPBK) dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan. Variabel-variabel proses yang digunakan meliputi metode pendinginan, kedalaman potong ( $a$ ) dan kecepatan makan

( $v_f$ ). Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah material SKD 61. Rancangan eksperimen yang digunakan adalah rancangan faktorial  $2 \times 3 \times 3$ . Metode analisis yang akan digunakan untuk mengetahui pengaruh dari metode pendinginan, kedalaman potong ( $a$ ) dan kecepatan makan ( $v_f$ ) terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan adalah analisis variansi (ANAVA). *Scanning Electron Microscope* (SEM) akan digunakan untuk melakukan analisis mode pembentukan geram dan morfologi permukaan benda kerja.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang yang telah dijelaskan, maka permasalahan yang dapat dirumuskan adalah bagaimana pengaruh dari MQL dan variabel-variabel proses gerinda permukaan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram.

### 1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas masalah biaya selama proses pemesinan.
2. Penelitian dilakukan dengan menggunakan mesin gerinda permukaan model KGS818AH.
3. Proses gerinda dilakukan dengan menggunakan media pendinginan berupa minyak nabati dan tanpa pendingin.
4. Menggunakan batu gerinda dengan pengulangan pengasahan.
5. Pengambilan foto SEM untuk bentuk geram dan morfologi permukaan benda kerja diambil secara acak.

### 1.2.2 Asumsi Penelitian

Adapun asumsi-asumsi yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap tidak berpengaruh terhadap penelitian.

2. Benda kerja dan batu gerinda memiliki komposisi kimia yang homogen.
3. Temperatur pemesinan dianggap normal pada temperatur ruang.
4. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi yang baik.
5. Alat ukur yang digunakan dalam kondisi yang layak.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dan memahami pengaruh MQL dan variabel-variabel proses gerinda permukaan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Kontribusi atau manfaat yang dapat diberikan melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan pengetahuan tentang proses gerinda permukaan yang membahas pengaruh MQL dan variabel-variabel proses gerinda permukaan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam rangka pengembangan tentang pengaruh MQL dan variabel-variabel proses gerinda permukaan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Proses gerinda permukaan merupakan proses abrasif pada permukaan benda kerja dengan menggunakan batu gerinda yang berputar. Proses tersebut akan menghasilkan benda kerja dengan kualitas yang baik jika ditambahkan cairan pendingin pada saat proses berlangsung. Tujuan utama dari cairan pendingin tersebut adalah sebagai pelumas, pendingin, pembilas geram dan meminimalkan korosi. Meskipun cairan pendingin berpengaruh dalam menghasilkan benda kerja yang berkualitas, penggunaan cairan tersebut juga memiliki dampak negatif bagi lingkungan dan operator. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut adalah mengganti cairan pendingin dengan MQL.

Tawakoli dkk. (2009) menjelaskan bahwa proses gerinda yang dilakukan akan menimbulkan deformasi plastis di zona kontak. Variabel-variabel yang digunakan meliputi kecepatan potong (20 m/s, 25 m/s dan 30 m/s), kecepatan makan (2.5 m/min, 5 m/min dan 10 m/min), kedalaman potong (5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  dan 25  $\mu\text{m}$ ), kondisi pemesinan (*dry*, *flood* dan MQL) dan material benda kerja (100Cr6 *hardened steel* dengan kekerasan 50 HRC dan 42CrMo4 *soft steel* dengan kekerasan 80 HRB). Pada penelitian tersebut digunakan batu gerinda tipe 22A4618V300. Penelitian ini menggunakan tiga teknik pendinginan, yaitu MQL (LB 8000), pendinginan konvensional (*coolant lubricant* Castrol Syntilo 2000 dengan konsentrasi 5%), dan udara bertekanan (*air pressure* 4bar). Penggerindaan material jenis 100Cr6 *hardened steel* dengan menggunakan MQL akan menghasilkan kekasaran permukaan akhir yang lebih rendah dari pada kekasaran permukaan hasil penggerindaan dengan menggunakan pendinginan yang lain. Penggerindaan material jenis 42CrMo4 *soft steel* dengan menggunakan MQL akan

menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan pendinginan yang lain. Penggerindaan menggunakan MQL dibandingkan dengan penggerindaan kering mengurangi jauh nilai gaya tangensial dan gaya normal.

Barczak dkk. (2010) melakukan penelitian proses gerinda permukaan dengan menggunakan 2 kecepatan potong (25 m/s dan 45 m/s), 2 kecepatan makan (6.5 m/min dan 15 m/min), 2 kedalaman potong (5  $\mu\text{m}$  dan 15  $\mu\text{m}$ ), 2 macam *dressing* (kasar dan halus), 3 macam pendinginan (*dry*, *flood* dan MQL) dan 2 material benda kerja (BS 970 080M40 dan BS 534A99/BS BM2). Penelitian tersebut membuktikan bahwa dalam kondisi tertentu MQL mampu menghasilkan kualitas permukaan yang lebih baik jika dibandingkan dengan pendinginan konvensional. Penggunaan MQL juga dapat menurunkan gaya tangensial.

Bianchi dkk. (2010) mengadakan penelitian tentang penggunaan MQL pada proses gerinda permukaan dengan material benda kerja baja AISI 4340. Variabel proses yang divariasikan adalah kedalaman potong (0.02 mm, 0.05 mm, 0.08 mm). Kedalaman potong 0.02 mm digunakan untuk *finishing*, kedalaman potong 0.05 mm digunakan pada proses gerinda medium dan kedalaman potong 0.08 mm digunakan untuk proses gerinda kasar. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa, proses penggerindaan dengan MQL menunjukkan efisiensi yang tinggi untuk kedalaman potong yang rendah sampai dengan medium. Kekasaran permukaan meningkat pada saat penggunaan MQL. Penggunaan MQL pada kedalaman tertentu menghasilkan gaya tangensial yang lebih rendah.

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Proses Gerinda**

Proses gerinda dikerjakan dengan mesin gerinda menggunakan pahat berupa batu gerinda berbentuk piringan (*grinding wheel / disk*) yang terbuat dari campuran serbuk abrasif dan bahan pengikat dengan komposisi dan struktur tertentu. Batu

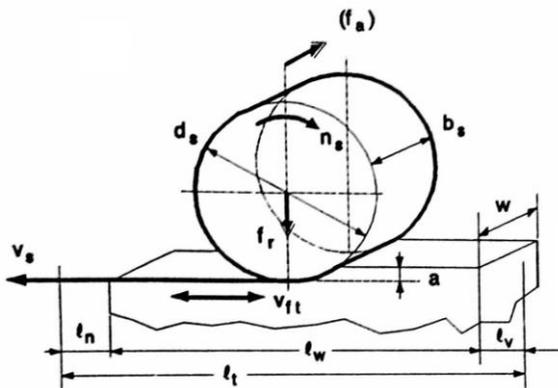
gerinda yang dipasang pada poros utama berputar dengan kecepatan tertentu. Kecepatan periferal batu gerinda dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut (Rochim, 1993):

$$v_s = \frac{\pi d_s n_s}{6000} \text{ (m/s)}$$

Dengan:

- $v_s$  : Kecepatan periferal batu gerinda (m/s)
- $d_s$  : Diameter batu gerinda (mm)
- $n_s$  : Putaran batu gerinda (r/m)

Proses gerinda permukaan mempunyai parameter-parameter yang berpengaruh pada hasil pemesinan. Parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini (Rochim, 1993):



Gambar 2.1 Proses gerinda permukaan (Rochim, 1993)

- $v_s$  : Kecepatan periferal batu gerinda (m/s)
- $v_{ft}$  : Kecepatan makan tangensial (mm/s)
- $f_r$  : Gerak makan radial (mm/langkah)
- $f_a$  : Gerak makan aksial (mm/langkah)
- $l_t$  : Jarak gerak melintang (mm)

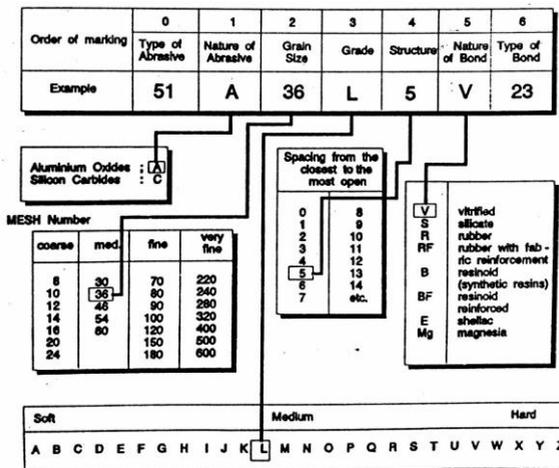
$l_v$	: Panjang langkah pengawalan (mm)
$l_w$	: Panjang penggerindaan (mm)
$l_n$	: Panjang langkah pengakhiran (mm)
$d_s$	: Diameter batu gerinda (mm)
$n_s$	: Putaran batu gerinda (r/m)
$b_s$	: Lebar batu gerinda (mm)
$a$	: Kedalaman penggerindaan (mm)
$w$	: Lebar benda kerja (mm)

### 2.2.2 Batu Gerinda

Batu gerinda dibuat dari campuran serbuk abrasif dengan bahan pengikat. Dari kombinasi dua elemen tersebut menghasilkan jenis-jenis batu gerinda dengan fungsi yang berbeda-beda. Untuk membantu dalam pemilihan jenis batu gerinda, maka ISO merekomendasikan pemakaian jenis batu gerinda yang telah distandarkan (ISO 525, 1975). Kode tersebut merupakan tanda yang harus ada pada batu gerinda yang terdiri dari 7 kelompok huruf dan angka dengan arti tertentu. Ketujuh kelompok tersebut secara berurutan adalah (Rochim, 1993):

0. - Spesifikasi serbuk abrasif, sesuai dengan klasifikasi lebih lanjut dari pabrik pembuat,
  1. - Jenis serbuk abrasif,
  2. - Ukuran serbuk abrasif,
  3. - Kekerasan atau kekuatan ikatan,
  4. - Struktur,
  5. - Jenis bahan pengikat,
  6. - Spesifikasi bahan pengikat,

Ketujuh kelompok huruf dan angka tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut (Rochim, 1993):



Gambar 2.2 Kodifikasi batu gerinda (Rochim, 1993)

### 2.2.3 *Balancing* dan *Dressing*

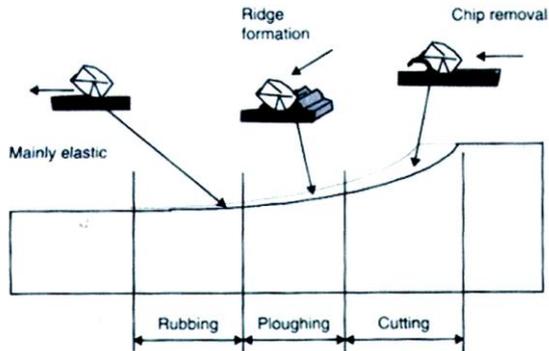
Proses pemasangan batu gerinda pada mesin gerinda harus seimbang. Ketidak seimbangan batu gerinda dapat menyebabkan permukaan benda kerja yang kurang halus, mempercepat kerusakan bantalan mesin gerinda, menyebabkan batu gerinda pecah pada putaran yang tinggi, sehingga dapat merusak mesin dan membahayakan operator. Proses *balancing* dilakukan pada kecepatan putaran batu gerinda yang rendah dan akurasi menengah, dengan cara statis menggunakan spindle tiruan, yang memungkinkan untuk memutar dan mengetahui posisi seimbang batu gerinda (Rowe, 2009).

Batu gerinda jika dipakai terus menerus semakin lama akan menjadi tumpul, sehingga menyebabkan proses penggerindaan menjadi tidak optimal. Untuk mengoptimalkan kembali proses penggerindaan, maka perlu dilakukan proses *dressing* pada batu gerinda tersebut. Fungsi dari proses *dressing* sebagai berikut (Rowe, 2009) :

- Untuk memperoleh sisi potong yang tajam dan menyeluruh pada ujung batu gerinda.
- Untuk mengikis perekat disekitar serbuk abrasif, sehingga serbuk abrasif lebih terbuka pada permukaan batu gerinda.
- Untuk mengikis lapisan batu gerinda yang memuat material benda kerja.

#### 2.2.4 Mekanisme Pembentukan Geram (MPG)

Proses pemesinan gerinda permukaan, setiap butiran abrasif pada batu gerinda bekerja seperti pahat potong. Susunan dari butiran abrasif ini tidak teratur/acak dan tidak semua butiran abrasif memotong benda kerja. Ada tiga tipe aksi dari butiran abrasif dalam proses gerinda permukaan, yaitu: *cutting*, *ploughing* dan *rubbing*. *Cutting* adalah proses pemotongan disebabkan butiran abrasif cukup panjang untuk menyentuh benda kerja. *Ploughing* adalah butiran abrasif menyentuh benda kerja tetapi tidak cukup panjang. *Rubbing* adalah butiran abrasif menyentuh permukaan benda kerja. Pada kondisi ini permukaan benda kerja tidak terpotong dan tidak terdeformasi dikarenakan butiran abrasif dan permukaan benda kerja hanya bergesekan. Ilustrasi ketiga kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tiga tipe aksi dari butiran abrasif: (a) *Cutting* (b) *Ploughing* (c) *Rubbing* (Rowe, 2009)

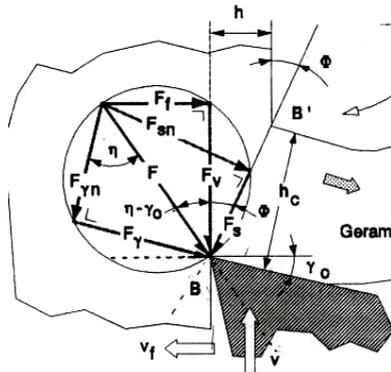
Pada saat kondisi *cutting*, permukaan benda kerja mendapat tekanan yang akan menimbulkan tegangan di daerah sekitar titik penekanan mata potong pahat. Apabila tegangan geser ini melebihi titik *yield* benda kerja, maka akan terjadi deformasi plastis yang menggeser dan memutuskan benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser.

Sistem gaya pada proses gerinda permukaan mempunyai prinsip yang sama dengan pemesinan konvensional yang lain. Berdasarkan teori Merchant, sistem gaya dipandang hanya pada satu bidang, sehingga gaya total dapat diuraikan menjadi dua komponen gaya yang saling tegak lurus. Penguraian gaya dalam hal ini dapat dikemukakan dalam tiga cara, yaitu (Rochim, 1993):

1. Gaya total ( $F$ ) yang jika ditinjau dari proses deformasi material dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu:
  - $F_s$  : gaya geser yang mendeformasikan material pada suatu bidang geser sehingga melampaui batas elastis.
  - $F_{sn}$  : gaya normal pada bidang geser yang menyebabkan pahat tetap; menempel pada benda kerja.

2. Gaya total ( $F$ ) dapat diketahui arah dan besarnya dengan menggunakan dinamometer. Komponen gaya yang diukur adalah:
  - $F_v$  : gaya potong, searah dengan kecepatan potong.
  - $F_f$  : gaya makan, searah dengan kecepatan makan.
3. Gaya total ( $F$ ) yang bereaksi pada bidang geram dan dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu:
  - $F_y$  : gaya gesek pada bidang geram.
  - $F_{yn}$  : gaya normal pada bidang geram.

Karena berasal dari satu gaya, yaitu gaya total ( $F$ ), maka Merchant membuat suatu ilustrasi dimana gaya-gaya tersebut digambarkan pada suatu lingkaran dengan diameter yang sama dengan gaya total. Gambar 2.4 menunjukkan lingkaran gaya pemotongan pada sudut geram positif.



Gambar 2.4 Lingkaran gaya pemotongan (Rochim, 1993)

Berdasarkan analisa geometrik dari lingkaran gaya (Merchant) dapat diturunkan rumus dasar gaya potong  $F_v$  (Rochim, 1993).

Dari,  $F_v = F \cos (\eta - \gamma_o)$  dan  $F_s = F \cos (\Phi + \eta - \gamma_o)$ ,

maka,

$$F_v = \frac{F_s \cos(\eta - \gamma_o)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma_o)}$$

Gaya geser  $F_s$  dapat digantikan dengan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi padanya yaitu,

$$F_s = A_{shi} \cdot \tau_{shi} \quad ; N.$$

dimana,

$\tau_{shi}$  : tegangan geser pada bidang geser;  $N/mm^2$ ,

$A_{shi}$  : penampang bidang geser,  
:  $A / \sin \Phi$  ;  $mm^2$ ,

$A$  : penampang geram sebelum terpotong,  
:  $b \cdot h$  ;  $mm^2$ .

Dengan demikian rumus gaya potong adalah,

$$F_v = \tau_{shi} b \cdot h \frac{\cos(\eta - \gamma_o)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_o)} \dots\dots\dots$$

Energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan, antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja, serta proses perusakan molekular atau ikatan atom pada bidang geser. Kerja/energi mekanik dalam proses pemotongan yang bebas getaran seluruhnya diubah menjadi energi panas/kalor. Energi mekanik persatuan waktu atau daya mekanik yang diubah menjadi energi panas persatuan mekanik waktu tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Rochim, 1993):

$$Q = Q_{sh} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad ; W \dots\dots\dots$$

dimana,

$Q$  = Panas total yang dihasilkan perdetik,

$$= \frac{F_v \cdot v}{60} ; \text{J/s atau W}$$

$Q_{sh}$  = Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geser,

$$= \frac{F_s \cdot v_s}{60} ; \text{J/s atau W}$$

$Q_\gamma$  = Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang geram,

$$= \frac{F_\gamma \cdot v_c}{60} ; \text{J/s atau W}$$

$Q_\alpha$  = Panas yang dihasilkan perdetik pada bidang utama.

Panas tersebut sebagian akan terbawa oleh geram, sebagian mengalir menuju kepahat dan benda kerja dengan prosentase sebagai berikut :

$$Q = Q_c + Q_s + Q_w ; \text{W} \dots\dots\dots$$

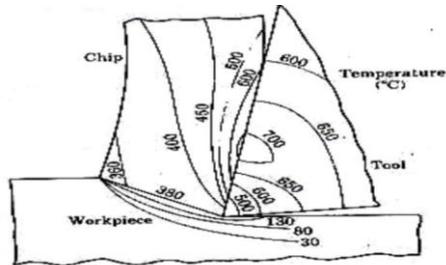
dimana,

$Q$  = panas yang terbawa oleh geram dengan prosentase sekitar 75%,

$Q_s$  = panas yang merambat melalui pahat dengan prosentase sekitar 20%,

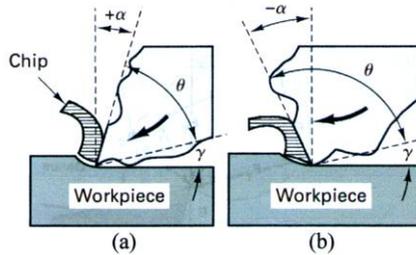
$Q_w$  = panas yang merambat melalui benda kerja dengan prosentase sekitar 5%.

Temperatur rata-rata yang terjadi pada saat pemotongan benda kerja dapat dilihat pada Gambar 2.5.



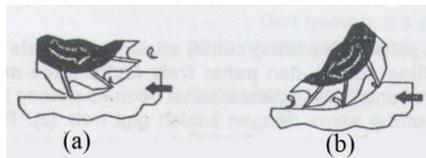
Gambar 2.5 Garis-garis isoterm pada geram pada waktu pemotongan berlangsung (Rochim, 1993)

Temperatur pada pahat menunjukkan nilai yang lebih besar akibat perpindahan panas secara konduksi dari geram menuju pahat. Pemotongan yang terjadi pada proses gerinda tidak berlangsung secara terus-menerus seperti pada proses pemesinan yang lain karena setiap butiran abrasif pada permukaan batu gerinda berfungsi sebagai pahat potong, untuk itu distribusi temperatur seperti Gambar 2.5 tidak berlaku. Temperatur yang terjadi pada butiran abrasif batu gerinda tidak sama dengan temperatur hasil pemotongan seperti diatas karena ada jeda waktu butiran abrasif bergesekan dengan geram hasil pemotongan. Sudut geram pada butiran abrasif batu gerinda bersifat acak dan tersebar diseluruh permukaan batu gerinda. Geometri pahat dengan sudut geram positif dan negatif ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Geometri pahat dengan sudut geram (a) positif dan (b) negatif (Black dan Kohser, 2008)

Proses gerinda dibagi menjadi dua yaitu *up grinding* dan *down grinding* berdasarkan arah penggerindaan. *Down grinding* bisa menjaga ketajaman pahat dan mengurangi kemungkinannya kenaikan gaya seiring bertambahnya waktu selama proses gerinda. *Down grinding* juga bisa menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih halus serta menjaga roda gerinda agar tidak cepat aus, sedangkan pada *up grinding* penyuplaian *cutting fluid* lebih efektif karena fluidanya langsung disuplaikan ke permukaan benda kerja (Rowe, 2010). Adapun ilustrasi dari *up grinding* dan *down grinding* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7.

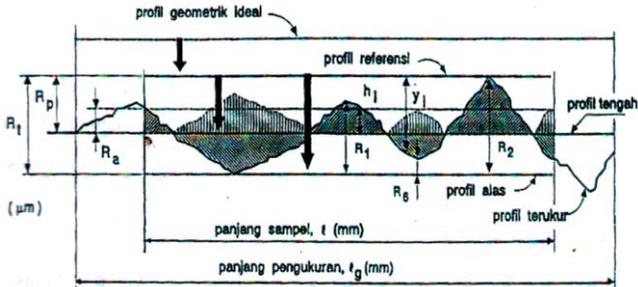


Gambar 2.7 Ilustrasi proses gerinda (a) *up grinding* (b) *down grinding* (Rochim, 1993)

### 2.2.5 Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakteraturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Hal ini dikarenakan terjadi berbagai penyimpangan

selama proses pemesinan, sehingga tidak dapat menghasilkan permukaan dengan bentuk sempurna. Posisi  $R_a$ , bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Rochim, 2001).



Gambar 2.8 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)

Keterangan Gambar 2.8 adalah sebagai berikut:

- Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)**  
 Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran dan garis lengkung.
- Profil Referensi/Acuan/Puncak (*Reference Profile*)**  
 Profil ini digunakan sebagai acuan untuk menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometrik ideal, serta menyinggung puncak tertinggi profil terukur dalam suatu panjang sampel.
- Profil Terukur (*Measured Profile*)**  
 Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan terukur.
- Profil Alas (*Root Profile*)**  
 Profil alas adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu

panjang sampel) sehingga menyinggung pada titik paling terendah profil terukur.

e. Profil Tengah (*Center Profile*)

Profil tengah merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai profil terukur sama dengan jumlah luas daerah-daerah di bawah profil tengah sampai profil terukur.

Berdasarkan profil-profil yang telah dijelaskan, dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan, yaitu yang berhubungan dengan dimensi pada arah tegak dan arah memanjang/mendatar. Untuk dimensi arah tegak dikenal beberapa parameter, yaitu (Rochim, 1993):

a. Kekasaran Total ( $R_t$ )

Kekasaran total adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.

b. Kekasaran Perataan ( $R_p$ )

Kekasaran perataan adalah jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur.

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

c. Kekasaran Rata-rata Aritmatik ( $R_a$ )

Kekasaran rata-rata aritmatik adalah harga rata-rata jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Secara umum  $R_a$  dirumuskan:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |h_i| dx \dots\dots\dots$$

Harga  $R_a$  tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n |h_i| \dots\dots\dots$$

$$R_a = \frac{h_1+h_2+h_3+\dots+h_n}{l}$$

Dengan:

$R_a$  : nilai kekasaran aritmatika.

$h_n$  : tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba.

$n$  : frekuensi pengukuran.

$l$  : panjang sampel yang telah ditentukan.

Dari bermacam-macam parameter permukaan yang disebutkan, parameter  $R_a$  relatif lebih banyak digunakan untuk mengidentifikasikan permukaan. Hal ini disebabkan harga  $R_a$  lebih sensitif terhadap perubahan/penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan. Dengan demikian, jika ada tanda-tanda kenaikan kekasaran maka pencegahan dapat cepat dilakukan.

ISO telah mengklasifikasikan nilai kekasaran rata-rata aritmatik ( $R_a$ ) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Angka kekasaran permukaan ini digunakan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan suatu harga kekasaran permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga  $R_a$  atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO (Rochim, 2001).

