

**PROYEK AKHIR - VM231838**

**PENGARUH RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, DAN  
POSISI PENGUKURAN DALAM PROSES HIGH FEED  
MACHINING PADA CNC END MILLING TERHADAP  
KEKASARAN PERMUKAAN AL6061 DAN KEAUSAN  
PAHAT HSS**

**SITI AMINATUL MUAWANAH**

**NRP. 2038201020**

Dosen Pembimbing

**Ir. Winarto, DEA**

**NIP 19601213 198811 1 001**

**Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur**

**Departemen Teknik Mesin Industri**





**PROYEK AKHIR - VM231838**

**PENGARUH RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, DAN POSISI  
PENGUKURAN DALAM PROSES HIGH FEED MACHINING  
PADA CNC END MILLING TERHADAP KEKASARAN  
PERMUKAAN AL6061 DAN KEAUSAN PAHAT HSS**

**SITI AMINATUL MUAWANAH**  
NRP 2038201020

Dosen Pembimbing

**Ir. Winarto, DEA**

NIP 19601213 198811 1 001

**Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur**  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2024

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - VM231838**

***THE EFFECT OF RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, AND MEASUREMENT POSITION IN HIGH FEED MACHINING PROCESS OF CNC END MILLING ON SURFACE ROUGHNESS OF AL6061 AND HSS TOOLS WEAR***

**SITI AMINATUL MUAWANAH**  
NRP 2038201020

Advisor

**Ir. Winarto, DEA**

NIP 19601213 198811 1 001

**Study Program Industrial Mechanical Engineering**  
Department of Industrial Mechanical Engineering  
Vocational Faculty  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2024

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, DAN POSISI PENGUKURAN DALAM PROSES HIGH FEED MACHINING PADA CNC END MILLING TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN AL6061 DAN KEAUSAN PAHAT HSS

#### PROYEK AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Terapan pada  
Program Studi Diploma 4 Teknologi Rekayasa Manufaktur  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Siti Aminatul Muawanah**  
NRP. 2038201020

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Winarto, DEA
2. Rivai Wardhani, S.T., M.Sc
3. Giri Nugroho, S.T., M.Sc
4. Ir. Eddy Widiyono, M.Sc

Pembimbing I



**SURABAYA**

**Juli, 2024**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## APPROVAL SHEET

**THE EFFECT OF RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, AND MEASUREMENT  
POSITION IN HIGH FEED MACHINING PROCESS OF CNC END MILLING ON  
SURFACE ROUGHNESS OF AL6061 AND HSS TOOLS WEAR**

### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a Bachelor of Applied Science degree  
in the Study Program of D-4 Manufacturing Engineering Technology  
Department of Industrial Mechanical Engineering  
Faculty of Vocational Studies  
Sepuluh Nopember Institute of Technology

BY: SITI AMINATUL MUAWANAH

NRP. 2038201020

Approved by the Final Project Examination Committee:

1. Ir. Winarto, DEA
2. Rivai Wardhani, S.T., M.Sc
3. Giri Nugroho, S.T., M.Sc
4. Ir. Eddy Widiyono, M.Sc

Advisor



Examiner



Examiner



Examiner



**SURABAYA**

**July, 2024**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama Mahasiswa / NRP : Siti Aminatul Muawanah / 2038201020

Departemen / Prodi : Teknik Mesin Industri / D4 Teknologi Rekayasa Manufaktur

Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Winarto, DEA / 19601213 198811 1 001

dengan ini menyatakan bahwa Proyek Akhir dengan judul "**PENGARUH RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, DAN POSISI PENGUKURAN DALAM PROSES HIGH FEED MACHINING PADA CNC END MILLING TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN AL6061 DAN KEAUSAN PAHAT HSS**" adalah hasil karya saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 17 Juli 2024

Mahasiswa,

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



( Ir. Winarto, DEA )  
NIP. 19601213 198811 1 001



( Siti Aminatul Muawanah )  
NRP. 2038201020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned.

Student Name / NRP : Siti Aminatul Muawanah  
Department / Study Program : Industrial Mechanical Engineering / D4 Manufacturing  
Engineering Technology  
Advisor / NIP : Ir. Winarto, DEA / 19601213 198811 1 001

Hereby declare that the Final Project titled "***THE EFFECT OF RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, AND MEASUREMENT POSITION IN HIGH FEED MACHINING PROCESS OF CNC END MILLING ON SURFACE ROUGHNESS OF AL6061 AND HSS TOOLS WEAR***" is my own work, original, and written following the principles of scientific writing.

If in the future any discrepancies with this statement are found, I am willing to accept sanctions in accordance with the applicable regulations at Sepuluh Nopember Institute of Technology.

Surabaya, 17 July 2024

Acknowledge by  
Advisor



( Ir. Winarto, DEA )  
NIP. 19601213 198811 1 001

Student



( Siti Aminatul Muawanah )  
NRP. 2038201020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## ABSTRAK

### PENGARUH RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, DAN POSISI PENGUKURAN DALAM PROSES HIGH FEED MACHINING PADA CNC END MILLING TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN AL6061 DAN KEAUSAN PAHAT HSS

Nama Mahasiswa / NRP : Siti Aminatul Muawanah  
Departemen : Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi ITS  
Dosen Pembimbing : Ir. Winarto, DEA

#### Abstrak

High Feed Machining (HFM) adalah salah satu teknik pemesinan yang semakin mendapatkan perhatian. Penerapan HFM diantaranya mampu diterapkan pada *high feed milling* yang bertujuan menghilangkan *chip* dalam waktu sesingkat mungkin menggunakan laju makan yang sangat tinggi. Faktor utama proses *high feed milling* yaitu kombinasi *feed-per-tooth* yang tinggi, dan *depth of cut* yang rendah.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan memvariasikan kedalaman potong radial, laju makan tinggi terhadap keausan pahat jenis HSS dan kekasaran permukaan benda kerja Al6061, serta jarak atau persentase pengukuran. Variasi *radial depth of cut* sebesar 10%, 12.5%, dan 15% dari diameter pahat, sebesar 10 mm dengan flute berjumlah 2. Sementara *feed rate* yang digunakan sebesar 2808 mm/min, 2875 mm/min, dan 2942 mm/min. Kecepatan potong sebesar 150 m/min.

Data eksperimen dilakukan analisa secara statistik melalui ANOVA dan regresi. FPT, RDOC, dan rentang Ap memiliki pengaruh yang signifikan pada keausan pahat dengan tingkat kepercayaan 5%. Pengaruh FPT sebesar 24.1%, RDOC sebesar 7.4%, dan rentang Ap sebesar 25.3% terhadap keausan pahat. FPT, RDOC, dan jarak dari collet memiliki pengaruh yang signifikan pada kekasaran permukaan dengan tingkat kepercayaan 5%. Pengaruh FPT sebesar 27.8%, RDOC sebesar 9.2%, dan jarak dari collet sebesar 35.9% terhadap kekasaran permukaan.

**Kata Kunci:** *Kedalaman Potong Radial, High Feed Machining, Posisi Pengukuran Kekasaran Permukaan, Keausan Pahat.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## ABSTRACT

### THE EFFECT OF RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, AND MEASUREMENT POSITION IN HIGH FEED MACHINING PROCESS OF CNC END MILLING ON SURFACE ROUGHNESS OF AL6061 AND HSS TOOLS WEAR

**Student Name /NRP** : Siti Aminatul Muawanah / 2038201020

**Department** : Industrial Mechanical Engineering Vocational Faculty ITS

**Advisor** : Ir. Winarto, DEA

#### Abstract

High Feed Machining (HFM) is one of the machining techniques that is gaining increasing attention. The application of HFM can be implemented in high feed milling, which aims to remove chips in the shortest possible time using a very high feed rate. The main factors in the high feed milling process are the combination of high feed-per-tooth and low depth of cut.

Based on this background, this research uses the experimental method by varying the radial depth of cut, high feed rate against HSS type tool wear and Al6061 workpiece surface toughness, as well as the distance or percentage of measurement. The radial depth of cut variations were 10%, 12.5%, and 15% of the tool diameter, 10 mm with 2 flutes. The feed rates used were 2808 mm/min, 2875 mm/min, and 2942 mm/min. The cutting speed was 150 m/min.

The experimental data was statistically analysed through ANOVA and regression. FPT, RDOC, and  $A_p$  percentage range have a significant influence on tool wear with a 5% confidence level. The effect of FPT was 24.1%, RDOC was 7.4%, and  $A_p$  range was 25.3% on tool wear. FPT, RDOC, and distance from the collet have a significant effect on surface roughness with a 5% confidence level. The effect of FPT is 27.8%, RDOC is 9.2%, and distance from the collet is 35.9% on surface roughness.

**Keywords:** *Radial Depth of Cut, High Feed Machining, Measurement Position, Surface Roughness, Tool Wear.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan proyek akhir dengan judul “PENGARUH RADIAL DEPTH OF CUT, FEEDING, DAN POSISI PENGUKURAN DALAM PROSES HIGH FEED MACHINING PADA CNC END MILLING TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN AL6061 DAN KEAUSAN PAHAT HSS” ini dengan baik. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik pada program Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyusunan proyek akhir ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Winarto, DEA selaku dosen pembimbing Proyek Akhir.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Industri.
3. Ibu Dr. Atria Pradityana, S.T., M.T. selaku dosen wali selama perkuliahan.
4. Kedua orang tua dan kakak yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Teman-teman seperjuangan yang telah memberikan motivasi dan bantuan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa proyek akhir ini masih memiliki kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga proyek akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 17 Juli 2024

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	v
APPROVAL SHEET.....	vii
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ix
STATEMENT OF ORIGINALITY .....	xi
ABSTRAK .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
KATA PENGANTAR.....	xvii
DAFTAR ISI .....	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
DAFTAR TABEL .....	xxv
DAFTAR SIMBOL .....	xxvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat .....	4
1.6 Sistematika Laporan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	7
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Dasar Teori .....	8
2.2.1 Mesin CNC Milling.....	8
2.2.2 Operasi Milling.....	8
2.2.2.1 Peripheral Milling.....	8
2.2.2.2 Face Milling.....	9