Tabel 2.1 Angka kekasaran dan panjang sampel standar

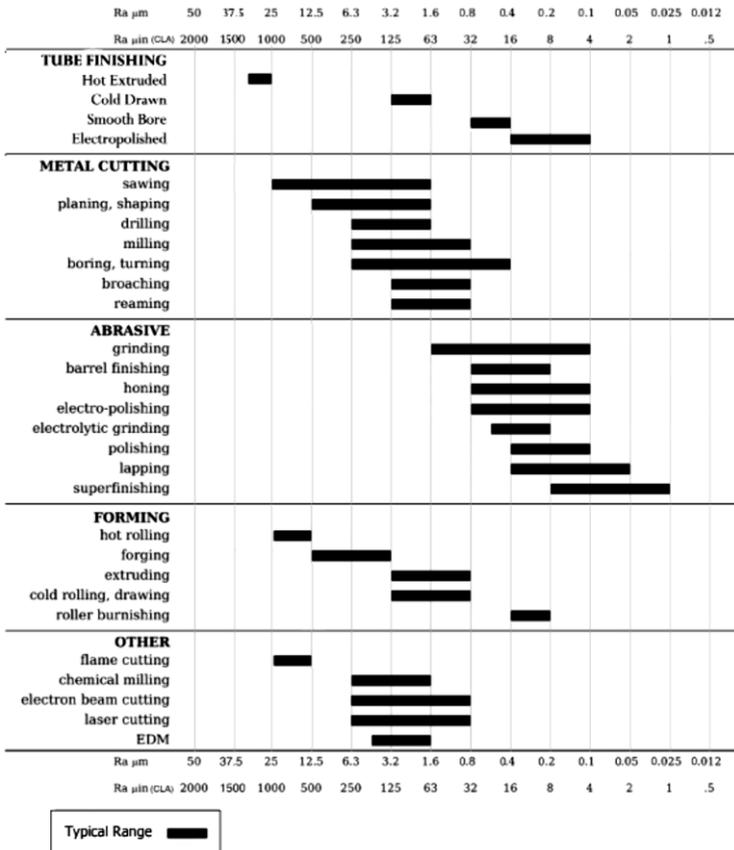
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)	Keterangan
50 25	N12 N11	8	Sangat Kasar
12.5 6.3	N10 N9	2.5	Kasar
3.2 1.6	N8 N7	0.8	Normal

0.2	N4	0.25	Halus
0.1	N3		
0.025	N1	0.08	Sangat Halus

Sumber: Rochim, 2001

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa pengerjaan



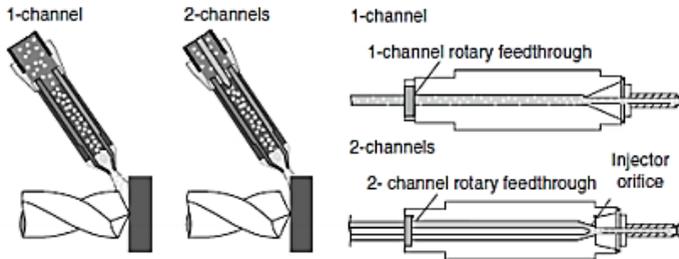
Sumber: [www.finetubes.co.uk](http://www.finetubes.co.uk)

### 2.2.6 *Surface Burning*

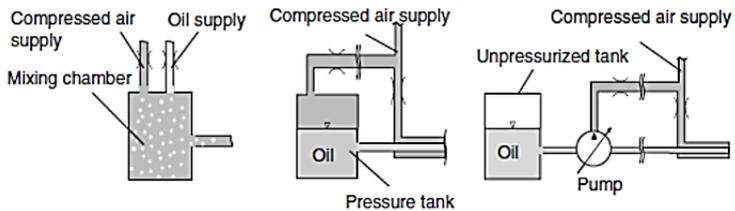
*Surface burning* merupakan salah satu kerusakan termal yang terjadi selama proses gerinda permukaan. Hal ini terjadi pada area gesekan antara batu gerinda dengan permukaan benda kerja dimana pada area ini temperatur naik sangat tinggi. *Surface burning* ditandai dengan perubahan warna dari permukaan benda kerja hasil proses gerinda. Secara visual perubahan warna yang terjadi adalah warna biru kemerah-merahan. Perubahan warna yang terjadi ini sering terjadi tanpa disertai adanya kerusakan secara metalurgi. Tetapi hal ini merupakan indikator bahwa kerusakan termal telah terjadi dan jika tidak dikendalikan dengan benar maka akan terjadi kerusakan permukaan yang lebih lanjut. *Surface burning* disebabkan karena lapisan permukaan yang tipis pada benda teroksidasi dan juga metode pendinginan yang kurang tepat. Selain itu, komposisi kimia, perlakuan panas dan bentuk dari material juga berpengaruh terhadap fenomena *surface burning*.

### 2.2.7 *Minimum Quantity Lubrication (MQL)*

MQL merupakan suplai *lubricant* pendingin dalam bentuk aerosol (Klocke, 2011). MQL adalah teknologi terkini dalam pemesinan untuk mendapatkan keunggulan dalam keselamatan, lingkungan dan ekonomi dengan mengurangi penggunaan *coolant lubricant* dalam pemesinan. Pada MQL, *lubricant* dialirkan dengan jumlah yang sangat kecil ( $< 30$  ml/h) pada aliran udara bertekanan (Braga dkk., 2001). *Lubricant* yang digunakan dalam MQL utamanya adalah *fatty alcohol* dan *ester oil* atau minyak nabati yang dimodifikasi secara kimiawi (Klocke, 2011). Metode suplai pada MQL ada dua, yaitu *external MQL supply* dan *internal MQL supply*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Sistem suplai MQL ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9 *External MQL supply* dan *Internal MQL supply* (Klocke, 2011)



Gambar 2.10 Sistem suplai MQL (Klocke, 2011)

## 2.2.8 Langkah-Langkah dalam Desain Eksperimen

Desain eksperimen memerlukan tahap-tahap penting yang berguna agar eksperimen mengarah pada hasil yang diinginkan. Berikut adalah langkah-langkah melakukan desain eksperimen (Iriawan dan Astuti, 2006):

### 1. Mengetahui Permasalahan

Tahap awal desain eksperimen dimulai dengan melakukan identifikasi permasalahan sehingga kita dapat memperoleh suatu kesimpulan yang dapat menjawab segala permasalahan. Dari permasalahan yang ada kemudian dibuat

suatu pernyataan yang tepat mewakili permasalahan agar memperoleh penyelesaian yang tepat.

2. **Memilih Variabel Respon**  
Tahap kedua adalah menetapkan variabel respon. Variabel respon merupakan variabel dependen, yaitu variabel yang dipengaruhi oleh level faktor.
3. **Menentukan Faktor dan Level**  
Peneliti harus menentukan cara mengendalikan faktor dan cara mengukurnya. Tahap ini memerlukan pengetahuan yang lebih mengenai permasalahan yang akan diteliti agar faktor dan level yang ditentukan tidak menyimpang jauh dari hasil yang diinginkan.
4. **Memilih Metode Desain Eksperimen**  
Metode desain eksperimen harus disesuaikan dengan tujuan penelitian dan permasalahan yang ada. Beberapa metode desain eksperimen antara lain desain faktorial, desain taguchi, dan permukaan respon.
5. **Melaksanakan Percobaan**  
Saat eksperimen dilakukan, proses harus diamati dengan cermat agar eksperimen berjalan sesuai dengan yang direncanakan.
6. **Menganalisis Data**  
Analisis data pada desain eksperimen dilakukan sesuai dengan metode yang dibuat. Salah satu tahap dalam analisis data eksperimen adalah melakukan analisis residual dan uji kecukupan model. Analisis data dalam desain eksperimen digunakan sebagai dasar membuat suatu keputusan dan pernyataan yang tepat.
7. **Membuat Suatu Keputusan**  
Setelah analisis data dilakukan, langkah terakhir adalah membuat suatu keputusan berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan.

### 2.2.9 Desain Faktorial

Desain faktorial merupakan percobaan yang terdiri dari 2 faktor atau lebih yang masing-masing faktor mempunyai level-level tertentu. Semua kemungkinan kombinasi pada tiap-tiap level dari semua faktor, diambil pada setiap unit percobaan. Pelaksanaan percobaan faktorial harus dilakukan secara acak untuk mengurangi bias pada hasil percobaan yang diperoleh. Percobaan yang didasarkan pada desain faktorial, memungkinkan peneliti untuk mempelajari pengaruh setiap faktor terhadap variabel respon, serta efek dari interaksi antara faktor-faktor pada variabel respon (Bhattacharyya dan Johnson, 1977). Percobaan desain faktorial dengan tiga faktor A, B dan C yang masing masing mempunyai 2, 3 dan 3 level ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Rancangan penelitian desain faktorial

Faktor			Respon	
A	B	C	Replikasi 1	Replikasi 2
Level 1	Level 1	Level 1	$Y_{1111}$	$Y_{1112}$
		Level 2	$Y_{1121}$	$Y_{1122}$
		Level 3	$Y_{1131}$	$Y_{1132}$
	Level 2	Level 1	$Y_{1211}$	$Y_{1212}$
		Level 2	$Y_{1221}$	$Y_{1222}$
		Level 3	$Y_{1231}$	$Y_{1232}$
	Level 3	Level 1	$Y_{1311}$	$Y_{1312}$
		Level 2	$Y_{1321}$	$Y_{1322}$
		Level 3	$Y_{1331}$	$Y_{1332}$
Level 2	Level 1	Level 1	$Y_{2111}$	$Y_{2112}$
		Level 2	$Y_{2121}$	$Y_{2122}$
		Level 3	$Y_{2131}$	$Y_{2132}$
	Level 2	Level 1	$Y_{2211}$	$Y_{2212}$
		Level 2	$Y_{2221}$	$Y_{2222}$
		Level 3	$Y_{2231}$	$Y_{2232}$
	Level 3	Level 1	$Y_{2311}$	$Y_{2312}$
		Level 2	$Y_{2321}$	$Y_{2322}$

		Level 3	Y <sub>2331</sub>	Y <sub>2332</sub>
--	--	---------	-------------------	-------------------

## 2.2.10 Analisis Variansi (ANOVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik. 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 ANOVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (*degrees of freedom*, df), jumlah kuadrat (*sum of squares*, SS), kuadrat tengah (*mean squares*, MS) dan F hitung ( $F_0$ ) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 (Ross, 2008).

Tabel 2.4 Tabel analisis variansi (ANOVA) dua arah

Sumber variasi	Sum of square (SS)	Degrees of freedom (df)	Mean square (MS)	F <sub>Ratio</sub> (F <sub>0</sub> )
Variabel Proses A	$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$d_A - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Variabel Proses B	$SS_B = n_B \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$d_B - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interaksi AB	$SS_{AB} = \sum_i \sum_j \frac{X_{ij}^2}{n_A} - \frac{T}{n_{AB}}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SSE = SS_T - SS_A - SS_B$	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	$n-1$		

Sumber: Ross, 2008

Keterangan:

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

### 2.2.11 Uji Distribusi F

Pengujian uji distribusi F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan *error*. Variansi *error* adalah variansi dari setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan (Soejanto, 2009). Secara umum, 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 pasang  $\mu$  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, respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 1991):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + \varepsilon_{ijkm},$$

Dengan demikian, hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

- Untuk taraf faktor A  $\rightarrow H_0$  :  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_i = 0$   
 $H_1$  : paling sedikit ada satu  
 $\alpha_i \neq 0$

$$\begin{array}{ll}
 \text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow H_0 & : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_j = 0 \\
 & H_1 \quad : \text{paling sedikit ada satu} \\
 & \beta_j \neq 0 \\
 \text{Untuk taraf faktor C} \rightarrow H_0 & : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0 \\
 & H_1 \quad : \text{paling sedikit ada satu} \\
 & \tau_k \neq 0
 \end{array}$$

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta tidak ada interaksi antara faktor A dengan faktor B, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta adanya interaksi antara faktor A dengan faktor B. kegagalan menolak atau penolakan  $H_0$  berdasarkan pada nilai  $F_{hitung}$  yang dirumuskan:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} < \frac{MS_B}{MS_E}$$

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

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

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

Bila menggunakan perangkat lunak statistik, kegagalan menolak  $H_0$  dilakukan jika  $P_{value}$  lebih besar dari pada  $\alpha$  (taraf signifikansi). Kegagalan menolak  $H_0$  bisa juga dilakukan apabila nilai  $F_{hitung} < F_{tabel}$  (Park, 1996).

### 2.2.12 Analisis Regresi

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

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \dots\dots\dots$$

dengan:

$Y$  = Variabel respon

$\beta_0$  = Intersep

$\beta_i$  = Koefisien parameter model

$X_i$  = Nilai koding variabel bebas

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

Untuk taksiran orde pertama adalah :

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

dengan:

$\hat{Y}$  = Nilai taksiran

$b_0$  = Konstanta

$b_i$  = Taksiran parameter

$X_i$  = Variabel bebas

Persamaan untuk model orde kedua ditunjukkan oleh persamaan berikut:

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

Pendugaan untuk model orde kedua dinyatakan dalam persamaan berikut:

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

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

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \dots\dots\dots$$

Untuk dapat mengestimasi kontribusi pengaruh dari setiap faktor pada respon sehingga akurasi model yang digunakan dapat ditentukan dapat digunakan analisa varians (ANAVA) yang merupakan teknik perhitungan secara kuantitatif. Beberapa pengujian model statistik yang lazim digunakan adalah sebagai berikut:

#### 1. Pengujian Kesesuaian Model

Pengujian model pada penelitian ini menggunakan pengujian koefisien determinasi ( $R^2$ ). Koefisien determinasi ( $R^2$ ) adalah suatu nilai statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah ada hubungan pengaruh antara dua variabel (variabel X dan Y). Nilai koefisien determinasi menunjukkan prosentase total variasi nilai variabel dependen (Y) yang dapat dijelaskan oleh persamaan regresi yang dihasilkan. Koefisien determinasi nilainya terletak antara  $0 < R^2 < 1$ . Semakin besar nilai  $R^2$ , maka semakin besar pula

pengaruh semua variabel X terhadap variabel Y. Misalnya  $R^2$  dari hasil perhitungan adalah 0.87 atau 87% maka berarti total variasi nilai Y yang dapat dijelaskan oleh model persamaan regresi adalah 87% dan sisanya yaitu 13% adalah variasi nilai variabel Y yang dipengaruhi oleh variabel lain yang berada diluar model.

## 2. Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian koefisien regresi dapat dilakukan secara serentak dan individu.

### a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Pengujian parameter secara individu digunakan untuk mengetahui seberapa besar sumbangan tiap-tiap parameter variabel bebas terhadap terjadinya perubahan pada variabel respon  $Y$  dalam model. Hipotesisnya adalah:

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

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

sedangkan  $s(b_i)$  dirumuskan dengan:

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

Penolakan hipotesis dilakukan jika  $|t_{hit}| > t_{n-k-1; \alpha/2}$ .

### b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

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

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

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \beta_j \text{ yang tidak sama dengan nol; } j = 1, 2, \dots, k$$

Statistik uji yang digunakan:

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

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

### 2.2.13 Uji Asumsi Residual

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

#### 1. Uji independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan *plot auto correlation function* (ACF).

#### 2. Uji identik

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

## 3. Uji kenormalan

*Normal probability plot* pada *software* Minitab menyatakan probabilitas dari residual suatu respon. Selain itu, dengan *Kolmogorov-Smirnov normality test* juga dapat digunakan dalam pengujian kenormalan residual.

Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

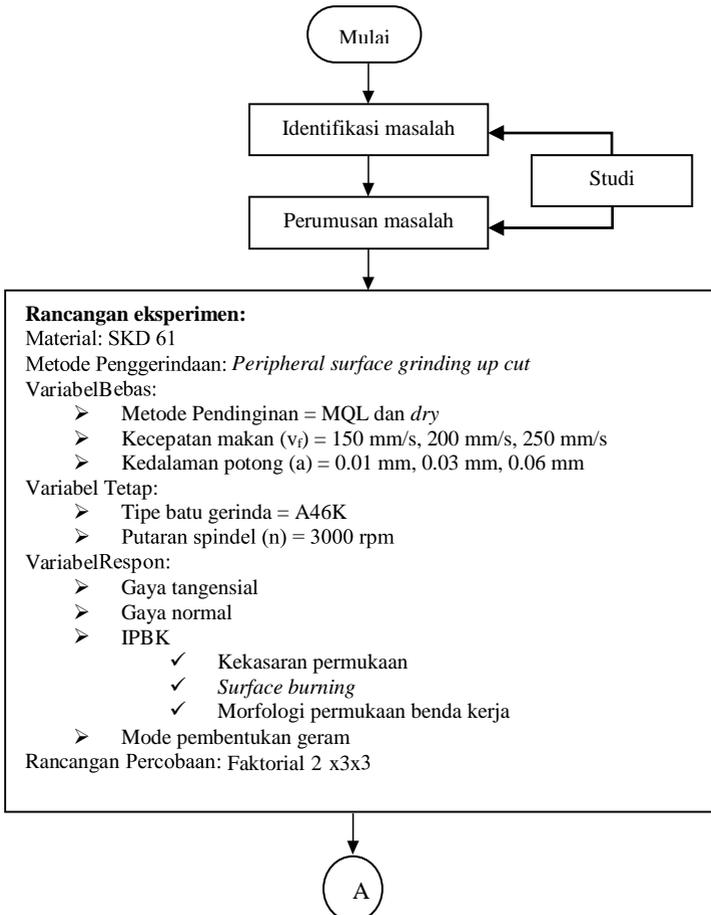
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

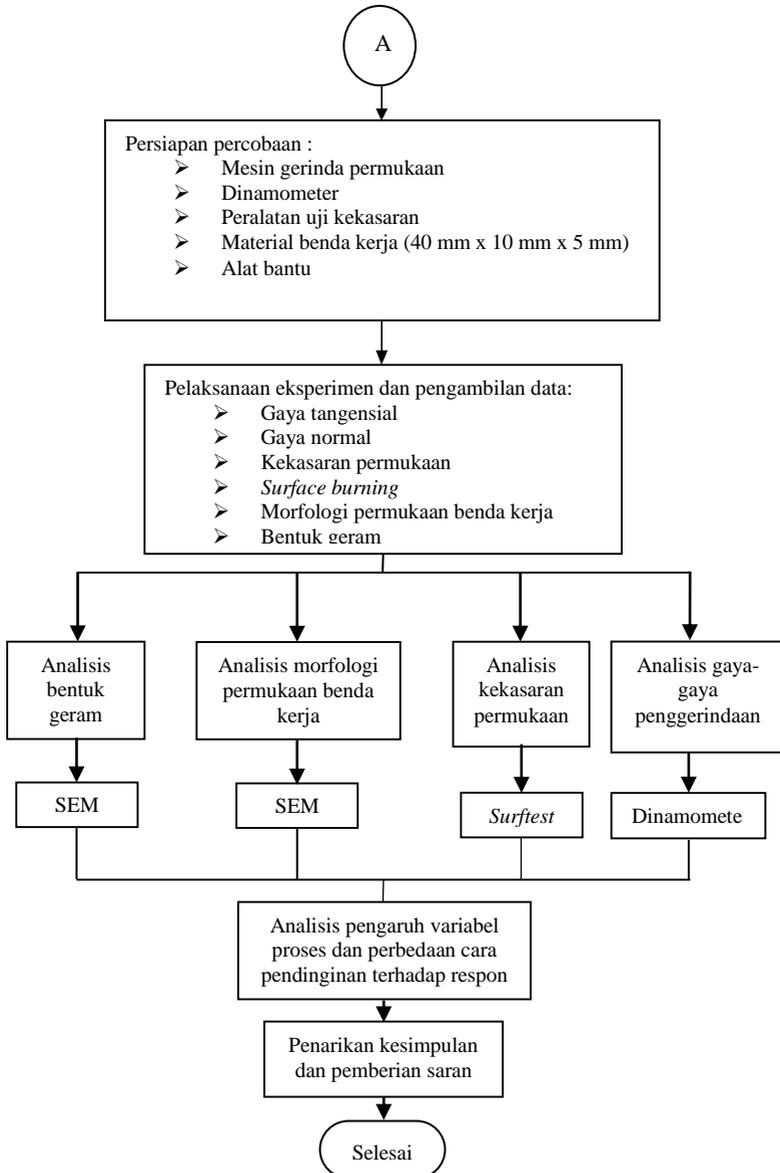
## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian yang akan dilaksanakan mengikuti tahapan-tahapan dari diagram alir pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian (lanjutan)

### 3.2 Variabel-Variabel dalam Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari hasil eksperimen. Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah suatu variabel proses yang besarnya dapat dikendalikan/ditentukan berdasarkan pertimbangan tertentu. Variabel bebas yang digunakan adalah:

1. Metode pendinginan (MQL dan dry).
2. Kecepatan makan (150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s).
3. Kedalaman potong (0.01 mm, 0.03 mm, 0.06mm).

#### 3.2.2 Variabel Respon

Variabel Respon adalah suatu variabel yang besarnya tidak dapat dikendalikan. Nilai dari variabel respon diketahui setelah melakukan percobaan. Variabel respon yang digunakan adalah:

1. Gaya tangensial.  
Gayatangensial ( $F_y$ ) diukur dengan menggunakan dinamometer yang dipasang pada mesin gerinda permukaan.
2. Gaya normal.  
Gayanormal ( $F_z$ ) diukur dengan menggunakan dinamometer yang dipasang pada mesin gerinda permukaan.
3. Integritas permukaan benda kerja (IPBK).  
Analisa IPBK meliputi kekasaran permukaan benda kerja, *surface burning* dan morfologi permukaan benda kerja.
4. Mode pembentukan geram.  
Mengamati bentuk-bentuk geram seperti *lamellar*, *leafy*, *irregular* dan *spherical* dengan menggunakan SEM.

### 3.2.3 Variabel Konstan

Variabel konstan adalah suatu variabel yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai dari variabel ini dijaga agar tidak berubah selama percobaan. Variabel konstan yang digunakan adalah:

1. Tipe abrasif (A46K).
2. Putaran batu gerinda (3000 rpm).

## 3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Proses Manufaktur Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan menggunakan alat dan bahan penelitian sebagai berikut:

### 3.3.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

#### 1. Mesin Gerinda Permukaan

Mesin gerinda yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin gerinda permukaan model KGS818AH yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Spesifikasi mesin gerinda permukaan yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut:

Jenis mesin	: Gerinda Permukaan
Model	: KGS818AH
Dimensi meja kerja	: 200 mm x 460 mm
Kecepatan putaran	: 3000 rpm



Gambar 3.2 Mesin gerinda permukaan model KGS818AH

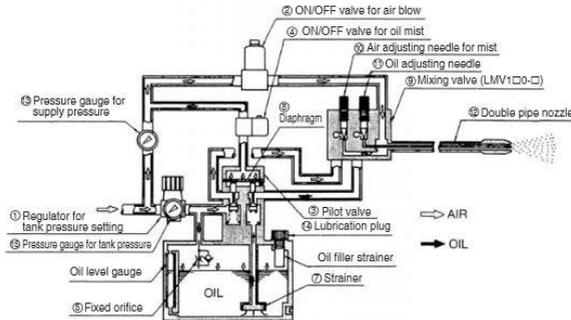
## 2. Unit MQL

Unit MQL yang digunakan sebagai penyalur *lubricant* dalam bentuk aerosol adalah SMC *mist spray unit* LMU 100-15. Kapasitas yang dimilikinya adalah sebesar  $3000 \text{ cm}^3$  dan *inlet pressure* hingga sebesar 10 bar. Unit MQL ditunjukkan pada gambar 3.3 dan skema sistem kerja unit MQL ditunjukkan pada gambar 3.4. Spesifikasi unit MQL bisa dilihat pada Lampiran 1.



LMU100

Gambar 3.3 Unit MQL



Gambar 3.4 Skema sistem kerja unit MQL

### 3. Dinamometer

Pada penelitian ini menggunakan dinamometer Kistler 9272 yang memiliki sensor *piezoelectric*. Gaya yang diukur pada proses gerinda dengan menggunakan alat ini adalah gaya normal ( $F_z$ ) dan gaya tangensial ( $F_y$ ). Dinamometer Kistler 9272 ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Dinamometer Kistler 9272

### 4. Data Acquisition System (DAQ)

Sistem akuisisi digunakan untuk memperbesar sinyal. Pada penelitian ini digunakan sistem akuisisi DAQ Kistler 5697A yang memiliki 8 *channel output* resolusi tinggi dan maksimal frekuensi 125kS/s. Alat ini terhubung dengan perangkat lunak *Dyno Ware* pada

komputer menggunakan kabel USB. DAQ Kistler 567A ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 DAQ Kistler 567A

#### 5. *Charge Amplifier*

*Charge Amplifier* yang dipakai bertipe 5070A dengan 8 *channel input*. Alat ini digunakan untuk pengukuran gaya dengan dinamometer. *Charge Amplifier* 5070A ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Charge Amplifier* 5070A

#### 6. *Notebook*

Hasil dari pengukuran gaya ditampilkan pada *Notebook* yang sudah dilengkapi dengan perangkat lunak *Dyno Ware*. Ilustrasi *notebook* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Notebook*

7. Alat Ukur Kekasaran Permukaan

Penelitian ini menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo *Surftest* 301 dengan kecermatan  $0.01 \mu\text{m}$ . Mitutoyo *Surftest* 301 ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Mitutoyo *Surftest* 301

8. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Pada penelitian ini digunakan alat SEM EVO MA10. Alat ini mampu mengamati partikel dengan pembesaran sampai 150.000 kali dengan resolusi kedalaman 3-100 nanometer, sehingga bentuk geram pada benda kerja dapat diamati dan dianalisis dengan alat ini. SEM EVO MA10 ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Scanning Electron Microscope* (SEM) EVO MA10

## 9. Alat Bantu

Peralatan bantu yang digunakan adalah:

### a. Alat Bantu Cekam

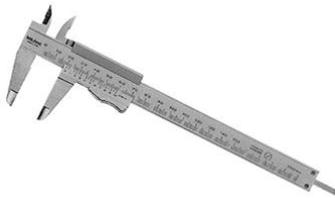
Benda kerja yang digunakan mempunyai dimensi yang relatif kecil. Pada proses gerinda, benda kerja harus dicekam dengan baik agar pengukuran gaya berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Alat bantu cekam ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Alat bantu cekam

b. Mistar Ingsut

Mistar ingsut digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja. Mistar ingsut yang digunakan mempunyai kecermatan 0.02 mm. Mistar ingsut ditunjukkan pada Gambar 3.12.



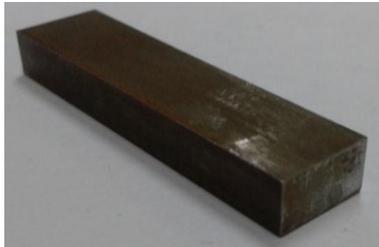
Gambar 3.12 Mistar ingsut

c. Meja Rata

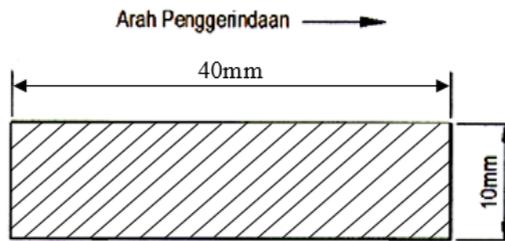
Meja rata digunakan untuk meletakkan spesimen pada saat mengukur kekasaran permukaan.