2.2.3	Software CAM.....	10
2.2.4	Kondisi Pemotongan .....	11
2.2.5	Depth of Cut .....	12
2.2.6	High Feed Machining .....	13
2.2.7	Aluminum 6061 .....	13
2.2.8	High Speed Steel .....	14
2.2.9	Keausan Pahat .....	14
2.2.10	Tekstur Permukaan dan Kekasaran .....	16
2.2.11	Analisis Variansi .....	16
2.2.12	Analisis Regresi.....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>19</b>
3.1	Metode yang Digunakan.....	19
3.1.1	Studi Literatur.....	20
3.1.2	Tahap Persiapan.....	20
3.1.3	Pemodelan CAD/CAM.....	20
3.1.4	Input Parameter.....	21
3.1.5	Simulasi MasterCAM.....	23
3.1.6	Proses Pemesinan .....	23
3.1.7	Proses Pengukuran.....	23
3.1.8	Analisis Data .....	24
3.1.9	Metode .....	26
3.2	Bahan dan Alat.....	26
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>29</b>
4.1	Hasil Penelitian .....	29
4.1.1	Parameter Pemesinan.....	29
4.1.2	Hasil Proses Pemesinan .....	30

4.1.3	Pengukuran Keausan Pahat .....	30
4.1.4	Hasil Pengukuran Keausan Pahat .....	32
4.1.5	Pengukuran Kekasaran Permukaan .....	36
4.1.6	Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan .....	37
4.2	Pengujian Statistik .....	39
4.2.1	Uji Asumsi .....	39
4.2.2	Analysis of Variance (ANOVA) .....	41
4.2.3	Analisis Regresi .....	54
4.3	Waktu Proses Pemesinan .....	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		63
5.1	Kesimpulan .....	63
5.2	Saran .....	63
DAFTAR PUSTAKA .....		65
LAMPIRAN .....		69
BIODATA PENULIS .....		91

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Dua tipe dasar operasi milling: (a) peripheral milling dan (b) face milling.....	8
<b>Gambar 2. 2</b> (a) up milling, dan (b) down milling .....	9
<b>Gambar 2. 3</b> (a) conventional face milling, (b) partial face milling, (c) end milling, (d) profile milling, (e) pocket milling, and (f) surface contouring .....	9
<b>Gambar 2. 4</b> Axial depth of cut ( $ap$ ) dan radial depth of cut ( $ae$ ).....	12
<b>Gambar 2.5</b> Macam-macam keausan pahat .....	15
<b>Gambar 2.6</b> Koordinat Kekasaran Permukaan.....	16
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir .....	20
<b>Gambar 3.2</b> Desain Benda Kerja.....	21
<b>Gambar 3.3</b> Backplot tampak atas dan isometrik .....	21
<b>Gambar 3.4</b> Simulasi 3D.....	21
<b>Gambar 3.5</b> Parameter Pemotongan.....	22
<b>Gambar 3.6</b> Keausan tepi (VB).....	23
<b>Gambar 3. 7</b> Posisi Pengukuran Keausan Pahat .....	24
<b>Gambar 3. 8</b> Posisi Pengukuran Kekasaran Pahat .....	24
<b>Gambar 3.9</b> CNC Milling Machine .....	27
<b>Gambar 3.10</b> Mikroskop USB .....	27
<b>Gambar 3.11</b> Surftest Tool.....	27
<b>Gambar 3.12</b> End-Mill Cutter .....	28
<b>Gambar 3.13</b> Aluminum 6061 .....	28
<b>Gambar 4. 1</b> Hasil Pemesinan Benda Kerja.....	30
<b>Gambar 4. 2</b> Pengukuran Keausan Pahat .....	31
<b>Gambar 4. 3</b> Kalibrasi Mikroskop .....	31
<b>Gambar 4. 4</b> Posisi Pengukuran Keausan Pahat .....	32
<b>Gambar 4. 5</b> Kalibrasi Surface Roughness Tester .....	36
<b>Gambar 4. 6</b> Titik Pengujian <i>Surface Roughness</i> .....	37
<b>Gambar 4. 7</b> Pengujian <i>Surface Roughness</i> .....	37
<b>Gambar 4. 8</b> Posisi Pengukuran Kekasaran Permukaan .....	37
<b>Gambar 4. 9</b> Uji Normalitas Keausan Pahat Kolmogorov-Smirnov.....	40
<b>Gambar 4. 10</b> Uji Normalitas Kekasaran Permukaan Kolmogorov-Smirnov .....	41
<b>Gambar 4. 11</b> Grafik FPT dan RDOC Keausan Pahat.....	43

<b>Gambar 4. 12</b> Grafik FPT dan Ap Keausan Pahat .....	44
<b>Gambar 4. 13</b> Grafik RDOC dan Ap Keausan Pahat .....	45
<b>Gambar 4. 14</b> Grafik FPT dan RDOC Kekasaran Permukaan.....	49
<b>Gambar 4. 15</b> Grafik FPT dan Jarak dari Collet Kekasaran Permukaan .....	50
<b>Gambar 4. 16</b> Grafik RDOC dan Jarak dari Collet Kekasaran Permukaan .....	51