### 3.3.2 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan material SKD 61 dengan dimensi 40mm x 10mm x 5mm. Bentuk dan daerah penggerindaan dari spesimen benda kerja dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



Gambar 3.13 Bentuk spesimen benda kerja



Gambar 3.14 Daerah penggerindaan

### 3.4 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah percobaan penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen dengan dimensi 40 mm x 10 mm x 5 mm.
2. *Balancing* dan *dressing* batu gerinda.
3. Menyiapkan alat untuk mengukur gaya tangensial dan gaya normal pada proses gerinda dengan langkah-langkah sebagai berikut:

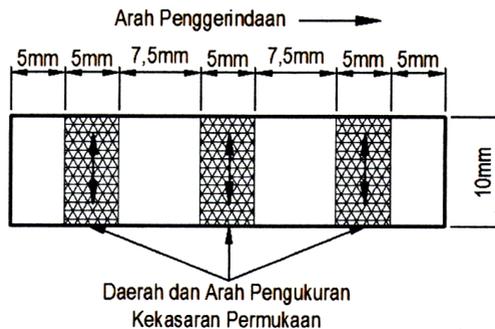
- a. Menyiapkan komputer yang sudah terpasang perangkat lunak *DynoWare*.
  - b. Memasang kabel USB dan kabel power pada DAQ.
  - c. Memasang kabel analog dan kabel power pada *charge amplifire*.
  - d. Menyalakan DAQ dan *charge amplifire* selama 30 menit untuk *warmingup*.
  - e. Memasukkan data sensitifitas pada DAQ.
  - f. Memasang dinamometer pada meja mesin gerinda tanpa menggunakan elektromagnet.
  - g. Memasang alat bantu cekam pada dinamometer.
  - h. Memasang spesimen pada alat bantu cekam.
4. Menghidupkan mesin gerinda.
  5. Mengatur mesin gerinda dengan variabel-variabel yang sudah ditetapkan.
  6. Memulai proses gerinda sebanyak 5 siklus dengan metode *peripheral surface grinding up cut*.
  7. Mengukur gaya tangensial ( $F_y$ ) dan gaya normal ( $F_z$ ) selama proses penggerindaan.
  8. Mengumpulkan geram hasil percobaan setiap pergantian variabel proses.
  9. Melepaskan dan mengeringkan spesimen setelah proses selesai.
  10. Melakukan *dressing* pada batu gerinda setiap penggantian spesimen.
  11. Mengukur kekasaran permukaan menggunakan *surfaceroughnesstester*.
  12. Mengamati *surface burning* yang terbentuk pada permukaan benda kerja hasil proses gerinda.
  13. Menyiapkan SEM.
  14. Menempatkan benda kerja hasil proses gerinda permukaan pada meja SEM.
  15. Mengamati dan mengambil gambar morfologi permukaan benda kerja dengan kombinasi variabel proses tertentu.

16. Menempatkan geram hasil proses gerinda permukaan pada meja SEM.
17. Mengamati dan mengambil gambar geram dengan kombinasi variabel proses tertentu.
18. Melakukan analisis data.

### 3.5 Pengukuran dan Pengambilan Data

#### 3.5.1 Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan benda kerja dengan cara mengukur secara tegak lurus terhadap arah penggerindaan. Untuk setiap spesimen, pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada posisi awal, tengah dan akhir proses penggerindaan. Gambar 3.15 menunjukkan skema pengukuran kekasaran permukaan.



Gambar 3.15 Skema pengukuran kekasaran permukaan

#### 3.5.2 Pengamatan *Surface Burning*

*Surface burning* adalah salah satu fenomena yang terjadi pada proses gerinda permukaan. Permukaan benda kerja yang mengalami *surface burning* akan tampak hangus akibat kenaikan temperatur yang sangat tinggi. Pengamatan *surface burning* pada penelitian ini dilakukan dengan cara *visual check*. Benda kerja hasil proses penggerindaan diletakkan diatas meja dengan penerangan yang cukup, kemudian diamati secara visual dan

dicatat muncul tidaknya fenomena *surface burning* beserta kualitas *surface burning*-nya.

### 3.5.3 Pengambilan Foto Bentuk Geram

Pada proses penggerindaan, bentuk geram dipengaruhi oleh variabel-variabel proses. Geram hasil percobaan dimasukkan kedalam cawan dan dikeringkan. Setiap geram yang dihasilkan oleh variabel bebas dimasukkan pada cawan yang berbeda-beda. Geram dibersihkan dari debu batu gerinda dengan cara menggosokkan magnet pada geram. Setelah semua selesai dibersihkan, geram diamati dengan SEM.

## 3.6 Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan faktorial. Ada tiga faktor yang digunakan dalam penelitian ini. Satu faktor mempunyai dua level dan dua faktor yang lainnya masing-masing mempunyai tiga level. Susunan seperti itu bisa juga disebut desain faktorial  $2 \times 3 \times 3$ . Respon yang diteliti dalam penelitian ini adalah gayatangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Replikasi dilakukan sebanyak dua kali pada pengukuran gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Rancangan percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rancangan percobaan

Variabel Proses			Variabel Respon					
Metode pendinginan	Kecepatan makan (mm/s)	Kedalaman potong (mm)	Gaya Tangensial ( $F_y$ ) (N)		Gaya normal ( $F_z$ ) (N)		Kekasaran permukaan ( $R_a$ ) ( $\mu\text{m}$ )	
			Rep.1	Rep.2	Rep.1	Rep.2	Rep.1	Rep.2
MQL	150	0.01						
		0.03						
		0.06						
	200	0.01						
		0.03						
		0.06						
	250	0.01						
		0.03						
		0.06						
		0.01						

Dry	150	0.03						
		0.06						
	200	0.01						
		0.03						
	250	0.06						
		0.01						
		0.03						
		0.06						

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **BAB 4**

### **ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Data Hasil Eksperimen**

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel-variabel proses mesin gerinda permukaan sesuai dengan rancangan eksperimen yang telah ditetapkan. Variabel-variabel proses tersebut meliputi metode pendinginan, kecepatan makan ( $v_f$ ) dan kedalaman potong ( $a$ ). Variabel-variabel proses tersebut diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram. Pengambilan data untuk gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan pada proses gerinda permukaan dilakukan replikasi sebanyak dua kali. Data yang diperoleh selama eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.1. Rincian data gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan dapat dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 4.1 Data hasil eksperimen proses gerinda permukaan

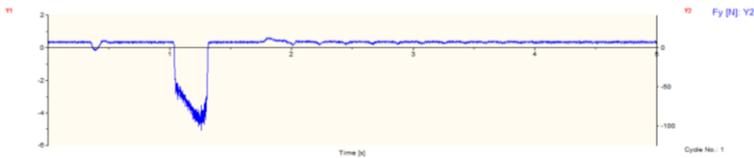
Variabel Proses			Variabel Respon					
Metode pendinginan	Kecepatan makan (mm/s)	Kedalaman potong (mm)	Gaya Tangensial ( $F_y$ ) (N)		Gaya Normal ( $F_z$ ) (N)		Kekasaran Permukaan ( $R_a$ ) ( $\mu\text{m}$ )	
			Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
Dry	150	0.01	32.72	33.66	61.00	61.71	0.39	0.37
		0.03	70.17	76.91	130.10	128.60	0.46	0.48
		0.06	109.11	111.52	238.70	236.00	0.52	0.54
	200	0.01	37.30	38.14	78.85	75.34	0.42	0.49
		0.03	85.25	89.16	155.60	151.10	0.48	0.52
		0.06	121.71	125.39	269.50	265.10	0.55	0.57
	250	0.01	49.62	46.38	92.26	89.71	0.48	0.56
		0.03	98.70	92.67	191.60	196.90	0.62	0.64
		0.06	135.12	138.14	295.20	298.80	0.79	0.72
MQL	150	0.01	16.42	15.18	47.65	43.93	0.56	0.53
		0.03	59.65	56.48	115.70	114.40	0.58	0.55
		0.06	103.14	102.15	203.30	205.60	0.77	0.76
	200	0.01	22.70	20.29	62.23	61.48	0.59	0.57
		0.03	68.30	65.51	130.30	132.50	0.64	0.61
		0.06	105.85	109.12	229.90	231.80	0.96	0.83
	250	0.01	31.12	34.25	78.88	75.07	0.65	0.66
		0.03	75.10	72.35	150.50	152.30	0.72	0.84
		0.06	124.24	126.41	253.70	257.30	1.12	1.24

Sumber: Hasil pengukuran

## 4.2 Analisis Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial

### 4.2.1 Analisis Variabel Proses Terhadap Gaya Tangensial

Pengukuran gaya tangensial pada proses gerinda permukaan dilakukan dengan menggunakan dinamometer dan dilakukan replikasi sebanyak dua kali. Gaya tangensial yang diukur oleh dinamometer pada proses gerinda permukaan adalah gaya yang searah sumbu Y. Contoh hasil pengukuran gaya tangensial ditunjukkan pada Gambar 4.1 untuk gaya yang searah sumbu Y ( $F_y$ ). Gambar grafik hasil pengukuran gaya tangensial secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 3.



Gambar 4.1 Gaya tangensial searah sumbu Y ( $F_y$ ) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan dry, kecepatan makan 200 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.

Besar gaya tangensial yang terjadi selama poses gerinda permukaan selalu berubah setiap saat karena pengaruh dari variabel-variabel proses yang digunakan. Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses mana yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap gaya tangensial. Hasil dari analisis variansi (ANOVA) untuk gaya tangensial ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Analisis variansi (ANOVA) variabel proses terhadap gaya tangensial.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Metode Pendinginan	1	2231.3	2231.3	183.83	0.000
Kecepatan Makan	2	2356.3	1178.2	97.06	0.000
Kedalaman Potong	2	44571.4	22285.7	1835.98	0.000
Error	30	364.1	12.1		
Total	35	49523.2			

Sumber: Hasil perhitungan

*P-value* menunjukkan variabel proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya tangensial. *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki

pengaruh yang signifikan terhadap respon. Dalam penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk gaya tangensial adalah:

1. Untuk variabel proses metode pendinginan.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses metode pendinginan terhadap gaya tangensial.
2. Untuk variabel proses kecepatan makan.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kecepatan makan terhadap gaya tangensial.
3. Untuk variabel proses kedalaman potong.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kedalaman potong terhadap gaya tangensial.

Berdasarkan *P-value*, maka diketahui ketiga variabel proses tersebut mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap gaya tangensial. Kesimpulan untuk masing-masing variabel proses terhadap gaya tangensial ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap gaya tangensial

Sumber Variasi	Kesimpulan
Metode Pendinginan	Berpengaruh
Kecepatan Makan	Berpengaruh
Kedalaman Potong	Berpengaruh

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk mengetahui variable-variabel proses yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap gaya tangensial, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.4 sampai dengan Tabel 4.6 menunjukkan hasil uji Tukey pada metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Rincian uji Tukey dari

variabel proses terhadap gaya tangensial ditunjukkan pada Lampiran 4.

Tabel 4.4 Hasil uji Tukey pada jenis pendinginan

Metode Pendinginan	N	Mean	Grouping
Dry	18	82.9	A
MQL	18	67.1	B

Tabel 4.5 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan

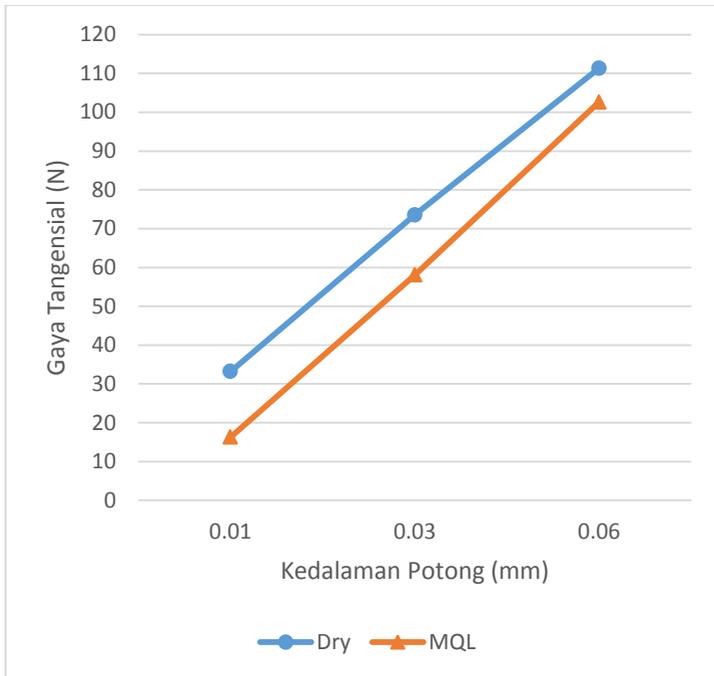
Kecepatan Makan (mm/s)	N	Mean	Grouping
250	12	85.3	A
200	12	74.1	B
150	12	65.6	C

Tabel 4.6 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong

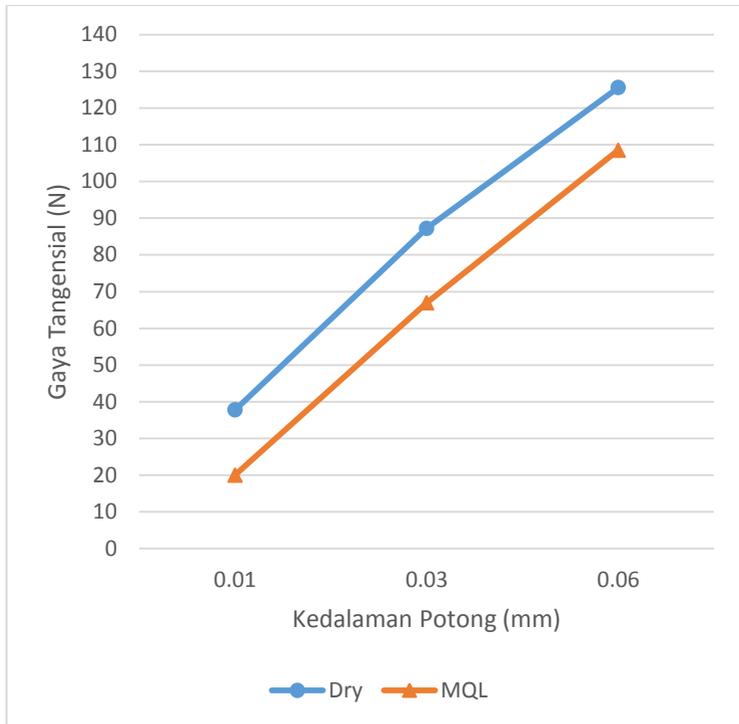
Kedalaman Potong (mm)	N	Mean	Grouping
0.06	12	117.7	A
0.03	12	75.9	B
0.01	12	31.5	C

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa gaya tangensial yang dihasilkan berbeda pada penelitian menggunakan metode pendinginan. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa pada ketiga level kecepatan makan menghasilkan gaya tangensial yang berbeda. Tabel 4.6 menunjukkan bahwa level kedalaman potong juga menghasilkan gaya tangensial yang berbeda.

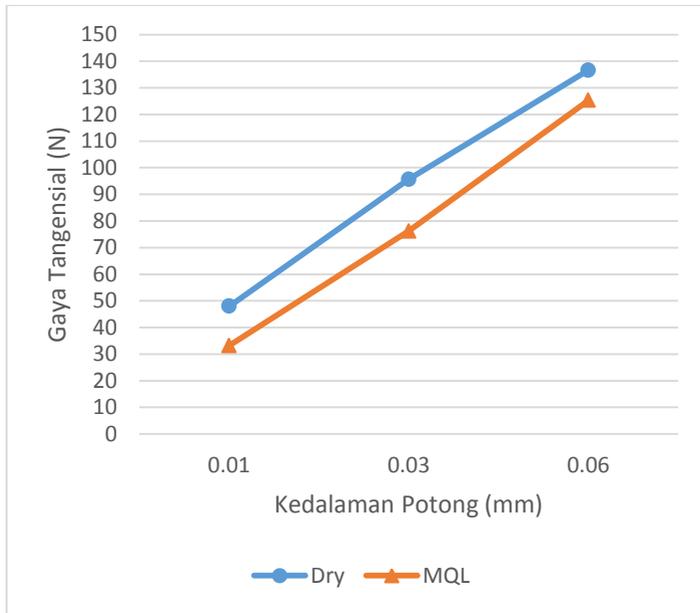
Hubungan antara kecepatan makan dan kedalaman potong dengan gaya tangensial pada proses gerinda permukaan dengan dua tipe metode pendinginan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4.2 sampai dengan Gambar 4.4.



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial pada kecepatan makan 150 mm/s



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial pada kecepatan makan 200 mm/s

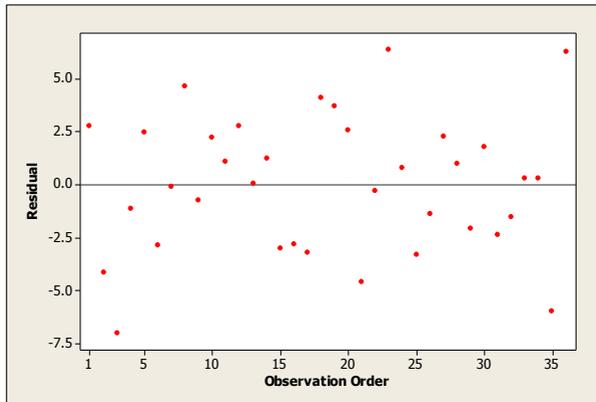


Gambar 4.4 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya tangensial pada kecepatan makan 250 mm/s

## 4.2.2 Pengujian Asumsi Residual Gaya Tangensial

### 4.2.2.1 Uji Identik

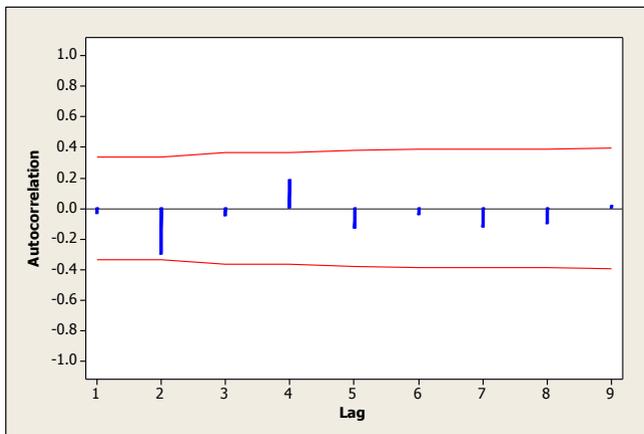
Gambar 4.5 menunjukkan tidak adanya pola tertentu yang mengidentifikasi bahwa asumsi identik tidak dipenuhi dan dapat diartikan bahwa residual memiliki penyebaran yang sama. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.5 Plot residual gaya tangensial versus order

#### 4.2.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.6 Plot ACF pada respon gaya tangensial

#### 4.2.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

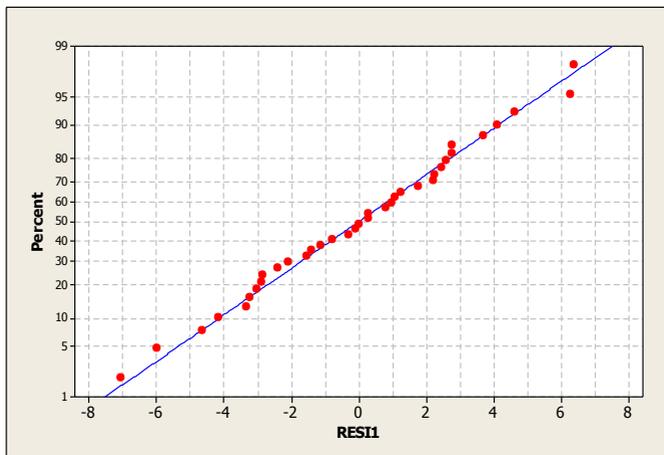
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

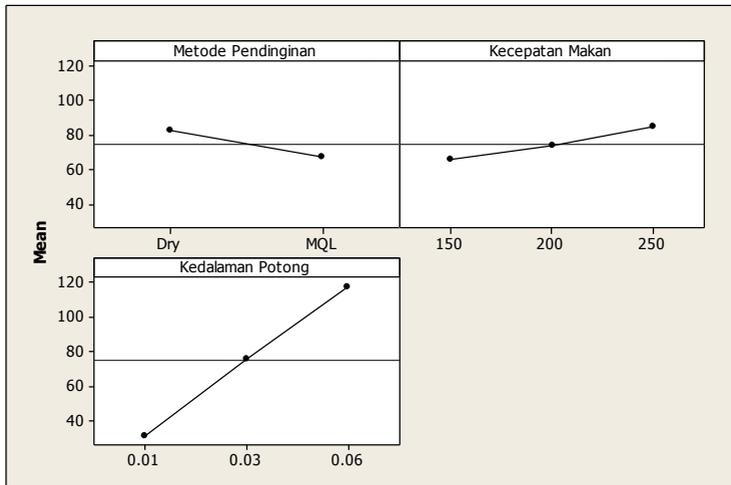
- *P-value* bernilai  $> 0.150$  yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $-3.94746 \times 10^{-15}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar  $0.060^2 = 0.0036$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.0036) telah terpenuhi.



Gambar 4.7 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial

Secara grafik, hubungan antara variabel-variabel proses pada proses gerinda permukaan terhadap respon gaya tangensial ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik pengaruh jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya tangensial

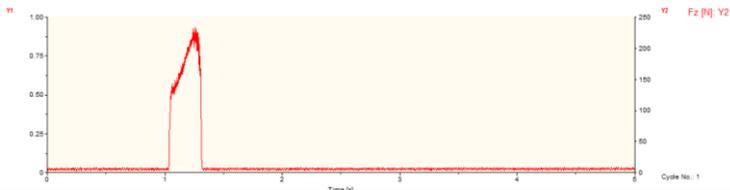
Gambar 4.8 menunjukkan bahwa penggunaan MQL pada proses gerinda menghasilkan gaya tangensial yang lebih kecil, serta peningkatan kecepatan makan dan kedalaman potong akan menghasilkan gaya tangensial yang lebih besar.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa variabel proses metode pendinginan mempengaruhi gaya tangensial. Penggunaan MQL dapat menurunkan gaya yang terjadi pada saat proses penggerindaan. Hal ini disebabkan butiran-butiran abrasif *slip* pada saat benda kerja dan batu gerinda saling bergesekan karena adanya lubrikasi dari *cutting fluid* di sekitar daerah penggerindaan.

Variabel proses kedalaman potong mempengaruhi gaya tangensial. Kedalaman potong yang besar menyebabkan bidang geser bertambah lebar, sehingga gaya tangensial menjadi semakin besar. Kedalaman potong yang besar juga menyebabkan temperatur daerah penggerindaan naik. Kenaikan temperatur daerah penggerindaan berpengaruh pada ketajaman butiran abrasif. Jika temperatur tinggi maka adhesi geram pada butiran abrasif akan mudah terjadi. Hal ini menyebabkan mata potong butiran abrasif menjadi tumpul, sehingga gaya tangensial meningkat. Selain kenaikan temperatur, kedalaman potong yang tinggi menyebabkan pematihan butiran abrasif pada roda gerinda. Pada kondisi ini aksi dari butiran abrasif akan didominasi oleh proses *plowing* dan *rubbing*, sehingga mengakibatkan gaya tangensial bertambah besar.

#### 4.2.3 Analisis Variabel Proses Terhadap Gaya Normal

Pengukuran gaya normal pada proses gerinda permukaan dilakukan dengan menggunakan dinamometer dan dilakukan replikasi sebanyak dua kali. Gaya normal yang diukur oleh dinamometer pada proses gerinda permukaan adalah gaya yang searah sumbu Z. Contoh hasil pengukuran gaya tangensial ditunjukkan pada Gambar 4.9 untuk gaya yang searah sumbu Z ( $F_z$ ). Gambar grafik hasil pengukuran gaya normal secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 3.



Gambar 4.9 Gaya normal ( $F_z$ ) yang terjadi pada proses gerinda permukaan dengan metode pendinginan *dry*, kecepatan makan 200 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.

Besar gaya normal yang terjadi selama poses gerinda permukaan selalu berubah setiap saat karena pengaruh dari variabel-variabel proses yang digunakan. Analisis variansi (ANAVA) digunakan untuk mengetahui variabel proses mana yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap gaya tangensial. Hasil dari analisis variansi (ANAVA) untuk gaya normal ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap gaya normal.

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>
Metode Pendinginan	1	6124	6124	89.69	0.000
Kecepatan Makan	2	12414	6207	90.91	0.000
Kedalaman Potong	2	195190	97595	1429.36	0.000
<i>Error</i>	30	2048	68		
Total	35	215776			

Sumber: Hasil perhitungan

*P-value* menunjukkan variabel proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap gaya normal. *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Dalam penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk gaya normal adalah:

1. Untuk variabel proses metode pendinginan.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses metode pendinginan terhadap gaya normal.
2. Untuk variabel proses kecepatan makan.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kecepatan makan terhadap gaya normal.

3. Untuk variabel proses kedalaman potong.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kedalaman potong terhadap gaya normal.

Berdasarkan  $P\text{-value}$ , maka diketahui ketiga variabel proses tersebut mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap gaya normal. Kesimpulan untuk masing-masing variabel proses terhadap gaya normal ditunjukkan pada Tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4.8 Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap gaya normal

Sumber Variasi	Kesimpulan
Metode Pendinginan	Berpengaruh
Kecepatan Makan	Berpengaruh
Kedalaman Potong	Berpengaruh

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk mengetahui variable-variabel proses yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap gaya normal, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.9 sampai dengan Tabel 4.11 menunjukkan hasil uji Tukey pada metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Rincian uji Tukey dari variabel proses terhadap gaya normal ditunjukkan pada Lampiran 4.