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1. 1</b> Rekomendasi Umum Feeding per Gigi Pahat HSS .....	1
<b>Tabel 2. 1</b> Cutting Speeds Milling Machine .....	11
<b>Tabel 2.2</b> Mechanical Properties Al 6061 .....	13
<b>Tabel 3.1</b> Rekomendasi Umum Operasi Milling dengan HSS .....	22
<b>Tabel 3.2</b> Parameter Penelitian .....	22
<b>Tabel 4. 1</b> Parameter Pemesinan dan Pengukuran .....	30
<b>Tabel 4. 2</b> Hasil Pengukuran Keausan Pahat .....	33
<b>Tabel 4. 3</b> Dokumentasi Hasil Pengukuran Keausan Pahat .....	34
<b>Tabel 4. 4</b> Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Benda Kerja .....	38
<b>Tabel 4. 5</b> Uji Homogenitas Keausan Pahat .....	40
<b>Tabel 4. 6</b> Uji Homogenitas Kekasaran Permukaan .....	41
<b>Tabel 4. 7</b> ANOVA Keausan Pahat .....	42
<b>Tabel 4. 8</b> Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: FPT Keausan Pahat .....	46
<b>Tabel 4. 9</b> Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: RDOC Keausan Pahat .....	46
<b>Tabel 4. 10</b> Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: Ap Keausan Pahat .....	47
<b>Tabel 4. 11</b> ANOVA Kekasaran Permukaan .....	48
<b>Tabel 4. 12</b> Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: FPT Kekasaran Permukaan .....	52
<b>Tabel 4. 13</b> Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: RDOC Kekasaran Permukaan .....	52
<b>Tabel 4. 14</b> Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: Jarak Collet Kekasaran Permukaan .....	53
<b>Tabel 4. 15</b> Analisis Regresi Keausan Pahat .....	54
<b>Tabel 4. 16</b> Koefisien Regresi Keausan Pahat Variabel FPT .....	55
<b>Tabel 4. 17</b> Koefisien Regresi Keausan Pahat Variabel RDOC .....	56
<b>Tabel 4. 18</b> Koefisien Regresi Keausan Pahat Variabel Rentang Ap .....	56
<b>Tabel 4. 19</b> Analisis Regresi Kekasaran Permukaan .....	57
<b>Tabel 4. 20</b> Koefisien Regresi Kekasaran Permukaan Variabel FPT .....	58
<b>Tabel 4. 21</b> Koefisien Regresi Kekasaran Permukaan Variabel RDOC .....	59
<b>Tabel 4. 22</b> Koefisien Regresi Kekasaran Permukaan Variabel Jarak dari Collet .....	60
<b>Tabel 4. 23</b> Cycle Time dan Path Length .....	61

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR SIMBOL

$v_c$	Kecepatan potong
$\pi$	Phi
$D$	Diameter pahat
$n$	Kecepatan spindle
$v_f$	Kecepatan pemakanan
$f$	Pemakanan
$f_z$	Kecepatan pemakanan per gigi
$z$	Jumlah flute pahat
$h_m$	<i>Average chip thickness</i>
$a_e$	<i>Radial depth of cut</i>
$a_p$	<i>Axial depth of cut</i>
$Q$	<i>Material removal rate</i>
$R_a$	<i>Roughness average</i>
$R_q$	<i>Root mean square roughness</i>
$X$	Variabel bebas atau <i>independent variable</i>
$Y$	Variabel terikat atau <i>dependent variable</i>
$H$	Hipotesis pengujian
$Y_{ij}$	variabel yang akan dianalisis, dimisalkan berdistribusi normal,
$\mu$	efek umum atau efek rata-rata yang sebenarnya
$\tau_i$	efek yang sebenarnya daripada perlakuan ke-1
$\epsilon_{ij}$	efek yang sebenarnya daripada unit eksperimen ke-j yang berasal dari perlakuan ke-i
df	<i>Degree of freedom</i>
Sig.	<i>Significant value</i>
F	Nilai pengujian F

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur kini semakin didorong untuk meningkatkan efisiensi produksi serta mengurangi biaya produksi. Dalam upaya mencapai tujuan tersebut, terdapat keterbatasan pada mesin konvensional yang menghambat pencapaian tingkat produktivitas yang tinggi. Oleh karena itu, perkembangan teknologi pemrosesan material yang lebih canggih menjadi solusi. Salah satu pemrosesan yang muncul dan banyak diadopsi di industri adalah *High Feed Machining* (HFM). Metode *high feed machining* memiliki kemampuan tiga kali lebih cepat dibandingkan metode pemesinan konvensional menurut Duplák (Duplák *et al.*, 2018). Berbeda dengan pemrosesan pada umumnya, HFM memanfaatkan laju pemakanan yang jauh lebih tinggi, yakni sekitar 10 kali lipat merujuk pada Kuruc (Kuruc *et al.*, 2019). Kondisi ini tidak dapat dicapai oleh mesin konvensional karena keterbatasan kemampuannya, sehingga memaksa industri untuk beralih kepada pemesinan non-konvensional.

Salah satu penerapan metode *high feed machining* dapat ditemukan dalam teknologi Computerized Numerical Control (CNC). Terdapat beberapa jenis mesin CNC, salah satunya yaitu mesin CNC *milling*. Berdasarkan Groover (Groover, 2010) mesin *milling* CNC mengatur jalur pemotongan dengan data alfanumerik, cocok untuk *profile milling*, *pocket milling*, *surface contouring*, dan *die sinking* dengan pengendalian dua atau tiga sumbu meja kerja. Metode *high feed machining* mampu diterapkan di beberapa operasi pemotongan termasuk *milling*, atau disebut dengan *high feed milling*. Menurut Davim (Davim, 2011) pengaplikasian nilai *feed per tooth* yang semakin tinggi menghasilkan operasi *milling* yang dikenal *high feed milling*. Tujuan dari *high feed milling* adalah menghilangkan *chip* dalam waktu sesingkat mungkin mengutip dari Gyliene (Gyliene and Eidukynas, 2016).