Tabel 4.9 Hasil uji Tukey pada jenis pendinginan

Metode Pendinginan	N	Mean	Grouping
Dry	18	167.6	A
MLQ	18	141.5	B

Tabel 4.10 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan

Kecepatan Makan (mm/s)	N	Mean	Grouping
250	12	177.7	A

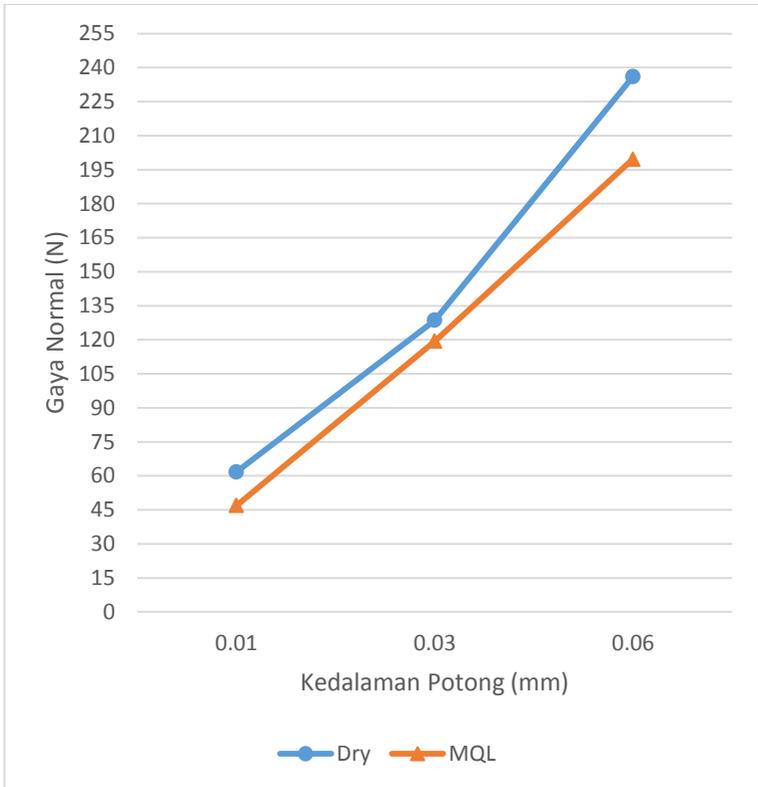
200	12	153.6	B
150	12	132.2	C

Tabel 4.11 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong

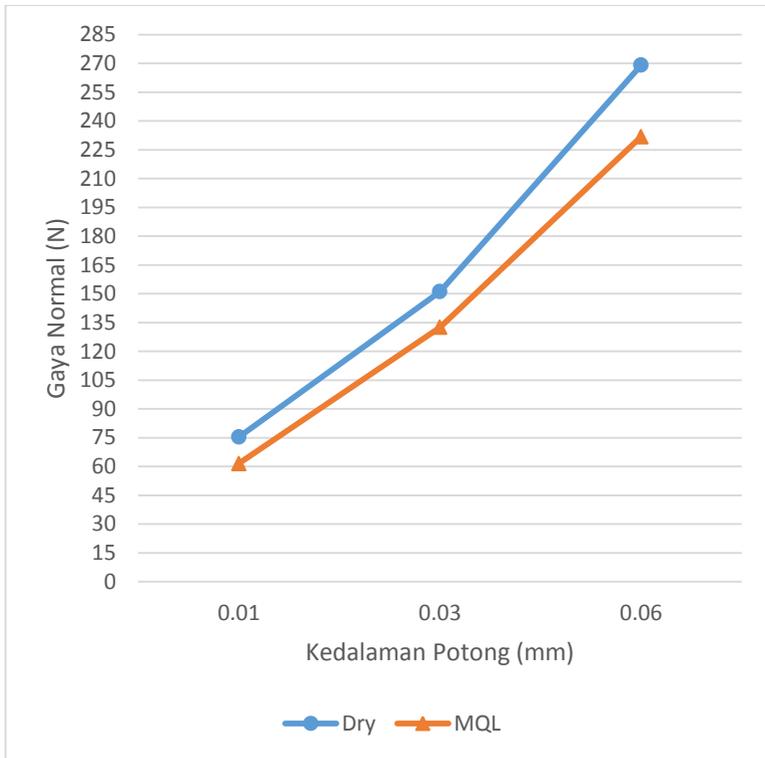
Kedalaman Potong (mm)	N	Mean	Grouping
0.06	12	248.7	A
0.03	12	145.8	B
0.01	12	69.0	C

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.9 menunjukkan bahwa gaya normal yang dihasilkan berbeda pada penelitian menggunakan metode pendinginan. Tabel 4.10 menunjukkan bahwa pada ketiga level kecepatan makan menghasilkan gaya tangensial yang berbeda. Tabel 4.11 menunjukkan bahwa level kedalaman potong juga menghasilkan gaya normal yang berbeda.

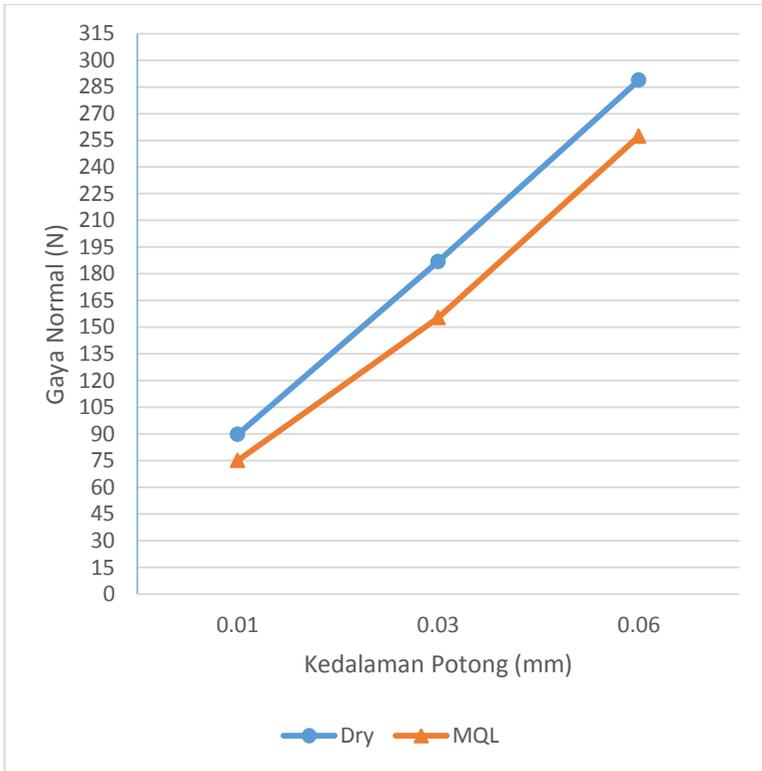
Hubungan antara metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya normal dapat juga ditunjukkan oleh histogram pada Gambar 4.10 sampai dengan Gambar 4.13.



Gambar 4.10 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal pada kecepatan makan 150 mm/s



Gambar 4.11 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal pada kecepatan makan 200 mm/s

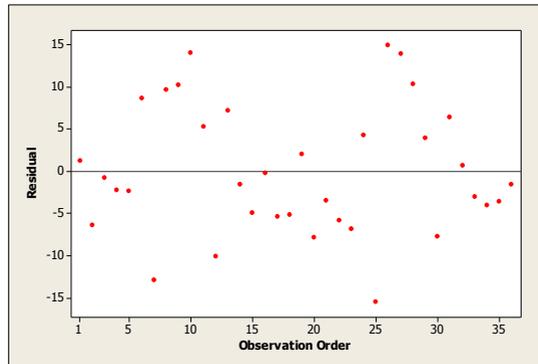


Gambar 4.12 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan gaya normal pada kecepatan makan 250 mm/s

#### 4.2.4 Pengujian Asumsi Residual Gaya Normal

##### 4.2.4.1 Uji Identik

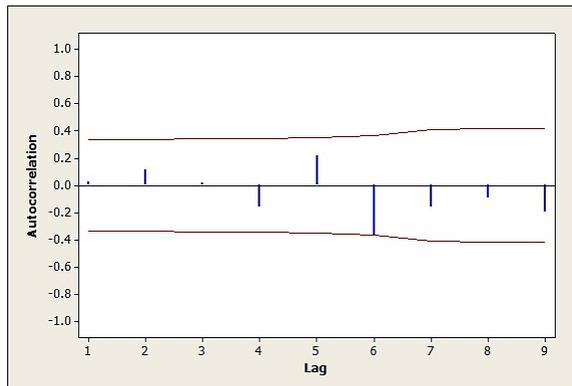
Gambar 4.13 menunjukkan tidak adanya pola tertentu yang mengidentifikasi bahwa asumsi identik tidak dipenuhi dan dapat diartikan bahwa residual memiliki penyebaran yang sama. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.13 Plot residual gaya normal versus order

#### 4.2.4.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.14 Plot ACF pada respon gaya normal

#### 4.2.4.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

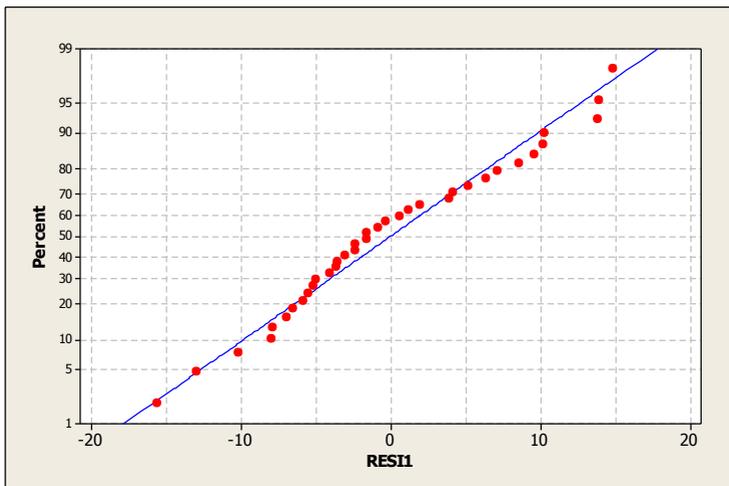
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

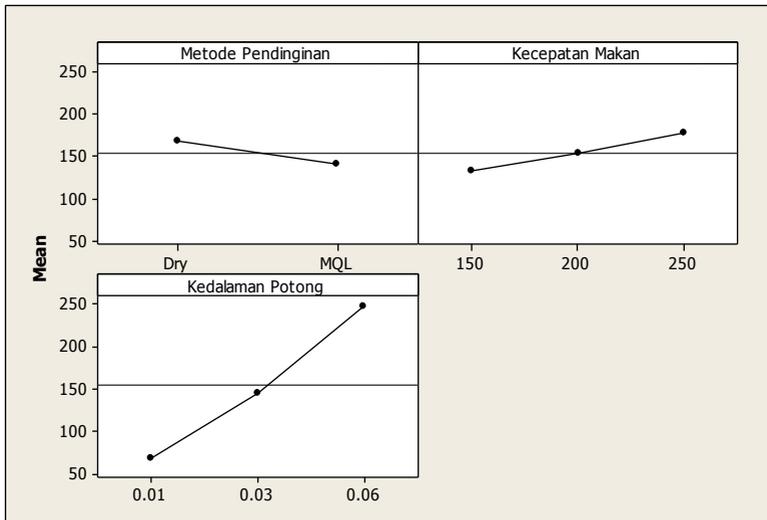
- *P-value* bernilai  $>0.150$  yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $-5.92119 \times 10^{-16}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar  $0.109^2 = 0.011881$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.011881) telah terpenuhi.



Gambar 4.15 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal

Secara grafik, hubungan antara variabel-variabel proses pada proses gerinda permukaan terhadap respon gaya normal ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik pengaruh jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap gaya normal

Gambar 4.16 menunjukkan bahwa penggunaan MQL pada proses gerinda menghasilkan gaya normal yang lebih kecil, serta peningkatan kecepatan makan dan kedalaman potong akan menghasilkan gaya normal yang lebih besar.

### 4.3 Analisis Variabel Proses Terhadap Kekasaran Permukaan

Pengambilan data kekasaran permukaan benda kerja dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali. Pengukuran kekasaran tiap spesimen dilakukan di tiga tempat, yaitu pada

posisi awal, tengah dan akhir dari pemakanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.15. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap tempatnya.

Analisis variansi (ANAVA) digunakan untuk mengetahui variabel-variabel proses mana yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap kekasaran permukaan. Hasil dari analisis variansi (ANAVA) untuk kekasaran permukaan ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Analisis variansi (ANAVA) variabel proses terhadap kekasaran permukaan.

<i>Source</i>	DF	SS	MS	F	<i>P-value</i>
Metode Pendinginan	1	0.35358	0.35358	58.54	0.000
Kecepatan Makan	2	0.28550	0.14275	23.63	0.000
Kedalaman Potong	2	0.43448	0.21724	35.97	0.000
<i>Error</i>	30	0.18121	0.00604		
Total	35	1.25477			

Sumber: Hasil perhitungan

*P-value* menunjukkan variabel proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Pada penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk kekasaran permukaan adalah:

1. Untuk variabel proses metode pendinginan.  
 $P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses metode pendinginan terhadap kekasaran permukaan.
2. Untuk variabel proses kecepatan makan.

$P\text{-value} = 0.001 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kecepatan makan terhadap kekasaran permukaan.

3. Untuk variabel proses kedalaman potong.

$P\text{-value} = 0.000 < \alpha = 0.05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh variabel proses kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan.

Berdasarkan  $P\text{-value}$ , maka diketahui ketiga variabel proses tersebut mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap kekasaran permukaan. Kesimpulan untuk masing-masing variabel proses terhadap kekasaran permukaan ditunjukkan pada Tabel 4.13 sebagai berikut:

Tabel 4.13 Kesimpulan pengaruh variabel proses terhadap kekasaran permukaan

Sumber Variasi	Kesimpulan
Metode Pendinginan	Berpengaruh
Kecepatan Makan	Berpengaruh
Kedalaman Potong	Berpengaruh

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk mengetahui level dari variable-variabel proses yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kekasaran permukaan, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.14 sampai dengan Tabel 4.16 menunjukkan hasil uji Tukey pada metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong. Rincian uji Tukey dari variabel-variabel proses terhadap kekasaran permukaan ditunjukkan pada Lampiran 5.

Tabel 4.14 Hasil uji Tukey pada jenis pendinginan

Metode Pendinginan	N	Mean	Grouping
Dry	18	0.7	A
MQL	18	0.5	B

Tabel 4.15 Hasil uji Tukey pada kecepatan makan

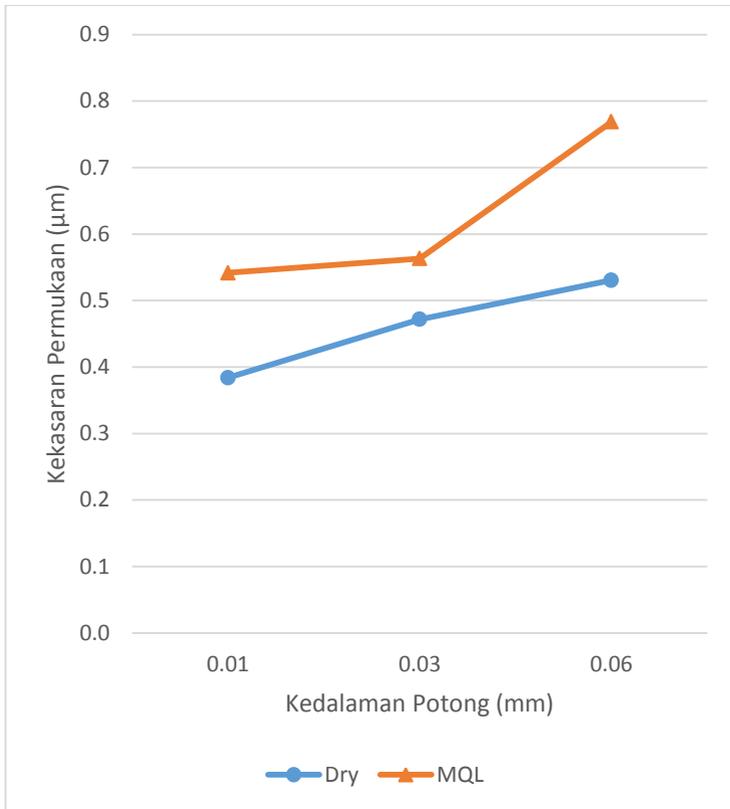
Kecepatan Makan (mm/s)	N	Mean	Grouping
250	12	0.8	A
200	12	0.6	B
150	12	0.5	B

Tabel 4.16 Hasil uji Tukey pada kedalaman potong

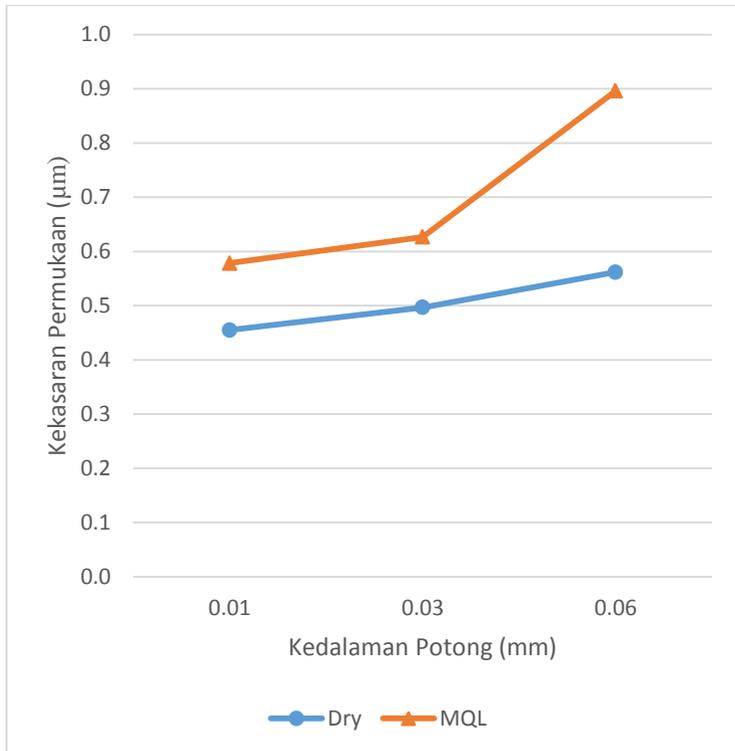
Kedalaman Potong (mm)	N	Mean	Grouping
0.06	12	0.8	A
0.03	12	0.6	B
0.01	12	0.5	B

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.14 menunjukkan bahwa kedua metode pendinginan menghasilkan kekasaran permukaan yang berbeda. Tabel 4.15 menunjukkan bahwa pada kecepatan makan 250 mm/s menghasilkan kekasaran permukaan yang berbeda dengan kekasaran permukaan yang dihasilkan pada kecepatan makan 200 mm/s dan 150 mm/s. Tabel 4.15 juga menunjukkan hasil kekasaran permukaan yang sama pada kecepatan makan 200 mm/s dengan 150 mm/s. Tabel 4.16 menunjukkan bahwa pada kedalaman potong 0.06 mm menghasilkan kekasaran permukaan yang berbeda dengan kekasaran permukaan yang dihasilkan pada kedalaman potong 0.03 mm dan 0.01 mm. Tabel 4.16 juga menunjukkan hasil kekasaran permukaan yang sama pada kedalaman potong 0.03 mm dengan 0.01 mm.

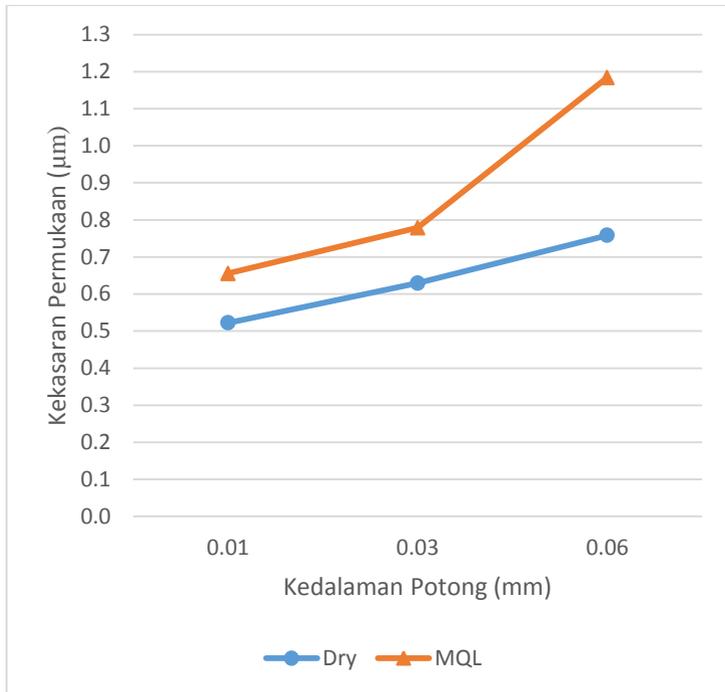
Hubungan antara metode pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan dapat juga ditunjukkan oleh histogram pada Gambar 4.17 sampai dengan Gambar 4.19.



Gambar 4.17 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan pada kecepatan makan 150 mm/s



Gambar 4.18 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan pada kecepatan makan 200 mm/s

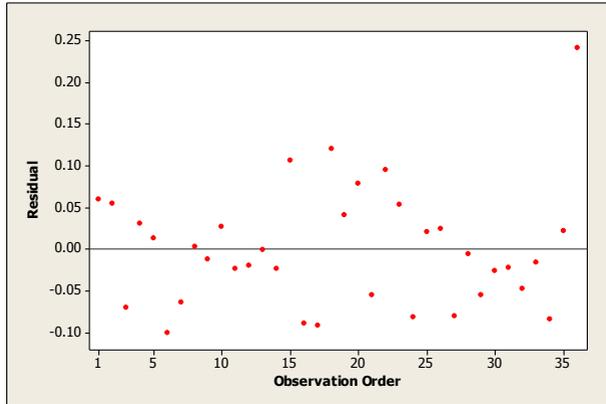


Gambar 4.19 Grafik hubungan antara kedalaman potong dengan kekasaran permukaan pada kecepatan makan 250 mm/s

#### 4.3.1 Pengujian Asumsi Residual Kekasaran Permukaan

##### 4.3.1.1 Uji *Identik*

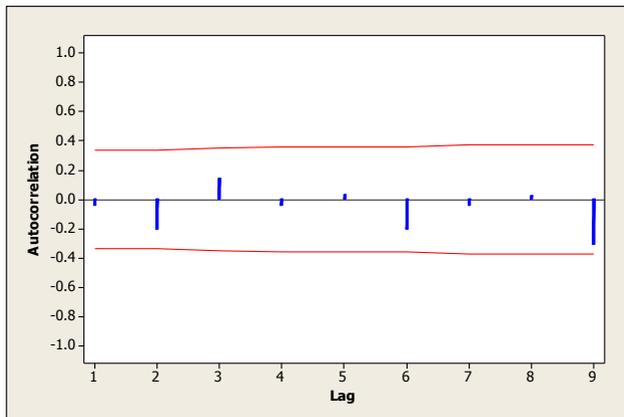
Gambar 4.20 menunjukkan bahwa residual terbesar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.20 Plot residual kekasaran permukaan *versus* order

#### 4.3.1.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan auto correlation function (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.21, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.21 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan

#### 4.3.1.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

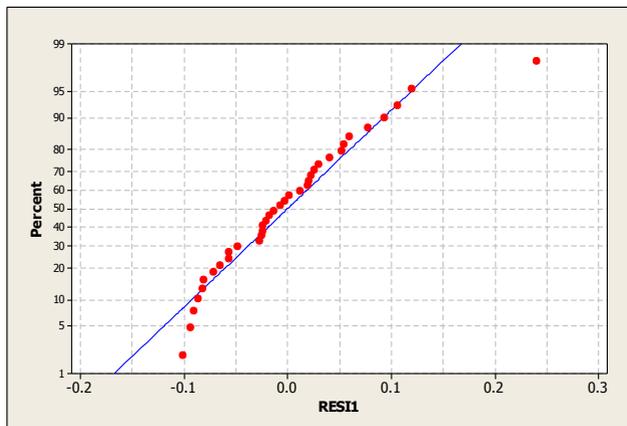
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

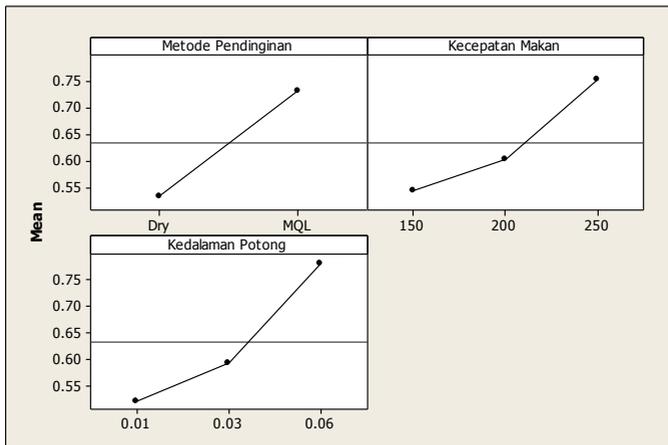
- *P-value* bernilai  $>0.150$  yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $1.233581 \times 10^{-17}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansidi residual adalah sebesar  $0.085^2 = 0.007225$ .

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.007225) telah terpenuhi.



Gambar 4.22 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan

Secara grafik, hubungan antara variabel jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong pada proses gerinda permukaan terhadap respon kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik pengaruh jenis pendinginan, kecepatan makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa penggunaan MQL pada proses gerinda akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi, serta peningkatan kecepatan makan dan kedalaman potong akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi.

Hasil analisis data eksperimen, secara statistik menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman potong, maka kekasaran permukaan benda kerja akan naik. Kedalaman potong yang kecil membuat butiran abrasif pada permukaan batu gerinda sedikit bergesekan dengan benda kerja. Gesekan yang sedikit ini

menyebabkan permukaan hasil penggerindaan mempunyai celah yang sempit, sehingga kekasaran permukaan benda kerja juga rendah. Akan tetapi, dengan kedalaman potong yang besar, maka butiran abrasif yang terdapat di permukaan roda gerinda akan lebih banyak bergesekan dengan benda kerja, sehingga menyebabkan permukaan hasil penggerindaan mempunyai celah yang lebar. Hal ini menyebabkan kekasaran permukaan semakin tinggi.

MQL bersifat sebagai pelumas, sehingga penggunaan MQL pada proses gerinda menimbulkan efek *slipping*. Efek yang ditimbulkan tersebut mengakibatkan beberapa butiran serbuk abrasif dari batu gerinda yang seharusnya memotong benda kerja menjadi tidak bisa memotong. Hal ini mengakibatkan kekasaran permukaan pada benda kerja menjadi lebih meningkat.

#### 4.4 Pemodelan Matematis Untuk Gaya Tangensial

Hasil regresi untuk gaya tangensial dengan menggunakan Minitab dapat dilihat pada tabel 4.17 dan 4.18 sebagai berikut:

Tabel 4.17 Hasil ANAVA untuk gaya tangensial

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1.60140	0.80070	260.70	0.000
Residual Error	15	0.04607	0.00307		
Total	17	1.64747			

Tabel 4.18 Koefisien regresi untuk model gaya tangensial

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.4493	0.3361	4.31	0.001
Kecepatan Makan	0.7514	0.1438	5.22	0.000
Kedalaman Potong	0.90631	0.04077	22.23	0.000
S = 0.0554196 R-Sq = 97.2% R-Sq(adj) = 96.8%				

#### 4.4.1 Uji Regresi

##### 4.4.1.1 Uji Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari gaya tangensial adalah sebagai berikut:

$H_0$ : Semua  $\beta_1$  tidak mempunyai pengaruh terhadap gaya tangensial.

$H_1$ : Paling tidak ada satu dari  $\beta_1$  mempunyai pengaruh terhadap gaya tangensial.