**Tabel 1. 1** Rekomendasi Umum Feeding per Gigi Pahat HSS

Material	Side Mills		End Mills		Plain Helical Mills		Saws	
	mili	inches	mili	inches	mili	inches	mili	inches
	metres		metres		metres		metres	
Machine Steel	0.18	.007	0.15	.006	0.25	.010	0.05	.002

Tool Steel	0.13	.005	0.10	.004	0.18	.007	0.05	.002
Cast Iron	0.18	.007	0.18	.007	0.18	.010	0.05	.002
Bronze	0.20	.008	0.23	.009	0.28	.011	0.08	.003
Aluminum	0.33	0.13	0.28	0.11	0.46	0.18	0.13	.005

(Sumber: Krar, S.F; Amand, 1977)

Proses pemesinan dapat diklasifikasikan sebagai *high feed* jika nilai pemakanan (*feed*) melebihi rekomendasi. Tabel 1.1 memuat nilai rekomendasi umum *feed per tooth* pada operasi *milling* yang disadur dari Krar (Krar, S.F; Amand, 1977). Material yang digunakan dalam penelitian adalah paduan aluminum, menggunakan mata potong dari bahan HSS, dan pahat jenis *end mill*. Berdasarkan data pada Tabel 1.1, nilai pemakanan (*feed*) bernilai 0.11 inch/*tooth* atau 0.28 mm/*tooth*. Dengan demikian, penelitian menerapkan nilai *feed* melebihi rekomendasi tersebut, sehingga dapat dikategorikan sebagai *high feed machining*.

Penelitian terdahulu mengungkapkan faktor utama proses *high feed milling* yaitu kombinasi *feed-per-tooth* (*Fz*) yang tinggi, *depth of cut* (*ap*) yang rendah, dan *cutting tool* dengan sudut kecil yang dilakukan Jiang (Jiang *et al.*, 2023). Dampak dari penerapan *high feed machining* adanya hubungan terbalik antara nilai *depth of cut* (*ap*) dengan *feed-per-tooth* (*Fz*). Artinya semakin tinggi *Fz*, maka *ap* akan semakin kecil. *Depth of cut* atau kedalaman pemotongan adalah ketebalan lapisan material yang dihapus dari benda kerja dalam satuan milimeter seperti dinyatakan oleh Yudha (Yudha, 2018).

Kerugian *high feed* yaitu nilai *material removal* lebih tinggi dibandingkan konvensional bersumber dari Kuruc (Kuruc *et al.*, 2018). Akibat nilai *material removal* yang tinggi menyebabkan kekasaran permukaan juga meningkat. Kekasaran permukaan (*surface roughness*) didefinisikan sebagai penyimpangan yang terjadi pada permukaan dalam skala yang sangat kecil, yang mencakup tinggi, lebar, dan jarak antar penyimpangan pada permukaan merujuk pada Kalpakjian (Kalpakjian and Schmid, 2020).

Dalam proses *milling* bersumber dari Joshua (Joshua, 2015) terdapat tantangan yang timbul, yaitu banyaknya benda kerja yang tidak memenuhi persyaratan desain produk karena selama proses pemesinan, gesekan antara pahat dan benda kerja menghasilkan panas dan memerlukan lebih banyak energi selama operasi pemesinan. Gesekan, panas dan energi tinggi berpengaruh pada keausan pahat. Keausan pahat dapat didefinisikan sebagai peristiwa terlepasnya material dari permukaan material akibat deformasi plastis dan gaya mekanik. Keausan pada pahat potong akan menyebabkan perubahan bentuk benda kerja sehingga akan mengakibatkan geometri dan kualitas permukaan material akan mengalami penurunan selama



proses pembentukan geram berlangsung sebagaimana dikatakan oleh Haripriadi (Haripriadi, 2019).

Berdasarkan pembahasan yang sudah dijabarkan di atas, penelitian terdahulu hanya berfokus pada hubungan variasi *axial depth of cut*. Dengan demikian, perlu adanya penelitian *high feed machining* dalam proses CNC *milling* dengan variasi *radial depth of cut* sebagai parameter untuk mengetahui pengaruh terhadap kekasaran permukaan benda kerja dan keausan pahat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan nilai *radial depth of cut*, *feed rate*, dan posisi pengukuran yang tepat pada proses CNC *milling*?
2. Bagaimana pengaruh variasi *radial depth of cut*, *feed rate*, dan posisi pengukuran terhadap kekasaran permukaan Al 6061 pada proses CNC *milling*?
3. Bagaimana pengaruh variasi *radial depth of cut*, *feed rate*, dan posisi pengukuran terhadap keausan pahat *end mill* HSS pada CNC *milling*?