Tabel 4.17 terlihat bahwa pada pengujian dengan  $\alpha = 0.05$ , *p-value* dari regresi sama dengan nol yaitu lebih kecil dari 0.05, sehingga  $H_0$  ditolak. Ini berarti bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

##### 4.4.1.2 Uji Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara individu dari gaya tangensial adalah sebagai berikut:

$H_0$ :  $\beta_1 = 0$  untuk setiap  $i$ .

$H_1$ :  $\beta_1 \neq 0$  untuk setiap  $i$ .

Tabel 4.18 menunjukkan bahwa pada pengujian dengan  $\alpha = 0.05$ , *p-value* untuk kecepatan makan dan kedalaman potong lebih kecil dari 0.05 yang berarti  $H_0$  ditolak. Dengan demikian koefisien dari kecepatan makan adalah sebesar 0.7514 dan koefisien dari kedalaman potong adalah sebesar 0.90631.

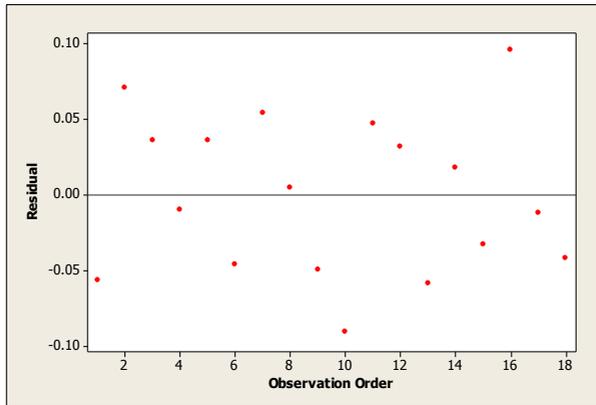
##### 4.4.1.3 Uji Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Tabel 4.18 menunjukkan bahwa  $R^2$  untuk persamaan regresi gaya tangensial adalah 97.2%, artinya menunjukkan bahwa 97.2% variasi dalam  $Y$  diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

#### 4.4.2 Uji Asumsi Residual

##### 4.4.2.1 Uji Identik

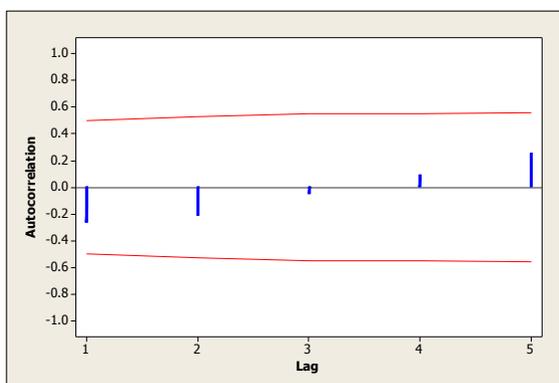
Gambar 4.24 menunjukkan bahwa residual terbesar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.24 Plot residual gaya tangensial versus order

#### 4.4.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan auto correlation function (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.25, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.25 Plot ACF pada respon gaya tangensial

#### 4.4.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

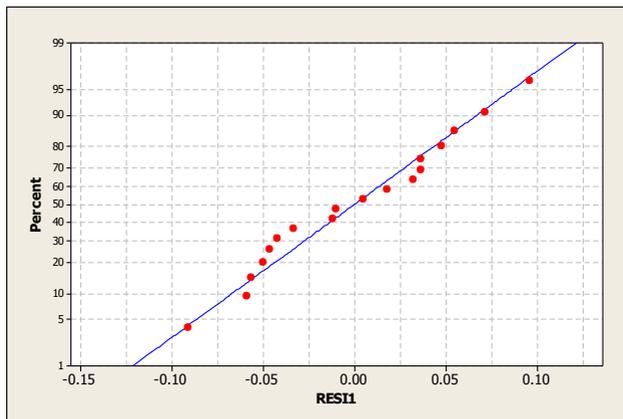
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- *P-value* > 0.150 yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $-6.04455 \times 10^{-16}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar  $0.126^2 = 0.015876$ .

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.015876) terpenuhi.



Gambar 4.26 Plot uji distribusi normal pada respon gaya tangensial

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi sebagai berikut:

$$\text{Log Gaya Tangensial} = 1.4493 + 0.7514\text{Log Kecepatan Makan} + 0.90631\text{Log Kedalaman Potong}$$

atau,

$$\text{Gaya Tangensial} = 28.138\text{Kecepatan Makan}^{0.7514}\text{Kedalaman Potong}^{0.90631}$$

#### 4.5 Pemodelan Matematis Untuk Gaya Normal

Hasil regresi untuk gaya normal dengan menggunakan Minitab dapat dilihat pada tabel 4.19 dan 4.20 sebagai berikut:

Tabel 4.19 Hasil ANAVA untuk gaya normal

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1.08727	0.54364	694.69	0.000
Residual Error	15	0.01174	0.00078		
Total	17	1.09901			

Tabel 4.20 Koefisien regresi untuk model gaya normal

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.7436	0.1697	10.28	0.000
Kecepatan Makan	0.66294	0.07261	9.13	0.000
Kedalaman Potong	0.74376	0.02058	36.14	0.000
S = 0.0279743 R-Sq = 98.9% R-Sq(adj) = 98.8%				

##### 4.5.1 Uji Regresi

##### 4.5.1.1 Uji Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari gaya normal adalah sebagai berikut:

$H_0$ : Semua  $\beta_1$  tidak mempunyai pengaruh terhadap gaya normal.

$H_1$ : Paling tidak ada satu dari  $\beta_1$  mempunyai pengaruh terhadap gaya normal.

Tabel 4.19 terlihat bahwa pada pengujian dengan  $\alpha = 0.05$ ,  $p$ -value dari regresi sama dengan nol yaitu lebih kecil dari 0.05, sehingga  $H_0$  ditolak. Ini berarti bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

#### 4.5.1.2 Uji Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara individu dari gaya normal adalah sebagai berikut:

$H_0$ :  $\beta_1 = 0$  untuk setiap  $i$ .

$H_1$ :  $\beta_1 \neq 0$  untuk setiap  $i$ .

Tabel 4.20 menunjukkan bahwa pada pengujian dengan  $\alpha = 0.05$ ,  $p$ -value untuk kecepatan makan dan kedalaman potong lebih kecil dari 0.05 yang berarti  $H_0$  ditolak. Dengan demikian koefisien dari kecepatan makan adalah sebesar 0.66294 dan koefisien dari kedalaman potong adalah sebesar 0.74376.

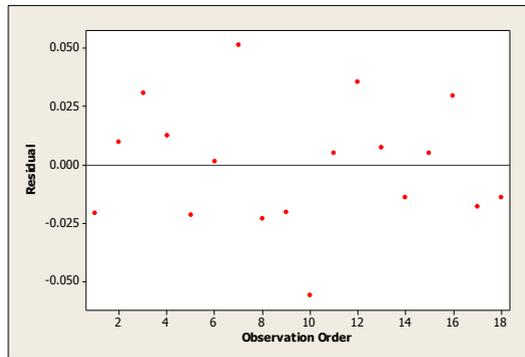
#### 4.5.1.3 Uji Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Tabel 4.20 menunjukkan bahwa  $R^2$  untuk persamaan regresi gaya normal adalah 98.9 %, artinya menunjukkan bahwa 98.9 % variasi dalam  $Y$  diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

#### 4.5.2 Uji Asumsi Residual

##### 4.5.2.1 Uji Identik

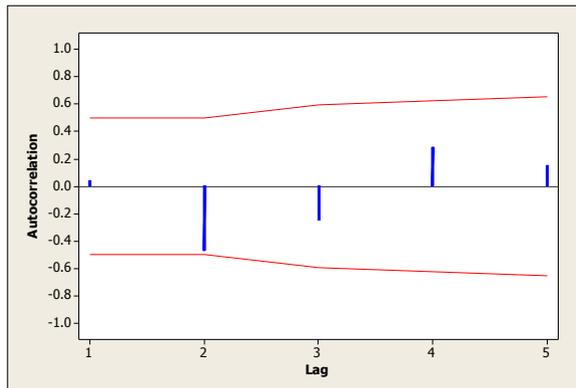
Gambar 4.27 menunjukkan bahwa residual terbesar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.27 Plot residual gaya normal *versus order*

#### 4.5.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan auto correlation function (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.28, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.28 Plot ACF pada respon gaya normal

#### 4.5.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

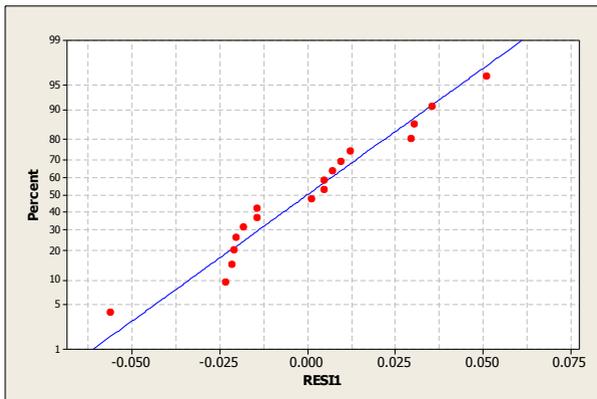
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika  $p$ -value lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.29 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- $P$ -value  $> 0.150$  yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- $Mean$  bernilai sebesar  $1.973730 \times 10^{-16}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar  $0.149^2 = 0.022201$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai  $mean$  sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.022201) terpenuhi.



Gambar 4.29 Plot uji distribusi normal pada respon gaya normal

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi sebagai berikut:

$$\text{Log Gaya Normal} = 1.7436 + 0.66294 \text{Log Kecepatan Makan} + 0.74376 \text{Log Kedalaman Potong}$$

atau,

$$\text{Gaya Normal} = 55.41151 \text{Kecepatan Makan}^{0.66294} \text{Kedalaman Potong}^{0.74376}$$

#### 4.6 Pemodelan Matematis Untuk Kekasaran Permukaan

Hasil regresi untuk kekasaran permukaan dengan menggunakan Minitab dapat dilihat pada tabel 4.21 dan 4.22 sebagai berikut:

Tabel 4.21 Hasil ANAVA untuk kekasaran permukaan

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.157490	0.078745	28.96	0.000
Residual Error	15	0.040785	0.002719		
Total	17	0.198275			

Tabel 4.22 Koefisien regresi untuk model kekasaran permukaan

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.1378	0.3163	-3.60	0.003
Kecepatan Makan	0.5959	0.1353	4.40	0.001
Kedalaman Potong	0.23814	0.03836	6.21	0.000
S = 0.0521443 R-Sq = 79.4% R-Sq(adj) = 76.7%				

##### 4.6.1 Uji Regresi

###### 4.6.1.1 Uji Koefisien Regresi Secara Serempak

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara serempak dari kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

$H_0$ : Semua  $\beta_1$  tidak mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

$H_1$ : Paling tidak ada satu dari  $\beta_1$  mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan.

Dari Tabel 4.21 terlihat bahwa pada pengujian dengan  $\alpha = 0.05$ ,  $p$ -value dari regresi sama dengan nol yaitu lebih kecil dari

0.05, sehingga  $H_0$  ditolak. Ini berarti bahwa model dapat diterima secara statistik dan telah mewakili data.

#### 4.6.1.2 Uji Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesis untuk uji koefisien regresi secara individu dari kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

$H_0: \beta_1 = 0$  untuk setiap  $i$ .

$H_1: \beta_1 \neq 0$  untuk setiap  $i$ .

Dari Tabel 4.22 menunjukkan bahwa pada pengujian dengan  $\alpha = 0.05$ ,  $p$ -value untuk kecepatan makan, dan kedalaman potong lebih kecil dari 0.05 yang berarti  $H_0$  ditolak. Dengan demikian koefisien dari variabel kecepatan makan adalah sebesar 0.5959 dan koefisien dari kedalaman potong adalah sebesar 0.23814.

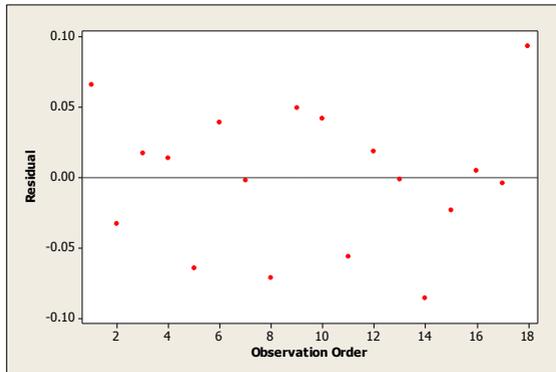
#### 4.6.1.3 Uji Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Dari Tabel 4.22 menunjukkan bahwa  $R^2$  untuk persamaan regresi kekasaran permukaan adalah 79.4 %, artinya menunjukkan bahwa 79.4 % variasi dalam  $Y$  diterangkan oleh model regresi linier yang digunakan.

### 4.6.2 Uji Asumsi Residual

#### 4.6.2.1 Uji Identik

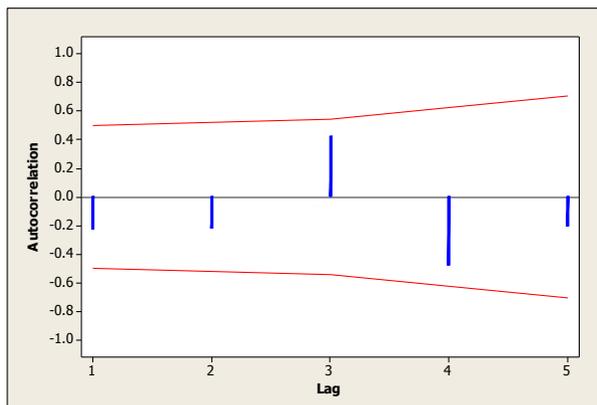
Gambar 4.30 menunjukkan bahwa residual terbesar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.30 Plot residual kekasaran permukaan *versus* order

#### 4.6.2.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan auto correlation function (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.31, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antara residual yang artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.31 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan

#### 4.6.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$ : Residual berdistribusi normal

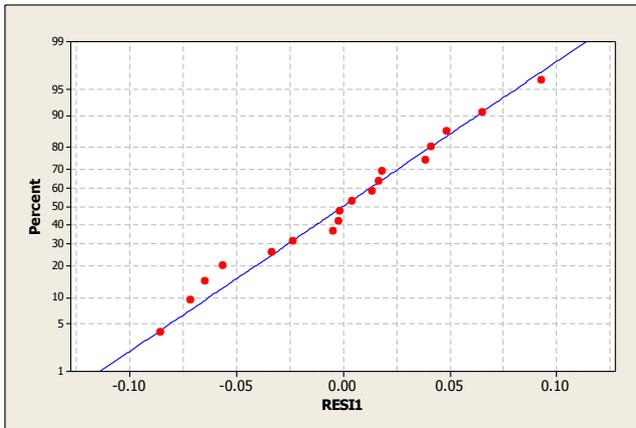
$H_1$ : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.32 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- *P-value* > 0.150 yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau residual berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $-7.70988 \times 10^{-19}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di residual adalah sebesar  $0.132^2 = 0.017424$ .

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.017424) terpenuhi.



Gambar 4.32 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan

Koefisien regresi hasil perhitungan dapat digunakan untuk membuat model regresi sebagai berikut:

$$\text{Log Kekasara Permukaan} = -1.1378 + 0.5959 \text{ Log Kecepatan Makan} + 0.23814 \text{ Log Kedalaman Potong}$$

sehingga,

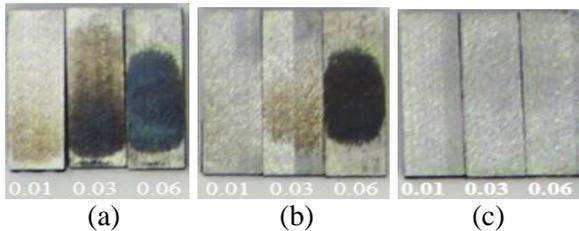
$$\text{Kekasaran Permukaan} = 0.072812 \text{ Kecepatan Makan}^{0.5959} \text{ Kedalaman Potong}^{0.23814}$$

#### 4.7 Pengaruh Variabel Proses Terhadap *Surface Burning*

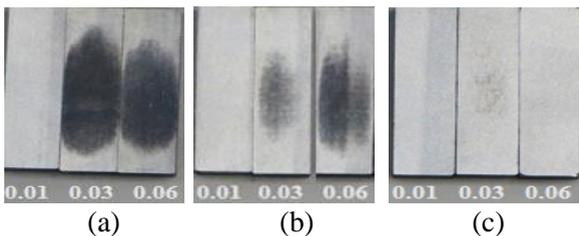
Kerusakan termal yang terjadi selama proses gerinda permukaan salah satunya adalah *surface burning*. Hal ini dikarenakan adanya gesekan antara batu gerinda dengan permukaan benda kerja, sehingga mengakibatkan terjadinya kenaikan temperatur yang sangat tinggi pada permukaan benda kerja tersebut. Pengamatan terhadap *surface burning* dilakukan secara visual dengan pencahayaan yang cukup terhadap spesimen

yang diletakkan pada alas yang datar. Gambar 4.33 dan Gambar 4.34 menunjukkan derajat *burning* yang terjadi pada proses gerinda permukaan. Proses gerinda permukaan pada setiap spesimen dilakukan dengan pemakanan sebanyak lima kali.

Perubahan warna yang terjadi pada permukaan benda kerja mengindikasikan adanya *surface burning*. Secara visual terjadi perubahan yang berangsur-angsur dari warna coklat muda ke warna coklat pekat dan akhirnya menjadi warna biru kemerah-merahan. Hal ini merupakan indikasi telah terjadi kerusakan termal pada permukaan benda kerja tersebut dan jika tidak dikendalikan dengan benar maka akan terjadi kerusakan permukaan yang lebih lanjut.



Gambar 4.33 *Surface burning* pada proses gerinda permukaan dengan kondisi pemesinan *dry*, (a) kecepatan makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250 mm/s.



Gambar 4.34 *Surface burning* pada proses gerinda permukaan dengan kondisi pemesinan MQL, (a) kecepatan

makan 150 mm/s, (b) kecepatan makan 200 mm/s, (c) kecepatan makan 250 mm/s.

Pada penelitian ini derajat burning diklasifikasikan dalam Tabel 4.23. Pada kedalaman potong yang rendah, *burning* muncul dalam kuantitas yang sangat kecil bahkan hampir tidak ada *burning*. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan kedalaman potong yang rendah maka temperatur yang terjadi juga rendah. Data derajat *burning* hasil eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.23 Klasifikasi derajat *burning*.

Derajat <i>Burning</i>	Simbol	Pengertian
<i>No Burning</i>	N	Tidak terjadi burning pada spesimen.
<i>Light</i>	L	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Burning</i> terjadi pada sebagian kecil spesimen dan tampak secara visual.</li> <li>– <i>Burning</i> berwarna sedikit kecoklatan.</li> <li>– Kuantitas burning dibawah <math>\frac{1}{4}</math> bagian dari spesimen.</li> </ul>
	L1	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Burning</i> terjadi pada sebagian kecil spesimen dan tampak secara visual.</li> <li>– <i>Burning</i> berwarna sedikit kecoklatan.</li> <li>– Kuantitas burning diantara <math>\frac{1}{4}</math> sampai <math>\frac{1}{2}</math> bagian dari spesimen.</li> </ul>
<i>Medium</i>	M	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Burning</i> terjadi lebih besar dari pada <i>light</i> dan tampak secara visual.</li> <li>– <i>Burning</i> berwarna coklat yang lebih pekat dari pada <i>light</i></li> <li>– Kuantitas burning diantara <math>\frac{1}{4}</math> sampai <math>\frac{1}{2}</math> bagian dari spesimen.</li> </ul>
<i>Severe</i>	S	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Burning</i> terjadi lebih besar dari pada <i>medium</i> dan tampak secara visual.</li> <li>– <i>Burning</i> berwarna biru kemerah-merahan.</li> </ul>

		– <i>Burning</i> terjadidiatas $\frac{3}{4}$ sampaiseluruh bagian dari spesimen.
	S1	– <i>Burning</i> berwarna biru kemerah-merahan lebih pekat dari S – <i>Burning</i> terjadidiatas $\frac{3}{4}$ sampaiseluruh bagian dari spesimen.

Tabel 4.24 Derajat *burning* hasil eksperimen.

Variabel Proses			Variabel Respon
Metode Pendinginan	Kecepatan Makan (mm/s)	Kedalaman Potong (mm)	Derajat <i>Burning</i>
Dry	150	0.01	N
		0.03	L1
		0.06	S
	200	0.01	N
		0.03	L
		0.06	S
	250	0.01	N
		0.03	N
		0.06	N
MQL	150	0.01	N
		0.03	L

	200	0.06	L1
		0.01	N
		0.03	L
		0.06	L1
	250	0.01	N
		0.03	N
		0.06	N

Kesimpulan yang didapatkan dari data hasil percobaan adalah metode pendinginan berpengaruh secara signifikan terhadap *surface burning*. Penggunaan MQL sedikit dapat mengatasi masalah *surface burning* dibandingkan dengan *dry*. MQL dapat menurunkan gaya potong pada saat proses penggerindaan. Penurunan gaya potong juga mengakibatkan penurunan temperatur pada daerah penggerindaan, sehingga derajat *burning* menjadi rendah. MQL juga menurunkan temperatur yang dihasilkan ketika proses gerinda berlangsung dengan cara konveksi dari *aerosol* yang disemburkan dengan udara bertekanan.

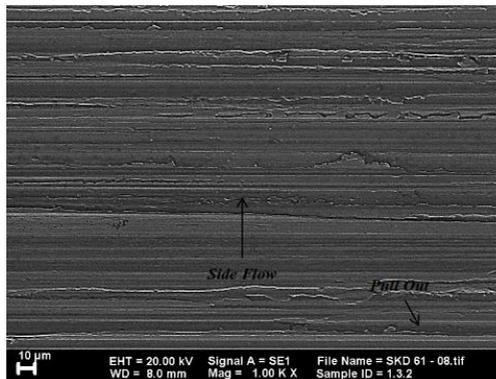
Variabel proses kecepatan makan berpengaruh pada *surface burning*. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.33 (a), (b), (c), dan pada Gambar 4.34 (a), (b), (c). Peningkatan kecepatan makan membuat *surface burning* semakin berkurang. Bertambahnya kecepatan makan membuat waktu kontak pada saat gesekan yang terjadi antara roda gerinda dengan benda kerja semakin singkat, sehingga sebagian besar kalor yang dihasilkan tidak cukup waktu untuk merambat ke benda kerja melainkan dibawa oleh geram.

Variabel proses kedalaman potong juga sangat berpengaruh terhadap terjadinya *surface burning*. *Surface burning* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman potong. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 4.33(a) dan Gambar 4.34 (a). Tinggi rendahnya *surface burning* berdasarkan pada temperatur yang terserap di sekitar area penggerindaan. Rendahnya temperatur dikarenakan kedalaman potong yang kecil, sehingga roda gerinda

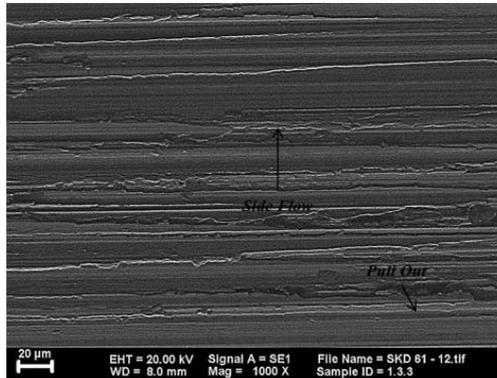
sedikit bergesekan dengan benda kerja yang mengakibatkan derajat *burning* juga semakin rendah.

#### 4.8 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Morfologi Permukaan Benda Kerja

Morfologi dari permukaan benda kerja yang dihasilkan pada proses gerinda permukaan dianalisa menggunakan SEM dengan pembesaran 1000x. Pengambilan SEM dilakukan hanya pada kecepatan makan 250 mm/s dengan kedalaman potong sebesar 0.03 mm dan 0.06 mm. Morfologi permukaan benda kerja hasil proses gerinda permukaan kering (*dry*) ditunjukkan pada Gambar 4.35 dan 4.36.



Gambar 4.35 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.

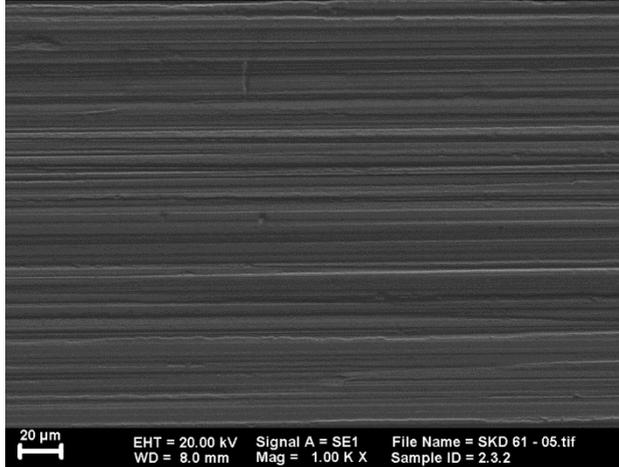


Gambar 4.36 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.06 mm.

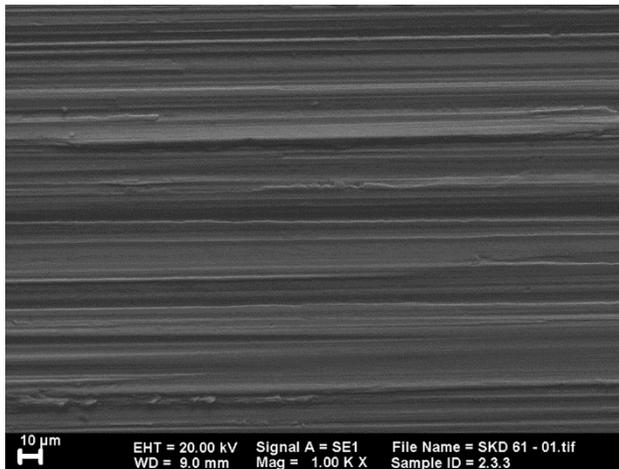
Cacat seperti *side flow* dan *grain pull-out* yang terjadi pada permukaan benda kerja terlihat pada Gambar 4.35 dan 4.36. Cacat yang terjadi pada permukaan benda kerja mengindikasikan kurangnya pelumasan dan gesekan yang parah dari butiran-butiran abrasif yang sudah aus. Cacat ini juga mengindikasikan bahwa *ploughing* menjadi salah satu mode pembentukan geram yang mendominasi pada proses gerinda permukaan ini. Pada proses gerinda permukaan benda kerja yang menggunakan MQL menunjukkan bahwa cacat seperti *side flow* dan *grain pull-out* berkurang. Berkurangnya cacat ini menunjukkan bahwa adanya pelumasan yang tinggi pada saat proses penggerindaan, dan *cutting* menjadi salah satu mode pembentukan geram yang mendominasi pada proses penggerindaan ini. Gambar 4.37 dan 4.38 menunjukkan morfologi permukaan benda kerja hasil proses gerinda permukaan dengan jenis pendinginan MQL.

Permukaan benda kerja yang dihasilkan pada proses gerinda permukaan menggunakan MQL mempunyai *ridges* yang tajam dan jumlahnya banyak. Hasil tersebut didapatkan karena *cutting fluid* pada MQL dapat menjaga butiran abrasif tetap tajam.

Penambahan jumlah *ridges* akan meningkatkan kekasaran permukaan.



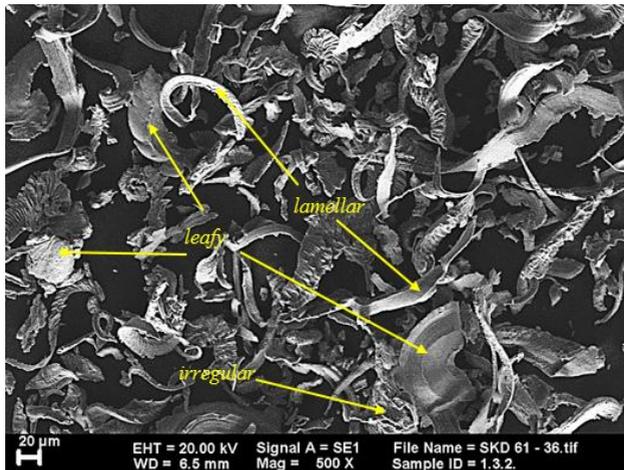
Gambar 4.37 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.



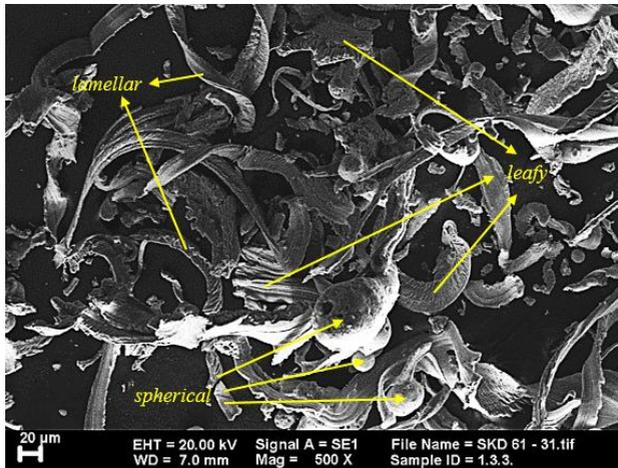
Gambar 4.38 Foto morfologi permukaan benda kerja dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.

#### 4.9 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Bentuk Geram

Morfologi bentuk geram yang dihasilkan pada proses gerinda dianalisa menggunakan SEM dengan perbesaran 500x. Pengamatan ini dilakukan hanya pada hasil proses yang menggunakan kecepatan makan 250 mm/s dengan kedalaman potong sebesar 0.03 mm dan 0.06 mm. Bentuk geram hasil proses gerinda permukaan kering ditunjukkan pada Gambar 4.39 dan 4.40.



Gambar 4.39 Foto SEM geram dengan pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.

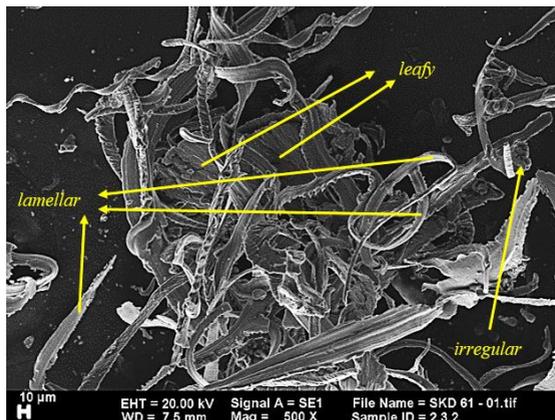


Gambar 4.40 Foto SEM geram dengan pendinginan *dry*, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.06 mm.

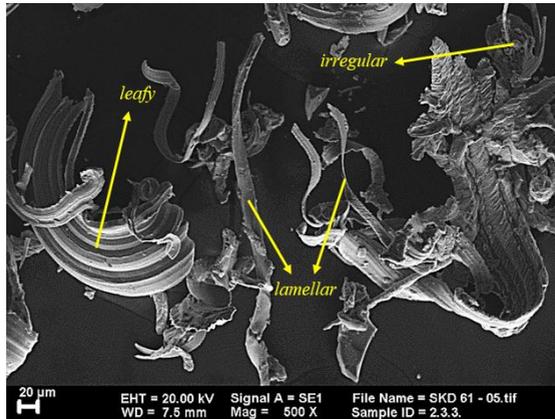
Geram yang dihasilkan pada proses gerinda permukaan mempunyai bentuk-bentuk *lamellar* (panjang), *leafy* (daun), *spherical* (bulat) dan *irregular* (tidak teratur). Bentuk geram pada proses gerinda dengan kedalaman potong sebesar 0.03 mm yang ditunjukkan Gambar 4.39 didominasi oleh bentuk *leafy*, *lamellar*, *irregular* dan *spherical*. Pembentukan *leafy* terjadi karena adanya proses *ploughing* pada saat proses gerinda permukaan. *Lamellar* terbentuk karena adanya proses *cutting* yang terjadi pada proses gerinda permukaan. Bentuk geram *spherical* karena adanya pemanasan yang berlebih dan oksidasi eksotermis (Dhar dkk., 2005). Gambar 4.40 menunjukkan hasil geram pada proses gerinda dengan kedalaman potong sebesar 0.06 mm. Bentuk geram yang dihasilkan tersebut sama dengan bentuk geram yang dihasilkan pada proses gerinda dengan kedalaman potong sebesar 0.03 mm. Pada kedalaman sebesar 0.06 mm jumlah bentuk geram *irregular* dan *spherical* lebih banyak dibandingkan dengan kedalaman potong sebesar 0.03 mm. Bertambahnya jumlah

*spherical* dikarenakan terjadi kenaikan temperatur pada proses gerinda dengan kedalaman potong sebesar 0.06 mm.

Bentuk geram pada proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL ditunjukkan pada Gambar 4.41 dan 4.42. Bentuk dari geram yang dihasilkan tersebut didominasi oleh bentuk *lamellar*, *leafy*, dan *irregular*. Tidak adanya *spherical* yang terbentuk membuktikan bahwa penggunaan MQL pada proses gerinda permukaan dapat menurunkan temperatur. Penggunaan MQL juga menghasilkan bentuk geram dengan patahan kecil-kecil. Hal ini menunjukkan bahwa salah satu dari pembentukan geram tersebut adalah *fracturing*. Pada proses gerinda permukaan kering terbentuk geram dengan bentuk *lamellar* yang lebih lebar dibandingkan proses gerinda permukaan menggunakan MQL. Hal ini menunjukkan adanya proses *ploughing*. Berdasarkan analisa bentuk geram dapat dilihat bahwa *cutting*, *ploughing*, dan *rubbing* adalah mode pembentukan geram yang mendominasi pada proses gerinda permukaan kering, sedangkan mode pembentukan geram yang mendominasi pada penggunaan MQL adalah *cutting*, *fracturing* dan *ploughing*.



Gambar 4.41 Foto SEM geram dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.03 mm.



Gambar 4.42 Foto SEM geram dengan pendinginan MQL, kecepatan makan 250 mm/s dan kedalaman potong 0.06 mm.

#### 4.10 Diskusi dan Pembahasan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka pengaruh-pengaruh dari variabel proses terhadap variabel respon adalah sebagai berikut:

- a. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa salah satu variabel proses yang berpengaruh secara signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan adalah metode pendinginan. Gaya tangensial dan gaya normal yang dihasilkan pada saat menggunakan pendinginan MQL lebih rendah dibandingkan dengan tanpa pendinginan (*dry*). Penggunaan MQL dapat menurunkan gaya tangensial dan gaya normal yang terjadi pada saat proses pengerindaan. Hal ini disebabkan butiran-butiran abrasif *slip* pada saat benda kerja dan batu gerinda saling bergesekan karena adanya pelumasan dari *cutting fluid* di sekitar daerah pengerindaan. Penelitian tentang pengaruh penggunaan

MQL terhadap proses gerinda permukaan yang telah dilakukan oleh Tawakoli dkk. (2009), Bianchi dkk. (2010) dan Barczak dkk. (2010) menerangkan bahwa menggunakan MQL dapat menurunkan gaya tangensial dan gaya normal.

Penggunaan MQL juga dapat menaikkan kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan lebih tinggi pada saat menggunakan MQL dari pada *dry*. Penggunaan MQL akan menjaga butiran abrasif tetap tajam. Hal ini mengakibatkan *rubbing* pada proses gerinda permukaan berkurang sehingga menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi. Bianchi dkk. (2010) juga meneliti tentang Pengaruh MQL pada proses gerinda permukaan terhadap kekasaran permukaan. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa penggunaan MQL menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi dari pada *dry*.

Penggunaan MQL pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa MQL dapat mengurangi derajat *burning*. Berkurangnya derajat *burning* akibat dari turunnya temperatur pada daerah penggerindaan. Geram hasil dari proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL didominasi oleh bentuk *lamellar, leafy, irregular* dan ada juga yang berbentuk patahan-patahan kecil, sehingga mode pembentukan geram yang mendominasi pada penggunaan MQL adalah *cutting, fracturing* dan *ploughing*.

- b. Variabel proses kecepatan makan juga berpengaruh secara signifikan terhadap gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan. Bertambahnya kecepatan makan mengakibatkan gaya tangensial dan gaya normal yang dihasilkan juga semakin besar. Tawakoli dkk. (2009) juga meneliti tentang pengaruh kecepatan makan terhadap proses gerinda permukaan. Hasil dari penelitian tersebut menjelaskan bahwa gaya tangensial dan gaya

normal meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan makan.

Variabel proses kecepatan makan juga berpengaruh terhadap kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan bertambah besar seiring dengan bertambahnya kecepatan makan. Kecepatan makan juga berpengaruh terhadap *surface burning*. Semakin tinggi kecepatan makan, maka derajat *burning* semakin berkurang. Bertambahnya kecepatan makan membuat waktu kontak pada saat gesekan yang terjadi antara roda gerinda dengan benda kerja semakin singkat, sehingga sebgaiian besar kalor yang dihasilkan tidak cukup waktu untuk merambat ke benda kerja melainkan dibawa oleh geram. Barczak dkk. (2010) juga melakukan penelitian serupa. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa temperatur disekitar area penggerindaan semakin berkurang seiring dengan peningkatan kecepatan makan.

- c. Variabel proses yang ketiga adalah kedalaman potong. Bertambahnya kedalaman potong membuat gaya tangensial dan gaya normal semakin meningkat. Hal ini dinyatakan pada teori yang bisa dilihat pada rumus 2.2. Tawakoli dkk. (2009), Bianchi dkk. (2010) dan Barczak dkk. (2010) juga meneliti tentang pengaruh beberapa variabel proses gerinda permukaan, dimana salah satunya adalah kedalaman potong. Hasil yang didapatkan dari penelitian Tawakoli dkk. (2009), Bianchi dkk. (2010) dan Barczak dkk. (2010) adalah gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan bertambah besar seiring dengan bertambahnya kedalaman potong.

Penggunaan kedalaman potong yang tinggi membuat kekasaran permukaan semakin meningkat. Kedalaman potong yang kecil membuat butiran abrasif pada permukaan batu gerinda sedikit bergesekan dengan benda kerja. Gesekan yang sedikit ini menyebabkan permukaan hasil penggerindaan mempunyai celah yang

sempit, sehingga kekasaran permukaan benda kerja juga rendah. Akan tetapi, dengan kedalaman potong yang besar, maka butiran abrasif yang terdapat di permukaan roda gerinda akan lebih banyak bergesekan dengan benda kerja, sehingga menyebabkan permukaan hasil pengerindaan mempunyai celah yang lebar. Hal ini menyebabkan kekasaran permukaan semakin tinggi.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 4.11 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis tentang pengaruh MQL dan variabel-variabel proses terhadap gaya tangensial, gaya normal, IPBK dan mode pembentukan geram pada proses gerinda permukaan dengan material SKD 61, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada proses gerinda permukaan dengan menggunakan MQL:
  - a. Gaya tangensial, gaya normal dan *surface burning*, akan menurun, tetapi kekasaran permukaan akan meningkat.
  - b. Peningkatan kecepatan makan akan meningkatkan gaya tangensial, gaya normal dan kekasaran permukaan, tetapi akan menurunkan *surface burning*.
  - c. Peningkatan kedalaman potong akan meningkatkan gaya tangensial, gaya normal, kekasaran permukaan dan *surface burning*.
2. Salah satu mode pembentukan geram yang mendominasi pada proses penggerindaan dengan menggunakan MQL adalah *cutting*. Hal ini ditunjukkan dengan cacat permukaan seperti *side flow* dan *grain pull-out* yang timbul sudah mulai berkurang.
3. Geram hasil dari proses gerinda permukaan yang menggunakan MQL didominasi oleh bentuk *lamellar*, *leafy*, *irregular* dan ada juga yang berbentuk patahan-patahan kecil, sehingga mode pembentukan geram yang mendominasi pada penggunaan MQL adalah *cutting*, *fracturing* dan *ploughing*.

#### 4.12 Saran

Beberapa saran untuk melengkapi penelitian yang telah dilakukan ini adalah:

1. Melakukan pengukuran temperatur, hal ini dilakukan agar bisa melihat seberapa besar penurunan temperatur yang dapat dilakukan dengan menggunakan MQL secara kuantitatif.
2. Memvariasikan jenis *cutting fluid*, hal ini dilakukan agar bisa mendapatkan fluida yang cocok untuk proses gerinda permukaan menggunakan MQL.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Bhattacharyya, G.K. dan Johnson, R.A., 1997, *Statistical Concepts and Methods*, John Wiley & Sons, Inc., America.
- Barczak, L.M., A.D.L. Batako, M.N. Morgan, 2010, "A Study of Plane Surface Grinding Under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Conditions," *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 50, pp. 977–985.
- Bianchi, E. C., R. S. Destro, M. H. Oikawa, R. M. Sousa, R. C. Canarim, R. F. Damasceno, P. R. Aguiar, M. C. Sampaio Alves, 2010, "The Minimum Quantity of Lubricant (MQL) Technique in The Surface Grinding of Steel," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol 66
- Black, J.T. dan Kohser, R.A., 2008, *Materials and Processes in Manufacturing*, Tenth Edition, John Wiley & Sons, Inc., America.
- Braga, D. U., A. E. Diniz., G. W. A. Miranda., N. L. Coppini., 2002, "Using a Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and A Diamond Coated Tool in The Drilling of Aluminum–Silicon Alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 127-138.
- Datasheet e 216, 2014, "surface finishes," [www.finetubes.co.uk](http://www.finetubes.co.uk), diakses tanggal : 7 Mei 2016.
- Iriawan, N. dan Astuti, S.P., 2006, *Mengolah Data Statistik Dengan Mudah Menggunakan Minitab 14*, Edisi I, Amdi Offset, Yogyakarta.

- Klocke, F., 2011, Manufacturing Processes 1, RWTH edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Montgomery, D.C., 1991, Design and Analysis of Experiment, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Park, S.H., 1996, Robust Design and Analysis for Quality Engineering, 1st edition, Chapman & Hall, London.
- Rochim, T., 2001, Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T., 1993, Teori dan Teknologi Proses Pemesinan, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Ross, P.J., 2008, Taguchi Technique for Quality Engineering, 7th edition, McGraw-Hill International Edition, US.
- Rowe, W.B., 2009, Principles of Modern Grinding Technology, William Andrew, USA.
- Soejanto, I., 2009, Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Tawakoli, T., M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stockert, A. Rasifard, 2009, "An Experimental Investigation of The Effects of Workpiece and Grinding Parameters on Minimum Quantity Lubrication (MQL) Grinding," International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 49, pp. 924–932

# LAMPIRAN 1

## Spesifikasi Unit *Minimum Quantity Lubrication*

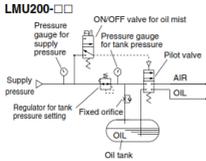
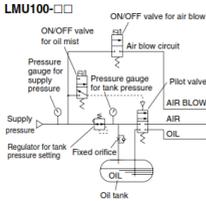
### Mist Spray Unit Series **LMU100/200**

- Intermittent spray to cutting and press gear chains, etc.



LMU100

#### Control Circuit



#### Standard Specifications

Model	LMU100	LMU200
Inlet air pressure	1.0 MPa	
Oil tank set pressure range	0.05 to 0.2 MPa	
Oil tank capacity (cm <sup>3</sup> )	Total capacity: 3000	
	Effective capacity: 2500	
Ambient and fluid temperature	5 to 50°C	
Solenoid valve voltage	100 VAC 50/60Hz, 200 VAC 50/60Hz, 24 VDC	
Port size	SUP Rc 1/4	AIR : T0604 (ø6 tube) applicable
	OUT 3 x Rc 1/4	OIL : T0425 (ø4 tube) applicable AIR BLOW : T0606 (ø6 tube) applicable
Weight (kgf)	8.4	7.9

#### How to Order

**LMU 1 00 - 1 3**

Mist spray unit      Air blow circuit      Float switch

1	Available
2	Not available

**Rated voltage**

1	100 VAC (50/60 Hz)
2	200 VAC (50/60 Hz)
5	24 VDC

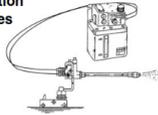
0	None
3	For the upper and lower limit control (S/R turns OFF when the float is on the upper side) (S/R turns ON when the float goes down) Contact capacity 50 VA AC, 50 W DC

#### Recommended Equipment

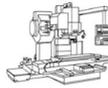
It is recommended to use each mist spray unit type with the mixing valves, magnet holders, branch pipes and nylon tubes listed in the table below.

Mist spray unit	Mixing valve	Magnet holder	Branch pipe	Nylon tube
This unit, with an oil tank and a spray ON/OFF control unit, sends oil and air to the mixing valve.	This valve adjusts the amounts of oil and air from the mist spray unit using built-in oil and air needles, and also discharges oil mist from the nozzle.	This magnet holder enables the mixing valve installed on the arm end to be freely attached to the iron and steel parts such as machining tools, etc.	This pipe is used to separate oil and air from the mist spray unit when using several mixing valves.	This tube is used for the air piping and oil piping between the mist spray unit and the mixing valve.
LMU100-□□	LMV110-□□ LMV120-□□	LMH10	LMD1-□	OIL--T0425-□ AIR--T0604-□ AIR BLOW--T0606-□
LMU200-□□	LMV210-□□ LMV220-□□	LMH20	LMD2-□	OIL--T0425-□ AIR--T0604-□

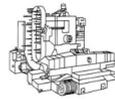
#### Application Examples



Standing type machining center (Drilling center)



Horizontal machining center

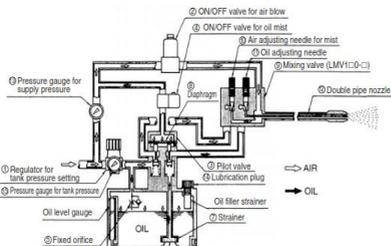


- AL800
- AL900
- ALF
- ALT
- ALD
- ALB
- LMU
- ALIP

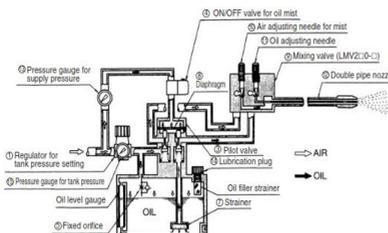
## Series LMU

### Construction/Working Principle

#### LMU100-□□



#### LMU200-□□



#### Working Principle

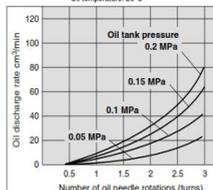
Of the compressed air from the air source, part is directed to the regulator for tank pressure setting (1), while the rest is directed to the ON/OFF valve for air blow circuit (2), which operates the ON/OFF valve for the air blow circuit (4) and the pilot valve for the mixing circuit (3). Compressed air at a prescribed setting determined by the regulator for tank pressure setting (1) passes through the fixed orifice (5) and gradually fills the oil tank (6), applying pressure to the OIL surface. The OIL in the tank passes through the strainer (7) and is drawn into the pilot valve (3). Operating the ON/OFF valve for oil mist (4) at this point will cause operating signal pressure to be conducted into the pilot valve (3), pushing the diaphragm (8) downwards, and as a result the compressed air from pilot valve (3) and oil from the opened valve will flow through their respective conduits and be drawn into the mixing valve (9).

Air and oil are adjusted with varying quantities by the air for mist from the mixing valve (9) and oil adjustment needles (10) and (11). With dual piping from the mixing valve (9) to the dual pipe nozzle (12), compressed air passes through the outside while oil passes through the inside, and at the tip of the dual pipe nozzle (12) they are sprayed out as a fine mist by the discharged air.

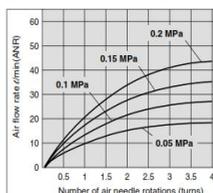
To remove cutting chips, operate the ON/OFF valve for air blow (2), which will cause the supplied compressed air to be drawn directly into the mixing valve (9) and blown out as air through the external piping of the dual pipe nozzle (12). To replenish oil, loosen the oil supply plug (14) to discharge the compressed air from inside the tank through the oil supply plug's side hole. Since it flows gradually from the fixed orifice (5) into the interior of the tank, it is easy to replenish oil from the oil supply hole.

### Oil Discharge Rate (Representative Value)

Conditions: Oil: Turbine oil class 1 ISO VG32  
Oil temperature: 28°C



### Air flow rate (Representative Value)



### Handling Precautions

#### Mounting

1. Be sure to mount an air filter corresponding to 5mm (equivalent to the SMC AF20) on the SUP side of the mist spray unit.

#### Adjustment

1. After loosening the tank's pressure-setting handle (by rotating it to the left), introduce air from the air source. Use the tank's pressure-setting handle and set the range from 0.05 to 0.2 MPa, set each control valve to ON (manual operation or energized), and inspect carefully to make sure there is no looseness in the fittings at each connecting point. At this time, be sure the air and oil adjustment needles of the mixing valve are in a completely closed position (by rotating it to the right.)

#### Lubrication

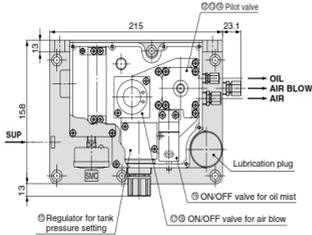
1. Completely release air in the OIL pipe. Even small amounts of air in the OIL pipe will cause oil to dribble. Fully open the oil adjustment needle of the mixing valve, and turn the ON/OFF valve for oil mist generation to the ON position, or press and hold down the manual button to release all air from inside the OIL pipe. If air buildup from use of branching pipes, etc. takes place inside the OIL pipe, mount an air release valve at the highest position and let the air out.

Be sure to carry out this operation when replenishing the oil after the oil tank becomes empty.