## 1.3 Tujuan

Dari rumusan masalah di atas, maka didapatkan tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui pengaruh *radial depth of cut*, *feed rate*, dan posisi pengukuran pada proses CNC *milling* terhadap keausan pahat *end mill* HSS
2. Mengetahui pengaruh *radial depth of cut*, *feed rate*, dan posisi pengukuran pada proses CNC *milling* terhadap kekasaran permukaan Al 6061
3. Mengetahui hubungan *radial depth of cut*, *feed rate*, dan posisi pengukuran pada proses CNC *milling* terhadap kekasaran permukaan dan keausan pahat

## 1.4 Batasan Masalah

Dalam rangka menjalankan penelitian ini dengan fokus dan tujuan yang jelas, maka perlu untuk mengidentifikasi batasan-batasan yang akan menjadi kerangka kerja penelitian ini. Berikut adalah poin-poin batasan masalah yang perlu diperhatikan:

1. Material benda kerja yang digunakan yaitu Aluminum 6061 dimensi 30 mm x 30 mm x 17 mm
2. Material pahat yang digunakan jenis HSS (*High Speed Steel*) 2 *flute* dengan ukuran diameter 10 mm
3. Merk Pahat SWT
4. *Toolpath* yang digunakan yaitu *contour*
5. Menggunakan *cutting speed* 150 m/min
6. Menggunakan *axial depth of cut* sebesar 17 mm
7. Menggunakan *spindle speed* 4775 rev/min

### **1.5 Manfaat**

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa manfaat yang diharapkan dapat dicapai, baik secara teoritis maupun praktis. Adapun manfaat-manfaat tersebut adalah sebagai berikut:

1. Mampu menganalisis keausan pahat *end mill* HSS yang dipengaruhi oleh *radial depth of cut* dan *feed rate*
2. Mampu menganalisis kekasaran permukaan Al 6061 yang dipengaruhi oleh *radial depth of cut* dan *feed rate*
3. Mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pahat berdasarkan parameter *radial depth of cut* dan *feed rate*
4. Memberikan pedoman pemilihan parameter untuk proses *high feed* CNC *milling*

### **1.6 Sistematika Laporan**

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima bab, yaitu:

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini memaparkan teori-teori yang menjadi dasar pembahasan dan penelitian. Teori-teori tersebut diambil dari literatur-literatur yang berkaitan dengan topik penelitian.

#### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi jenis penelitian, teknik pengumpulan data, dan metode analisis data.

#### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian beserta analisis dan pembahasannya secara rinci.

#### BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Menurut penelitian Jiang tahun 2023 mengenai ‘*Investigation on the High-Feed Milling of M28*’ pada paduan titanium M28 dengan *tool* berupa *insert carbide* (Jiang *et al.*, 2023). Studi menganalisis kinerja pemesinan berkecepatan tinggi dalam *cutting force* dan *tool wear*. Hasil penelitian menunjukkan pada *high feed* kombinasi rounded radius cutting edge yang besar, *low entering angle* ( $K_r$ ), dan feed-per-tooth yang tinggi menipiskan ketebalan chip, sehingga berpengaruh pada gaya pemotongannya. Keausan pahat yang terjadi didominasi dalam bentuk *notch*. Terdapat penurunan ketahanan aus diakibatkan delaminasi lapisan coating. Struktur mikro permukaan dan kekerasan benda kerja sedikit terpengaruh oleh pemakanan tinggi, dengan maksimal pengerjaan pemakanan 0.8 mm/z.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jurina pada tahun 2019 dengan judul ‘*The Tool Wear Observation of Milling Tools in High Feed Machining of Hardened Steels*’ menggunakan *carbide tools* dengan variasi *depth of cut* dan *feed*, sementara kecepatan potong tetap konstan (Jurina *et al.*, 2019). Penelitian ini mengungkapkan bahwa keausan pada pahat dipengaruhi oleh nilai *material removal volume*, dan nilai *material removal* tertinggi didapatkan pada *feed* terendah sebesar 0.3 mm dan *depth of cut* sebesar 0.5 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penelitian ini mencapai kriteria *tool wear*, yaitu nilai *flank wear* 0.3 mm.

Pada penelitian Kuruc tahun 2018 yang berjudul ‘*Comparison of High Feed Machining with Conventional Milling in Terms of Surfacequality and Productivity*’ dengan jenis material steel C45 (Kuruc *et al.*, 2018). *Tool* pada percobaan konvensional *milling* yaitu JS 553, sedangkan untuk *high feed* menggunakan JHF 980. Penelitian menerapkan beberapa metode, seperti *groove*, *slot*, *pocket*, dan lainnya. Hasil menunjukkan pada sebagian metode tertentu, *high feed* memberikan kualitas permukaan yang lebih baik dibandingkan konvensional. Namun, pada metode lainnya hasil permukaan dari konvensional lebih baik daripada *high feed*. Selain itu, perbedaan hasil kekasaran permukaan dari *high feed* dan konvensional tergolong rendah.

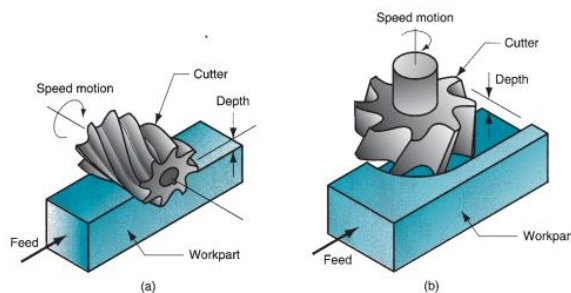
## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Mesin CNC Milling

*Computerized Numerical Controlled* atau yang sering disebut mesin CNC, adalah mesin yang dikendalikan oleh komputer dengan menggunakan bahasa numerik berupa kode angka, huruf, dan simbol sesuai dengan standar ISO. Teknologi CNC memungkinkan sinkronisasi yang lebih baik antara komputer dan komponen mekanik, sehingga dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional sejenis, mesin CNC memberikan ketelitian, akurasi, fleksibilitas, dan kecocokan yang lebih baik untuk produksi massal mengutip Amala dan Widyanto (Amala and Widyanto, 2014). Penggunaan mesin CNC sudah banyak menggantikan mesin konvensional, termasuk mesin *milling*. Mesin *milling* merupakan mesin yang digunakan untuk memotong dan membentuk beragam material seperti kayu, metal, dan plastik. Jalur pemotongan atau cutter path pada mesin CNC *milling* dikontrol oleh data *alphanumeric* dengan menggunakan dua atau tiga axis, cocok untuk pembuatan *profile*, *pocket*, *surface contouring*, dan *die sinking* bersumber dari Groover (Groover, 2010).

### 2.2.2 Operasi Milling

Berdasarkan Groover (Groover, 2010) *milling* adalah operasi pemesinan berupa pengumpanan benda kerja melewati alat bantu silinder yang berputar dengan beberapa mata potong. Terdapat dua jenis operasi *milling* yaitu *peripheral milling* dan *face milling* yang ditunjukkan pada gambar 2.1.

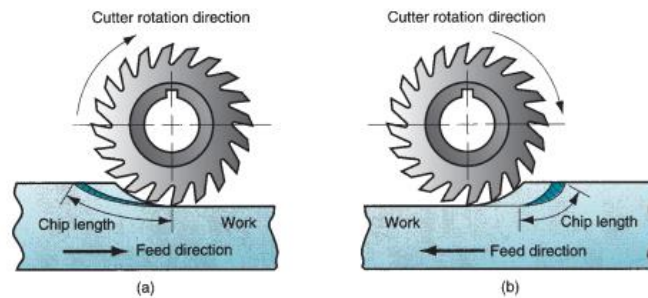


**Gambar 2. 1** Dua tipe dasar operasi milling: (a) peripheral milling dan (b) face milling (Sumber: Groover, 2010)

#### 2.2.2.1 Peripheral Milling

Posisi sumbu pahat yang digunakan pada *peripheral milling* atau *plain milling* sejajar dengan permukaan benda kerja, dan operasi dilakukan dengan *cutting edges* dari sisi luar *cutter*. Gigi *cutter* berbentuk lurus atau heliks, umumnya menggunakan heliks

karena *cutting force* dan torsi lebih rendah sehingga hasil lebih halus dan *chatter* rendah. Pada operasi ini arah pemakanan pahat terbagi menjadi dua, yaitu:



**Gambar 2. 2** (a) up milling, dan (b) down milling  
(Sumber: Groover, 2010)

a. Up Milling

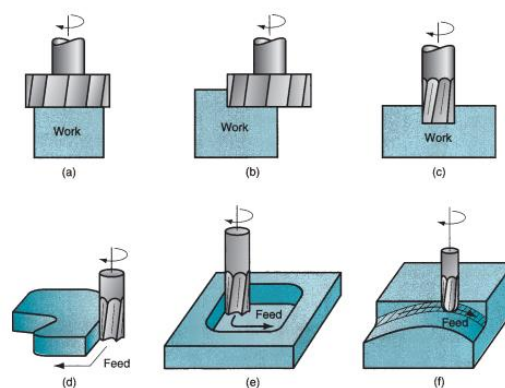
*Up milling* atau *conventional milling* memiliki arah pemakanan *milling cutter* berlawanan dengan arah pemakanan benda kerja. Pada awal pemotongan *chip* berukuran tebal dan menjadi tipis selama pemotongan.

b. Down Milling

*Down milling* atau *climb milling* memiliki arah pemakanan *milling cutter* searah dengan arah pemakanan benda kerja. *Chip* yang dihasilkan sangat tipis pada awal pemotongan, dan bertambah tebal selama pemotongan.

**2.2.2.2 Face Milling**

Pada *face milling* sumbu pemotong tegak lurus dengan permukaan benda kerja, dengan menggunakan *cutting edges* di ujung dan sisi luar pahat. Terdapat variasi bentuk dari *face milling*, diantaranya:



**Gambar 2. 3** (a) conventional face milling, (b) partial face milling, (c) end milling, (d) profile milling, (e) pocket milling, and (f) surface contouring  
(Sumber: Groover, 2010)

a. *Conventional face milling*

Pada *conventional face milling*, diameter *cutter* lebih besar daripada benda kerja sehingga *cutter* menggantung pada kedua sisi.

b. *Partial face milling*

Pada *partial face milling*, *cutter* menggantung pada satu sisi.

c. *End milling*

Pada *end milling*, diameter *cutter* lebih kecil daripada benda kerja sehingga terbentuk slot.

d. *Profile milling*

Bentuk dari *end milling* dengan pemakanan pada sisi luar dari benda kerja.

e. *Pocket milling*

Bentuk dari *end milling* dengan pemakanan pada luas area benda kerja dan membentuk celah.

f. *Surface contouring*

*Surface contouring* adalah proses pembuatan garis lengkung pada permukaan benda kerja menggunakan ujung pahat potong berbentuk bola.