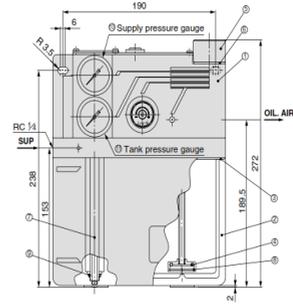
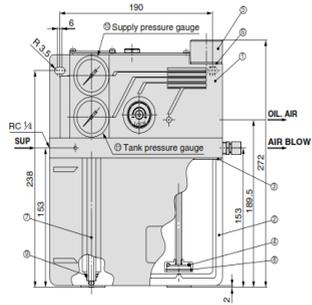
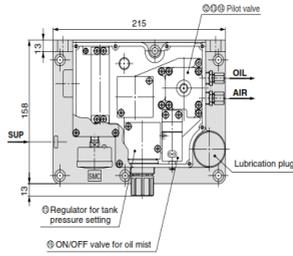
Mist Spray Unit **Series LMU**

**Dimensions/Parts List**

**LMU100**



**LMU200**



**Main Parts List**

No.	Description	Material	Note
1	Mist spray body	Aluminum die-casted	Platinum silver coated
2	Mist spray tank	Aluminum die-casted	Platinum silver coated

**Spare Parts/Replacement Parts Part No.**

No.	Description	Material	Qty.	Part no.	
				LMU100	LMU200
3	Body seal	NBR	1	81021-3	
4	Element	Bronze	1	81021-6	
5	Lubrication plug	Brass	1	81021-7	
6	Filler seal	—	1	81021-8	
7	Level gauge	Hard glass	1	81021-9	
8	Type C retaining ring for tank	Stainless steel	1	JIS B2804 Nominal 30	
9	O-ring	FKM	2	JIS B2401 P11	
10	Pressure gauge	—	1	G40-10-Q1	
11	Pressure gauge	—	1	G40-3-01-X289	
12	Pilot valve	—	1	81022P	
13	O-ring	NBR	1	JIS B2401 P3	
14	O-ring	FKM	2	JIS B2401 P12	
15	Regulator	—	1	INA-13-717	
16	Solenoid valve	—	1	VO301-00;G-X212	
17	Solenoid valve	—	1	VO315-00;G	
18	O-ring	NBR	4	JIS B2401 P8	

AL800  
AL900

ALF  
ALT

ALD

ALB

LMU

ALIP



### Mixing Valve: Series LMV



#### Specifications

Inlet air pressure	0.3 MPa Max.		
Ambient and fluid temperature	5 to 60°C		
Port size	AIR	T0604 (ø6 tube) applicable	
	OIL	T0425 (ø4 tube) applicable	
	AIR BLOW	T0806 (ø8 tube) applicable	

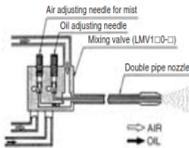
#### How to Order

**LMV** 1 1 0 20

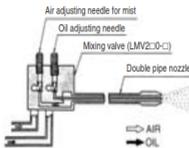
- Mixing valve: 1 Available, 2 Not available
- Air blow circuit: 1 Flexible tubing, 2 Copper tubing
- Nozzle tubing construction: 1 Flexible tubing, 2 Copper tubing
- Nozzle tubing length: L: 20 200 mm, 25 250 mm, 30 300 mm, 35 350 mm

#### Construction

##### LMV1□0/With air blow circuit

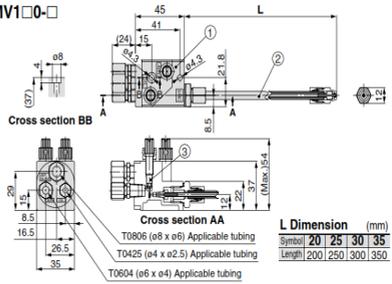


##### LMV2□0/Without air blow circuit

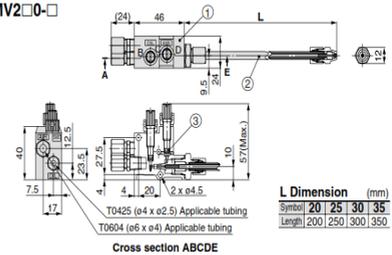


#### Dimensions

##### LMV1□0-□



##### LMV2□0-□



#### Main Parts List

No.	Description	Material	Note
1	Mixing valve body	Aluminum die-casted	Platinum silver coated

#### Spare Parts/Replacement Parts Part No.

No.	Description	Material	Qty.	Part no.	
				LMV□10	LMV□20
2	Flexible nozzle assembly	—	1	81023-2A-1 to 4 <sup>Note 1)</sup>	—
3	Copper piping nozzle assembly	—	1	—	81023-31A-1 to 4 <sup>Note 1)</sup>
3	O-ring	FKM	2	—	123116-2

Note 1) Numbers indicate nozzle lengths. -1: 200 mm, -2: 250 mm, -3: 300 mm, -4: 350 mm

## LAMPIRAN 2

**Tabel Hasil Pengukuran Gaya Tangensial dan Gaya Normal**

Variabel Proses			Respon Gaya Potong (N)						
Pendinginan	Kecepatan Makaman (mm/s)	Kedalaman Potongan (mm)	Fz		Fy		F		
			Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 1	Replikasi 2	Rata-Rata
Dry	150	0.01	61.00	61.71	32.72	33.66	69.22	70.29	69.76
		0.03	130.10	128.60	70.17	76.91	147.82	149.84	148.83
		0.06	238.70	236.00	109.11	111.52	262.46	261.02	261.74
	200	0.01	78.85	75.34	37.30	38.14	87.23	84.44	85.84
		0.03	155.60	151.10	85.25	89.16	177.42	175.44	176.43
		0.06	269.50	265.10	121.71	125.39	295.71	293.26	294.48
	250	0.01	92.26	89.71	49.62	46.38	104.76	100.99	102.87
		0.03	191.60	196.90	98.70	92.67	215.53	217.62	216.57
		0.06	295.20	298.80	135.12	138.14	324.65	329.19	326.92
MQL	150	0.01	47.65	43.93	16.42	15.18	50.40	46.48	48.44
		0.03	115.70	114.40	59.65	56.48	130.17	127.58	128.88
		0.06	203.30	205.60	103.14	102.15	227.97	229.58	228.77
	200	0.01	62.23	61.48	22.70	20.29	66.24	64.74	65.49
		0.03	130.30	132.50	68.30	65.51	147.11	147.81	147.46
		0.06	229.90	231.80	105.85	109.12	253.10	256.20	254.65
	250	0.01	78.88	75.07	31.12	34.25	84.80	82.51	83.66
		0.03	150.50	152.30	75.10	72.35	168.19	168.61	168.40
		0.06	253.70	257.30	124.24	126.41	282.49	286.67	284.58

**Tabel Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Replikasi 1**

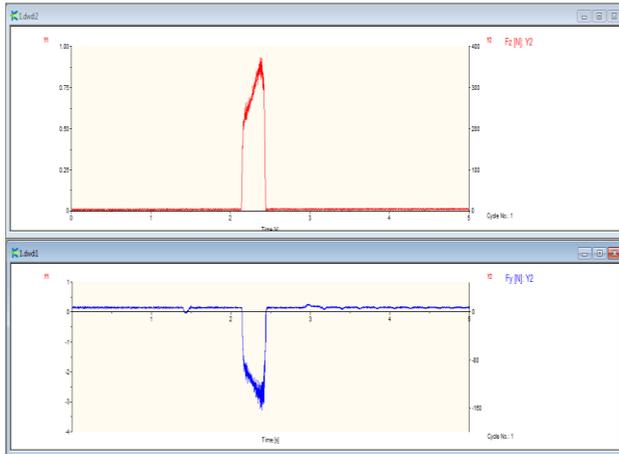
Variabel Proses			Respon Kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ )												
Pendinginan	Kecepatan Makan (250 mm/s)	Kedalaman Potongan (mm)	A				B				C				Rata-rata Total
			1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	
Dry	150	0.01	0.4	0.43	0.38	0.40	0.36	0.33	0.34	0.34	0.46	0.43	0.41	0.43	0.39
		0.03	0.49	0.5	0.46	0.48	0.44	0.45	0.48	0.46	0.47	0.41	0.44	0.44	0.46
		0.06	0.66	0.5	0.5	0.55	0.6	0.67	0.61	0.63	0.36	0.43	0.38	0.39	0.52
	200	0.01	0.41	0.38	0.41	0.40	0.41	0.38	0.43	0.41	0.44	0.48	0.47	0.46	0.42
		0.03	0.38	0.44	0.42	0.41	0.51	0.54	0.5	0.52	0.51	0.52	0.47	0.50	0.48
		0.06	0.55	0.58	0.57	0.57	0.51	0.53	0.56	0.53	0.55	0.57	0.55	0.56	0.55
	250	0.01	0.47	0.51	0.53	0.50	0.48	0.48	0.55	0.50	0.49	0.43	0.38	0.43	0.48
		0.03	0.65	0.65	0.62	0.64	0.66	0.61	0.58	0.62	0.62	0.57	0.61	0.60	0.62
		0.06	0.	0.	0.	0.73	0.	0.	0.	0.91	0.	0.	0.	0.74	0.79

			77	7	72		91	93	88		8	77	65		
MQL	150	0.01	0. 57	0. 55	0. 55	0.56	0. 52	0. 56	0. 59	0.56	0. 51	0. 52	0. 65	0.56	0.56
		0.03	0. 58	0. 75	0. 64	0.66	0. 53	0. 55	0. 49	0.52	0. 57	0. 53	0. 57	0.56	0.58
		0.06	0. 84	0. 88	0. 78	0.83	0. 71	0. 77	0. 73	0.74	0. 76	0. 75	0. 73	0.75	0.77
	200	0.01	0. 63	0. 58	0. 59	0.60	0. 55	0. 58	0. 61	0.58	0. 6	0. 58	0. 58	0.59	0.59
		0.03	0. 58	0. 58	0. 61	0.59	0. 63	0. 69	0. 66	0.66	0. 65	0. 67	0. 68	0.67	0.64
		0.06	1. 03	0. 87	1. 01	0.97	0. 88	0. 88	0. 92	0.89	0. 9	1. 01	1. 12	1.01	0.96
	250	0.01	0. 66	0. 66	0. 68	0.67	0. 58	0. 68	0. 68	0.65	0. 67	0. 63	0. 64	0.65	0.65
		0.03	0. 72	0. 75	0. 77	0.75	0. 69	0. 75	0. 75	0.73	0. 71	0. 68	0. 68	0.69	0.72
		0.06	1. 12	1. 17	1. 07	1.12	1. 15	1. 15	1. 13	1.14	1. 08	1. 12	1. 12	1.11	1.12

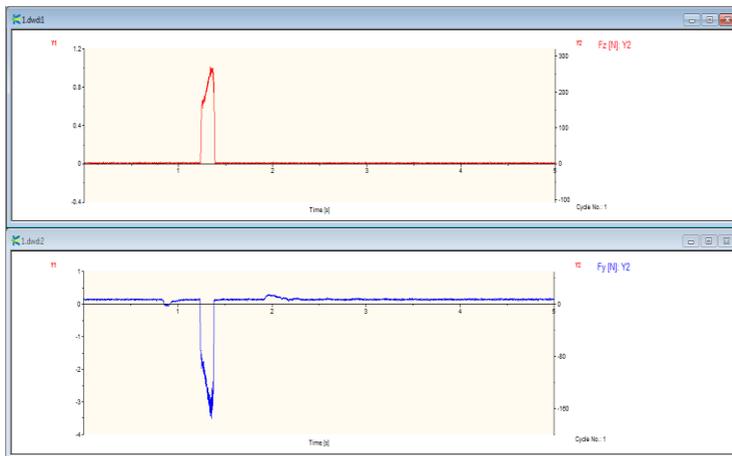
Tabel Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Replikasi 2

Variabel Proses			Respon Kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ )												
Pendinginan	Kecepatan Makan (250 mm/s)	Kedalaman Potong (mm)	A				B				C				Rata-rata Total
			1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	
Dry	150	0.01	0.41	0.45	0.46	0.44	0.36	0.13	0.47	0.32	0.35	0.35	0.39	0.36	0.37
		0.03	0.53	0.45	0.48	0.49	0.5	0.47	0.51	0.49	0.47	0.51	0.43	0.47	0.48
		0.06	0.48	0.55	0.52	0.52	0.58	0.53	0.56	0.56	0.54	0.52	0.56	0.54	0.54
	200	0.01	0.42	0.46	0.48	0.45	0.48	0.45	0.53	0.49	0.48	0.53	0.55	0.52	0.49
		0.03	0.47	0.48	0.5	0.48	0.55	0.5	0.51	0.52	0.55	0.55	0.54	0.55	0.52
		0.06	0.63	0.54	0.58	0.58	0.57	0.58	0.55	0.57	0.55	0.55	0.59	0.56	0.57
	250	0.01	0.55	0.59	0.52	0.55	0.57	0.55	0.53	0.55	0.62	0.6	0.55	0.59	0.56
		0.03	0.68	0.68	0.61	0.66	0.62	0.69	0.66	0.66	0.62	0.61	0.59	0.61	0.64
		0.06	0.68	0.7	0.71	0.70	0.73	0.72	0.71	0.72	0.77	0.73	0.77	0.76	0.72
MQL	150	0.01	0.53	0.49	0.55	0.52	0.55	0.53	0.52	0.53	0.54	0.51	0.51	0.52	0.53
		0.03	0.57	0.53	0.56	0.55	0.54	0.57	0.57	0.56	0.56	0.55	0.48	0.53	0.55
		0.06	0.77	0.76	0.81	0.78	0.71	0.77	0.77	0.75	0.82	0.73	0.75	0.77	0.77
	200	0.01	0.57	0.57	0.58	0.57	0.53	0.55	0.58	0.55	0.57	0.57	0.59	0.58	0.57
		0.03	0.55	0.62	0.63	0.60	0.56	0.57	0.61	0.58	0.66	0.65	0.68	0.66	0.61
		0.06	0.96	0.83	0.79	0.86	0.85	0.79	0.8	0.81	0.88	0.75	0.86	0.83	0.83
	250	0.01	0.68	0.66	0.71	0.68	0.67	0.68	0.62	0.66	0.64	0.64	0.62	0.63	0.66

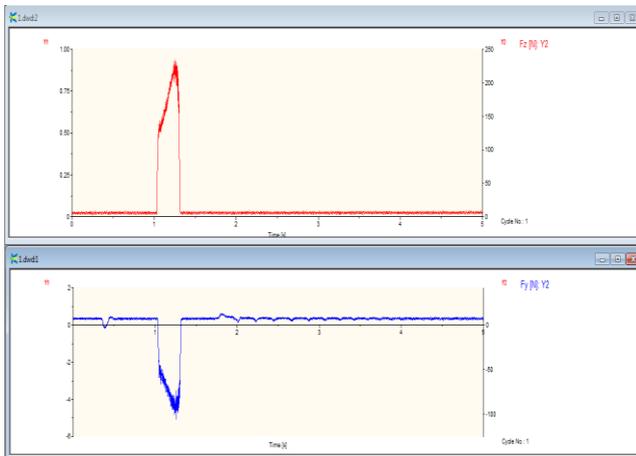
		0.03	0.78	0.82	0.84	0.81	0.87	0.87	0.86	0.87	0.82	0.81	0.85	0.83	0.84
		0.06	1.21	1.18	1.23	1.21	1.32	1.38	1.21	1.30	1.16	1.22	1.29	1.22	1.24

**LAMPIRAN 3****Grafik Hasil Pengukuran Gaya Potong**

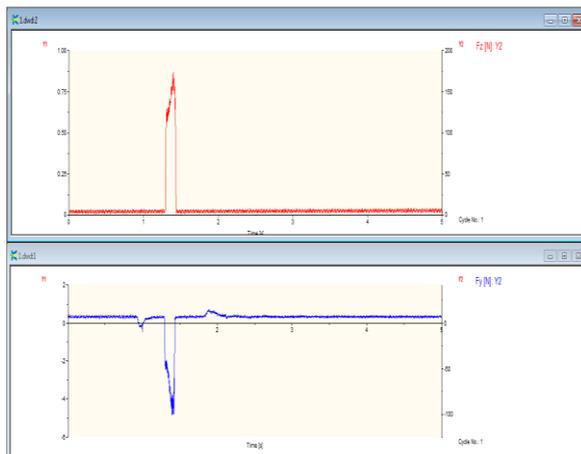
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.1 Replikasi 1



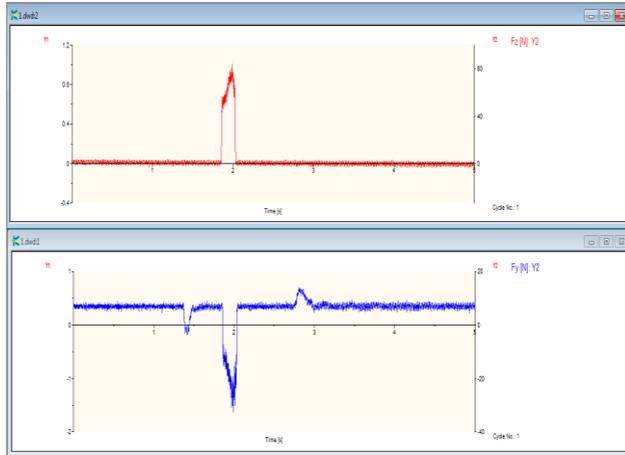
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.1 Replikasi 2



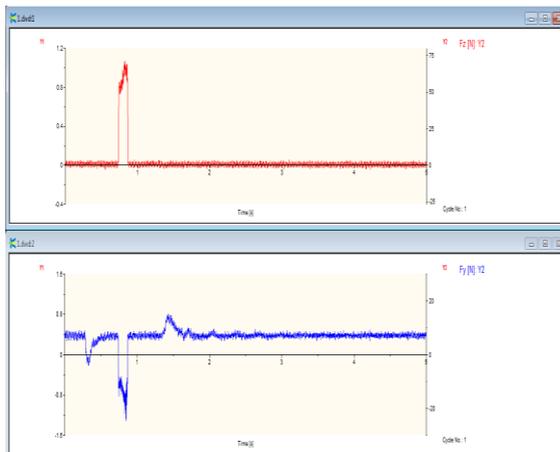
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.2 Replikasi 1



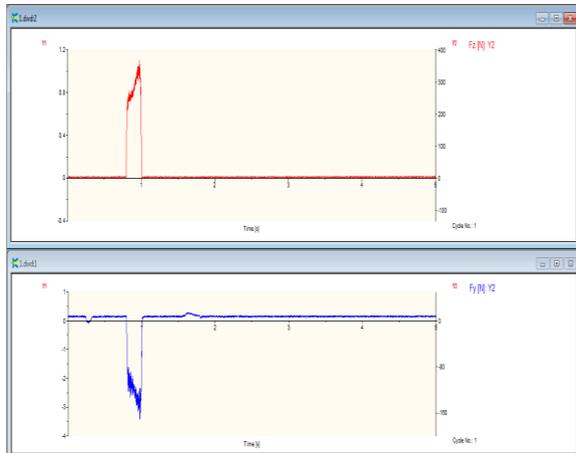
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.2 Replikasi 2



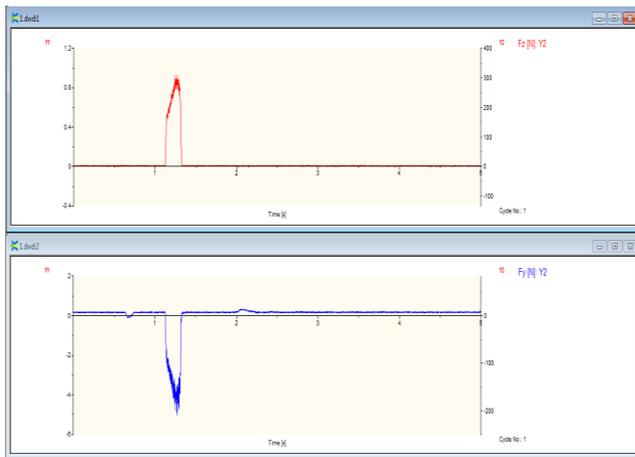
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.3 Replikasi 1



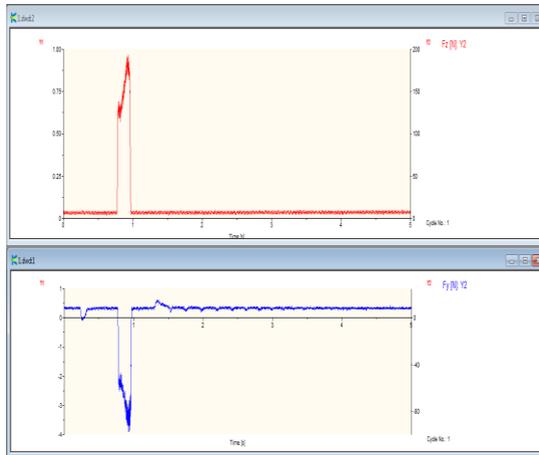
Gambar gaya potong kombinasi 1.1.3 Replikasi 2



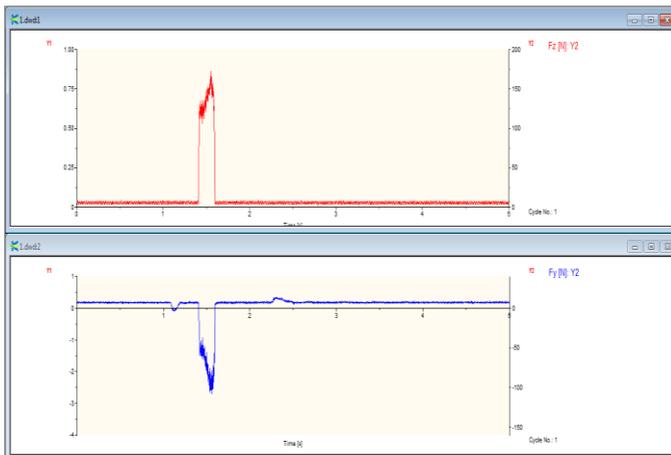
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.1 Replikasi 1



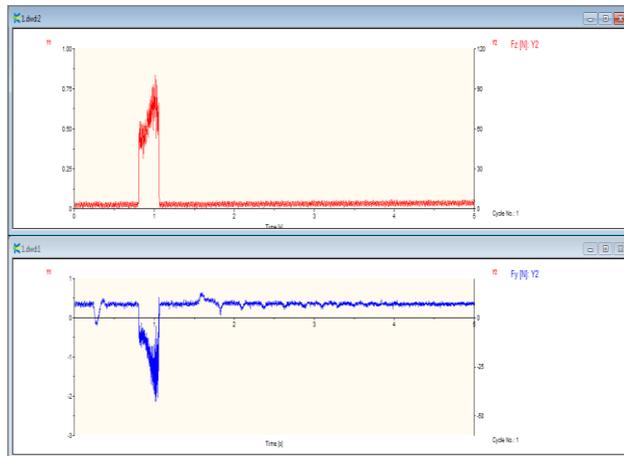
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.1 Replikasi 2



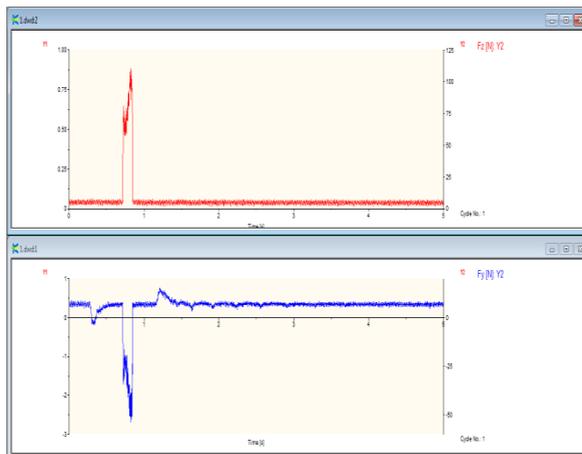
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.2 Replikasi 1



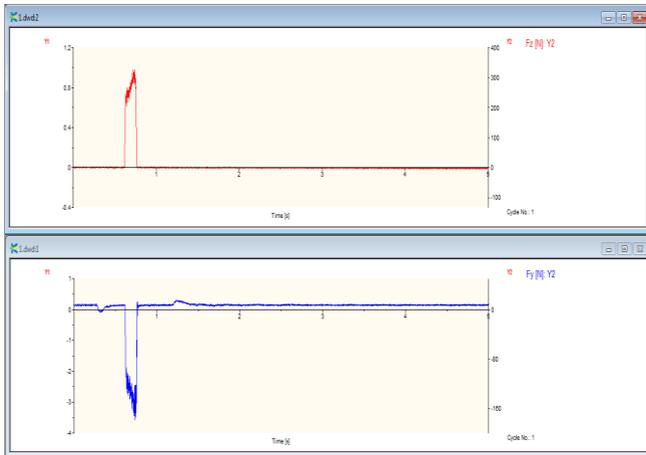
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.2 Replikasi 2



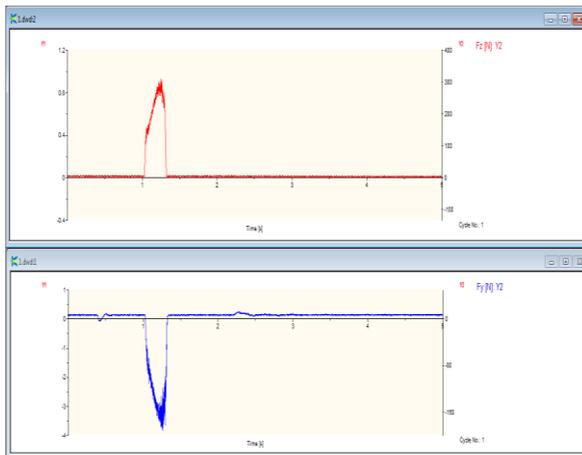
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.3 Replikasi 1



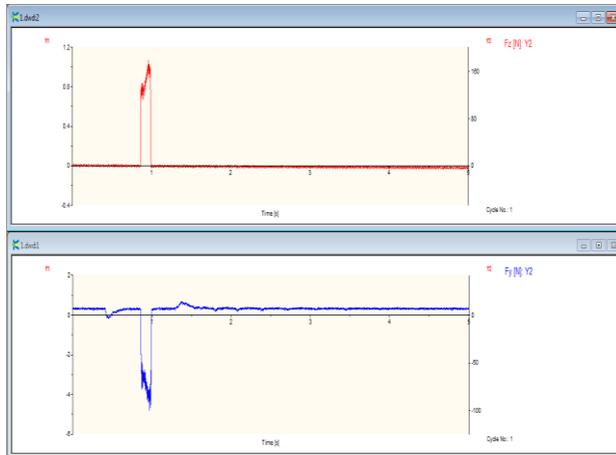
Gambar gaya potong kombinasi 1.2.3 Replikasi 2



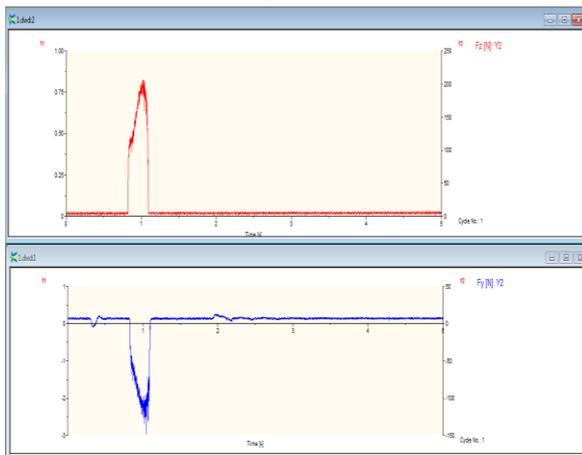
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.1 Replikasi 1



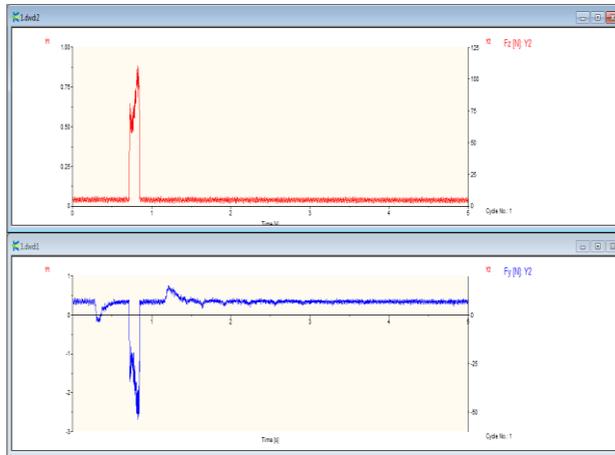
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.1 Replikasi 2



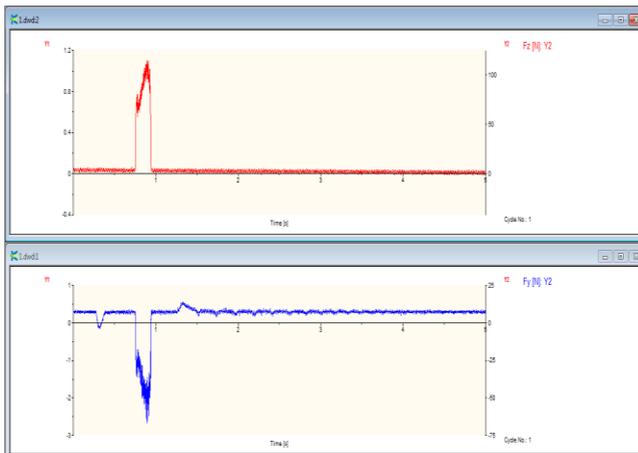
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.2 Replikasi 1



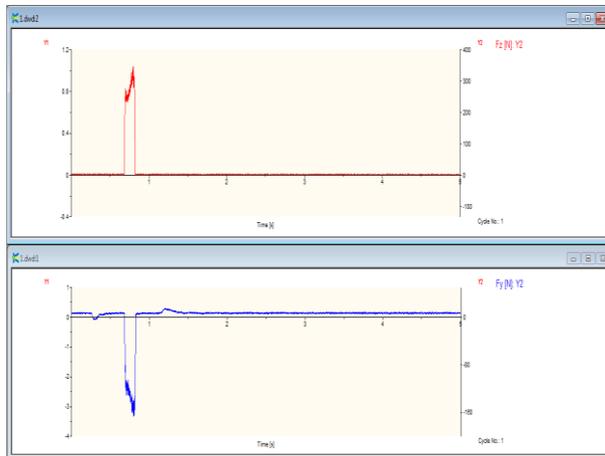
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.2 Replikasi 2



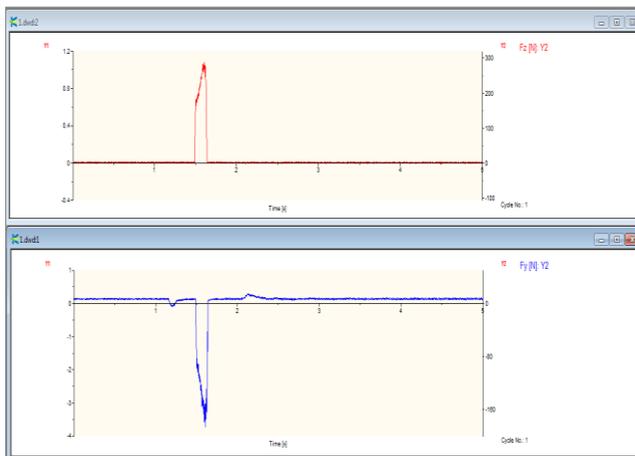
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.3 Replikasi 1



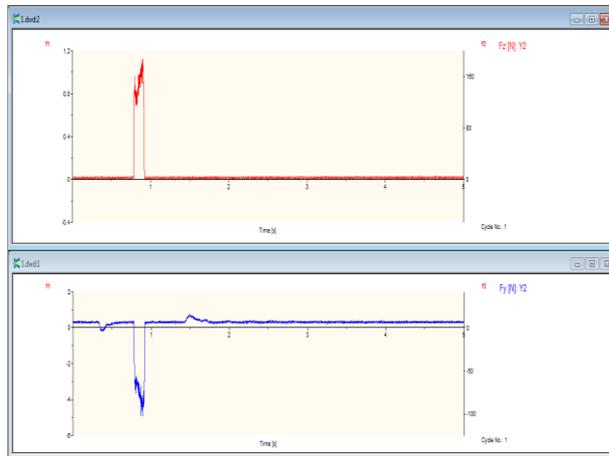
Gambar gaya potong kombinasi 1.3.3 Replikasi 2



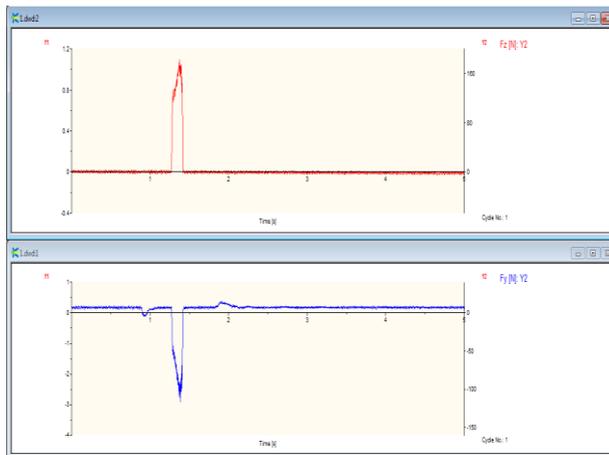
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.1 Replikasi 1



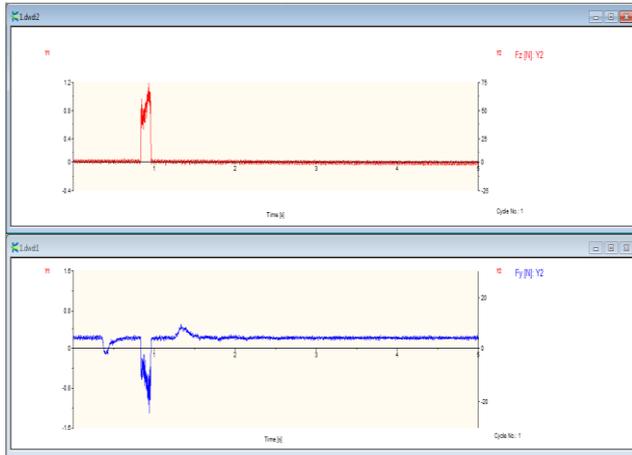
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.1 Replikasi 2



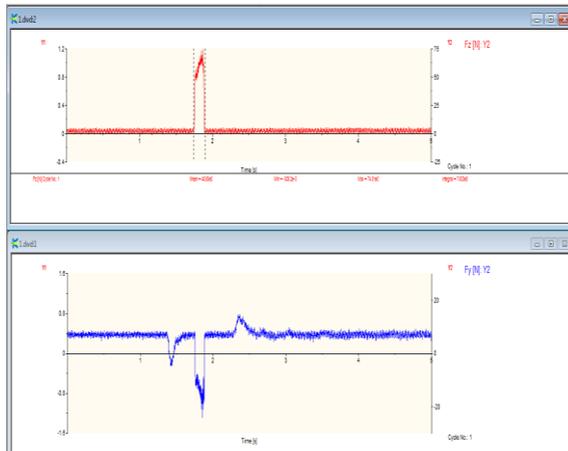
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.2 Replikasi 1



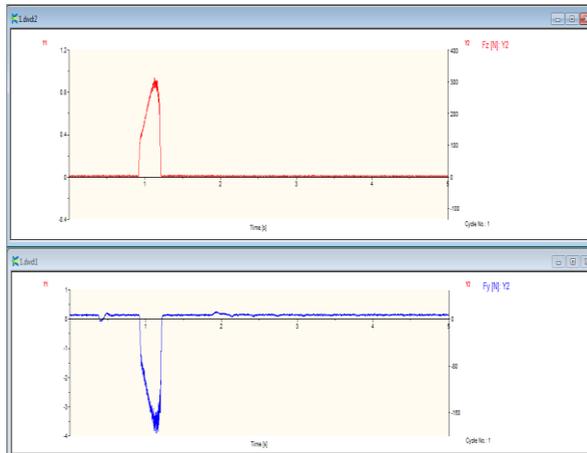
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.2 Replikasi 2



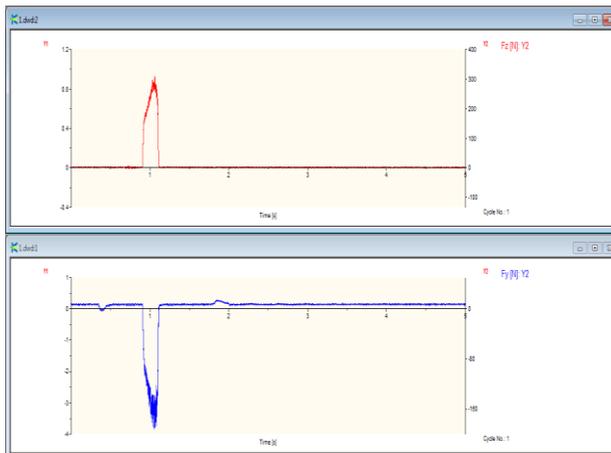
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.3 Replikasi 1



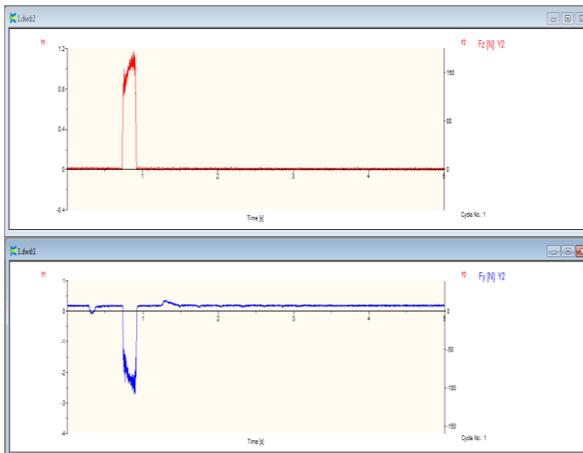
Gambar gaya potong kombinasi 2.1.3 Replikasi 2



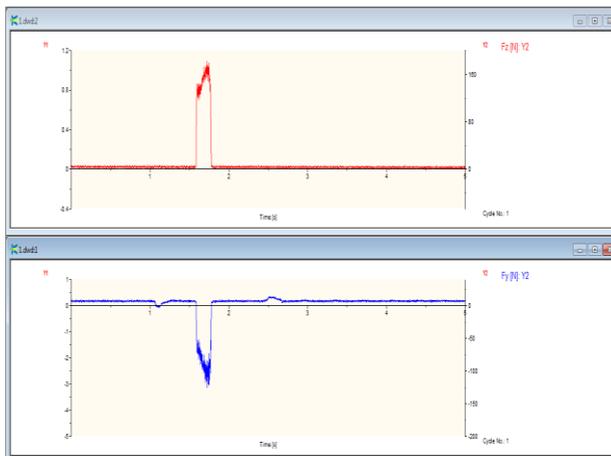
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.1 Replikasi 1



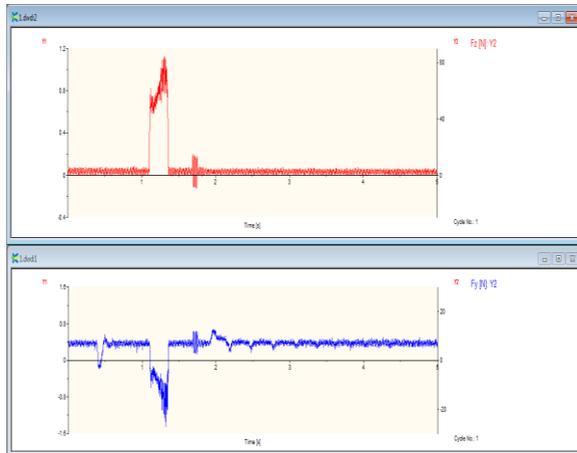
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.1 Replikasi 2



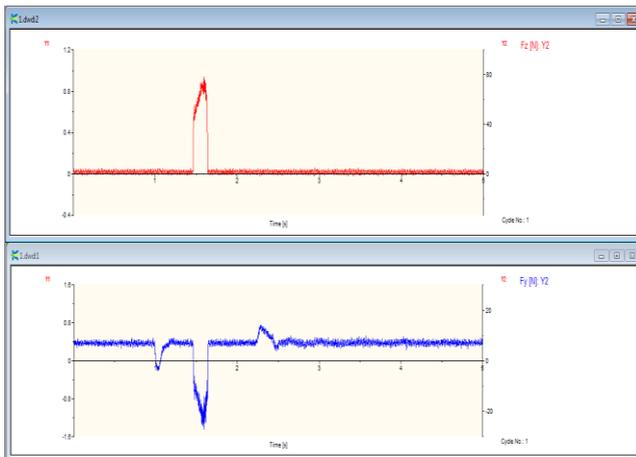
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.2 Replikasi 1



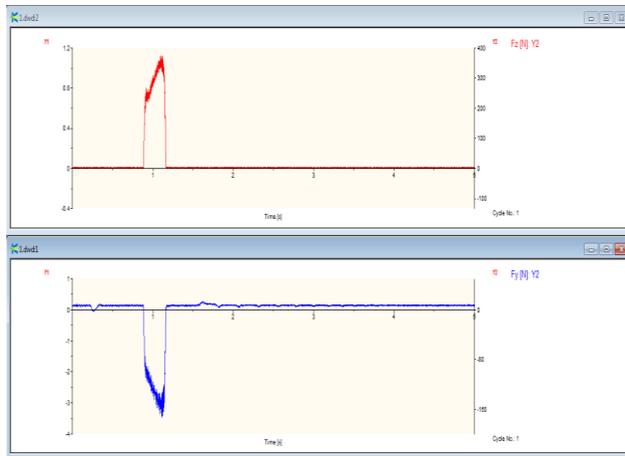
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.2 Replikasi 2



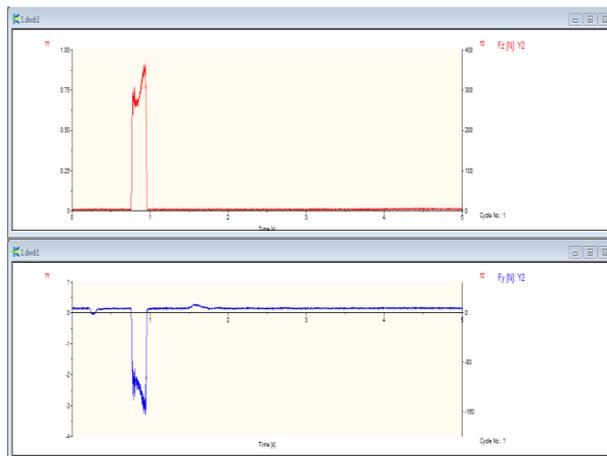
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.3 Replikasi 1



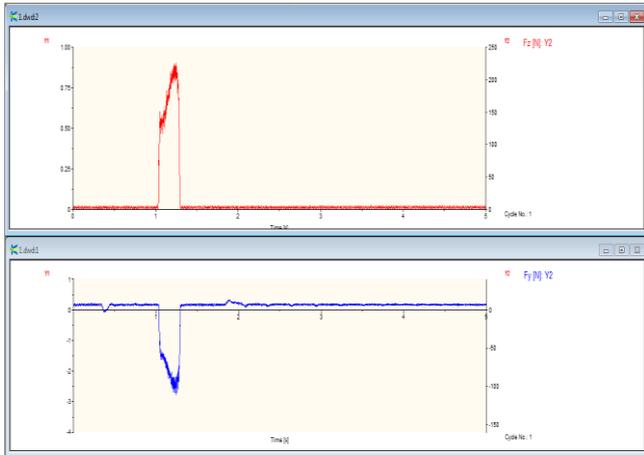
Gambar gaya potong kombinasi 2.2.3 Replikasi 2



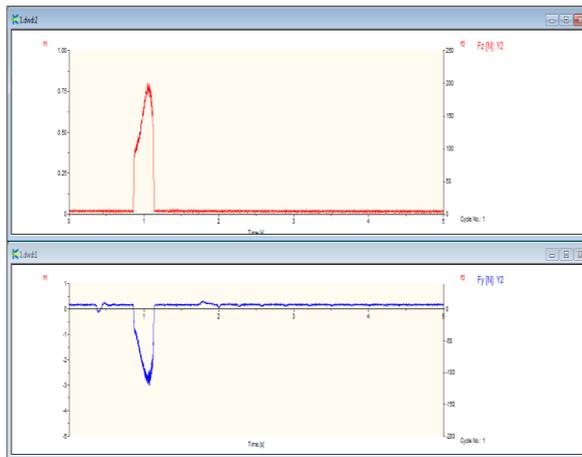
Gambar gaya potong kombinasi 2.3.1 Replikasi 1



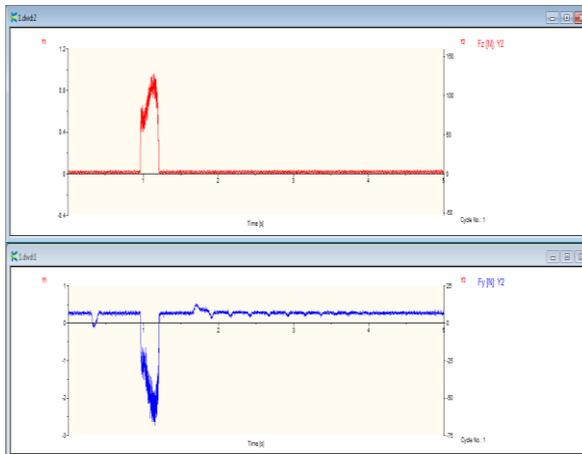
Gambar gaya potong kombinasi 2.3.1 Replikasi 2



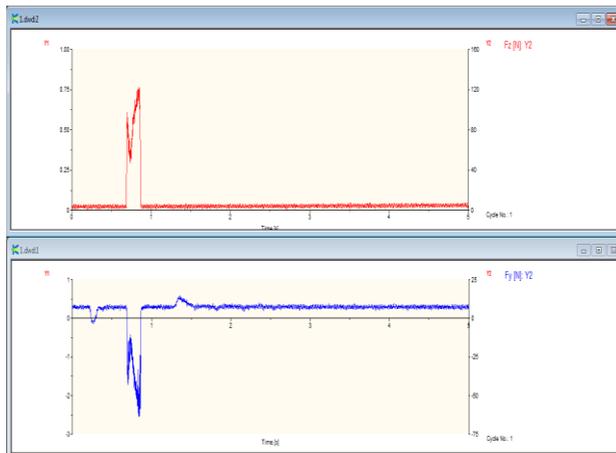
Gambar gaya potong kombinasi 2.3.2 Replikasi 1



Gambar gaya potong kombinasi 2.3.2 Replikasi 2



Gambar gaya potong kombinasi 2.3.3 Replikasi 1



Gambar gaya potong kombinasi 2.3.3 Replikasi 2

#### LAMPIRAN 4

### General Linear Model: Gaya Tangensial versus Jenis Pendinginan, Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Factor	Type	Levels	Values
Metode Pendinginan	fixed	2	Dry, MQL
Kecepatan Makan	fixed	3	150, 200, 250
Kedalaman Potong	fixed	3	0.01, 0.03, 0.06

Analysis of Variance for Gaya Tangensial, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Metode Pendinginan	1	2231.3	2231.3	2231.3	183.83	0.000
Kecepatan Makan	2	2356.3	2356.3	1178.2	97.06	0.000
Kedalaman Potong	2	44571.4	44571.4	22285.7	1835.98	0.000
Error	30	364.1	364.1	12.1		
Total	35	49523.2				

$S = 3.48401$     $R\text{-Sq} = 99.26\%$     $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 99.14\%$

Unusual Observations for Gaya Tangensial

	Gaya Tangensial	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
Obs 3	109.112	116.124	1.422	-7.012	-2.20 R
23	89.161	82.789	1.422	6.372	2.00 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Tangensial,  
Term = Jenis Pendinginan**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0%  
Confidence

Metode			
Pendinginan	N	Mean	Grouping
Dry	18	82.9	A
MQL	18	67.1	B

Means that do not share a letter are significantly different.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Tangensial,  
Term = Kecepatan Makan**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0%  
Confidence

Kecepatan			
Makan	N	Mean	Grouping
250	12	85.3	A
200	12	74.1	B
150	12	65.6	C

Means that do not share a letter are significantly different.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Tangensial,  
Term = Kedalaman Potong**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0%  
Confidence

Kedalaman			
Potong	N	Mean	Grouping

0.06	12	117.7	A
0.03	12	75.9	B
0.01	12	31.5	C

Means that do not share a letter are significantly different.

### **Regression Analysis: Gaya Tangensial versus Kecepatan Makan, Kedalaman Potong**

The regression equation is

$$\text{Gaya Tangensial} = 1.4493 + 0.7514 \text{ Kecepatan Makan} + 0.90631 \text{ Kedalaman Potong}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.4493	0.3361	4.31	0.001
Kecepatan Makan	0.7514	0.1438	5.22	0.000
Kedalaman Potong	0.90631	0.04077	22.23	0.000

$$S = 0.0554196 \quad R\text{-Sq} = 97.2\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 96.8\%$$

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1.60140	0.80070	260.70	0.000
Residual Error	15	0.04607	0.00307		
Total	17	1.64747			

Source	DF	Seq SS
Kecepatan Makan	1	0.08381
Kedalaman Potong	1	1.51759

**General Linear Model: Gaya Normal versus Jenis Pendinginan, Kecepatan Makan, Kedalaman Potong**

Factor	Type	Levels	Values
Metode Pendinginan	fixed	2	Dry, MQL
Kecepatan Makan	fixed	3	150, 200, 250
Kedalaman Potong	fixed	3	0.01, 0.03, 0.06

Analysis of Variance for Gaya Normal, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Metode Pendinginan	1	6124	6124	6124	89.69	0.000
Kecepatan Makan	2	12414	12414	6207	90.91	0.000
Kedalaman Potong	2	195190	195190	97595	1429.36	0.000
Error	30	2048	2048	68		
Total	35	215776				

$S = 8.26312$   $R\text{-Sq} = 99.05\%$   $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 98.89\%$

Unusual Observations for Gaya Normal

	Gaya
Obs	Normal Fit SE Fit Residual St Resid
25	89.710 105.220 3.373 -15.510 -2.06 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Normal, Term = Jenis Pendinginan**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

Metode

Pendinginan	N	Mean	Grouping
-------------	---	------	----------

Dry	18	167.6	A
-----	----	-------	---

MQL	18	141.5	B
-----	----	-------	---

Means that do not share a letter are significantly different.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Normal, Term = Kecepatan Makan**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

Kecepatan

Makan	N	Mean	Grouping
-------	---	------	----------

250	12	177.7	A
-----	----	-------	---

200	12	153.6	B
-----	----	-------	---

150	12	132.2	C
-----	----	-------	---

Means that do not share a letter are significantly different.

### **Tukey Pairwise Comparisons: Response = Gaya Normal, Term = Kedalaman Potong**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

Kedalaman Potong				
	N	Mean	Grouping	
0.06	12	248.7	A	
0.03	12	145.8	B	
0.01	12	69.0	C	

Means that do not share a letter are significantly different.

### **Regression Analysis: Gaya Normal versus Kecepatan Makan, Kedalaman Potong**

The regression equation is

Gaya Normal = 1.7436 + 0.66294 Kecepatan Makan + 0.74376 Kedalaman Potong

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.7436	0.1697	10.28	0.000
Kecepatan Makan	0.66294	0.07261	9.13	0.000
Kedalaman Potong	0.74376	0.02058	36.14	0.000

S = 0.0279743 R-Sq = 98.9% R-Sq(adj) = 98.8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1.08727	0.54364	694.69	0.000

Residual Error	15	0.01174	0.00078
Total	17	1.09901	

Source	DF	Seq SS
Kecepatan Makan	1	0.06524
Kedalaman Potong	1	1.02203

#### Unusual Observations

	Kecepatan	Gaya					
Obs	Makan	Normal	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
7	2.40	1.89697	1.84577	0.01331	0.05119	2.08	R
10	2.18	1.64276	1.69870	0.01371	-0.05594	-2.29	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

## LAMPIRAN 5

### General Linear Model: Kekasaran Permukaan versus Jenis Pendinginan, Kecepatan Makan, Kedalaman Potong

Factor	Type	Levels	Values
Metode Pendinginan	fixed	2	Dry, MQL
Kecepatan Makan	fixed	3	150, 200, 250
Kedalaman Potong	fixed	3	0.01, 0.03, 0.06

Analysis of Variance for Kekasaran Permukaan, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Metode Pendinginan	1	0.35358	0.35358	0.35358	58.54	0.000
Kecepatan Makan	2	0.28550	0.28550	0.14275	23.63	0.000
Kedalaman Potong	2	0.43448	0.43448	0.21724	35.97	0.000
Error	30	0.18121	0.18121	0.00604		
Total	35	1.25477				

$S = 0.0777185$     $R\text{-Sq} = 85.56\%$     $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 83.15\%$

Unusual Observations for Kekasaran Permukaan

Kekasaran						
Obs	Permukaan	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
36	1.24444	1.00358	0.03173	0.24086	3.39	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Kekasaran Permukaan, Term = Jenis Pendinginan**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

Metode

Pendinginan N Mean Grouping

MQL 18 0.7 A

Dry 18 0.5 B

Means that do not share a letter are significantly different.

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = Kekasaran Permukaan, Term = Kecepatan Makan**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

Kecepatan

Makan N Mean Grouping

250 12 0.8 A

200 12 0.6 B

150 12 0.5 B

Means that do not share a letter are significantly different.

### **Tukey Pairwise Comparisons: Response = Kekasaran Permukaan, Term = Kedalaman Potong**

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

Kedalaman Potong				
	N	Mean	Grouping	
0.06	12	0.8	A	
0.03	12	0.6	B	
0.01	12	0.5	B	

Means that do not share a letter are significantly different.

### **Regression Analysis: Kekasaran Permukaan versus Kecepatan Makan, Kedalaman Potong**

The regression equation is

$$\text{Kekasaran Permukaan} = -1.14 + 0.5959 \text{ Kecepatan Makan} + 0.23814 \text{ Kedalaman Potong}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.1378	0.3163	-3.60	0.003
Kecepatan Makan	0.5959	0.1353	4.40	0.001
Kedalaman Potong	0.23814	0.03836	6.21	0.000

S = 0.0521443 R-Sq = 79.4% R-Sq(adj) = 76.7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.157490	0.078745	28.96	0.000

Residual Error	15	0.040785	0.002719
Total	17	0.198275	

Source	DF	Seq SS
Kecepatan Makan	1	0.052715
Kedalaman Potong	1	0.104775

## BIODATA PENULIS



**Abdul Hanif Hidayatullah** lahir di Kudus, 03 April 1990 merupakan anak kedua dari enam bersaudara dari pasangan Sunhaji dan Rini Dwi Kusmartini. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 2 Kudus pada tahun 2002. Kemudian dilanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 2 Kudus dan lulus pada tahun 2005. Lalu di lanjutkan dengan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Kudus. Kemudian hijrah ke Yogyakarta untuk melanjutkan Studi Diploma 3 dengan program studi Teknik Mesin di Universitas Gadjah Mada dan lulus pada tahun 2012. Kemudian penulis melanjutkan jejang pendidikan Strata 1 (S1) dengan program lintas jalur di ITS jurusan Teknik Mesin pada tahun 2013. Selama masa pendidikan, penulis banyak mendapatkan wawasan dan pengetahuan baru. Ketertarikan penulis dengan dunia manufaktur menjadikan penulis melakukan penelitian tentang fenomena-fenomena yang terjadi pada material saat proses pemesinan sejak dari D3 hingga S1. Untuk informasi dan kepentingan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui email [abdulhanif03@gmail.com](mailto:abdulhanif03@gmail.com)