### 2.2.3 Software CAM

Perangkat lunak CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) digunakan untuk mengubah output dari CAD (*Computer-Aided Design*) menjadi perintah untuk mesin CNC. Perintah ini secara kolektif disebut G-code, yang mencakup informasi tentang alat pemotong yang akan digunakan, kecepatan pemotongan, dan *path* yang harus dikerjakan. Tujuan dari perangkat lunak CAM untuk mengambil data geometri dari komponen yang terkomputerisasi dalam dimensi tertentu, kemudian memilih fitur-fitur pada data tersebut yang akan dijalankan oleh pahat. CAD dan CAM sering digabungkan menjadi sistem CAD/CAM. Tahap pada proses pemrograman CAM, diantaranya:

1. Membuat geometri, termasuk pembuatan gambar komponen.
2. Membuat lintasan pahat, yaitu merencanakan jalur alat pemotong.
3. Mengubah data menjadi program pemotongan mesin CNC.



### 2.2.4 Kondisi Pemotongan

- a. *Cutting Speed* ( $v_c$ ) adalah kecepatan perifer tangensial pada tepi pemotongan, atau diartikan sebagai diameter tepi maksimum yang diukur dalam (m/min) atau (*feet*/min). Kecepatan pemotongan berkaitan dengan diameter pahat frais dan kecepatan putar spindle, melalui persamaan berikut ini:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \text{ (m/min)} \dots\dots\dots (2.1)$$

**Tabel 2. 1** Cutting Speeds Milling Machine

Material	High Speed Steel Cutter		Carbide Cutter	
	m/min	ft./min	m/min	ft./min
Machine Steel	21-30	70-100	45-75	150-250
Tool Steel	18-20	60-70	40-60	125-200
Cast Iron	15-25	50-80	40-60	125-200
Bronze	20-35	65-120	60-120	200-400
Aluminum	150-300	500-1000	150-300	1000-2000

(Sumber: Krar, S.F; Amand, 1977)

- b. *Spindle Speed* ( $n$ ) adalah kecepatan putaran alat potong atau *cutter* pada mesin saat melakukan pemotongan atau penyayatan dalam satuan putaran per menit (RPM).

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D} \text{ (rev/min)} \dots\dots\dots (2.2)$$

- c. *Feed per tooth* ( $f_z$ ) adalah jarak pemakanan yang dilakukan oleh pahat dalam satu kali putaran dibagi dengan jumlah gigi. Hal ini berkaitan dengan beban satu *chip* pada setiap ujung pahat.

$$f_z = \frac{v_f}{z \times n} \text{ (feed/tooth)} \dots\dots\dots (2.3)$$

- d. *Feed Rate* adalah adalah kecepatan gerakan pemakanan benda kerja oleh mata potong dalam satuan panjang per putaran (mm/rev atau inch/rev) atau per menit (mm/menit atau inch/menit). Pemakanan pahat berkaitan dengan jarak per unit waktu yang berhubungan oleh pemakanan per gigi dan jumlah gigi pada pahat potong.

$$v_f = f_z \times z \times n = f \times n \text{ (mm/min)} \dots\dots\dots (2.4)$$

- e. *Chip Thickness* adalah ketebalan material yang diangkat oleh mata potong saat melakukan pemotongan atau penyayatan. Ukuran *chip thickness* berpengaruh pada besaran daya pemotongan, semakin besar nilai *chip thickness* maka semakin besar daya pemotongan yang dibutuhkan.

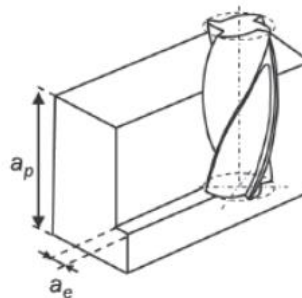
$$h_m = f_z \times \sqrt{\frac{a_e}{D}} \text{ (mm)} \dots\dots\dots (2.5)$$

f. *Material Removal Rate* (MRR) adalah jumlah material yang hilang tiap satuan waktu. Pada proses milling dapat ditentukan dari *cross-sectional area* dari pemotongan dan *feed rate* dengan membuat penyesuaian dari luas *cross-sectional* mengacu pada Groover (Groover, 2010).

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000} \text{ (cm}^3\text{/min)} \dots\dots\dots (2.6)$$

### 2.2.5 Depth of Cut

*Depth of cut* atau kedalaman pemotongan adalah lapisan pada benda kerja yang dihilangkan dalam satuan milimeter dikutip dari Youssef (Youssef, 2008). Terdapat dua macam nilai *depth of cut* pada proses milling, yaitu *axial depth of cut* ( $a_p$ ) dan *radial depth of cut* ( $a_e$ ). Pada *axial* maupun *radial depth of cut* akan berpengaruh terhadap beban yang diterima oleh *cutter*. Nilai *depth of cut* berpengaruh pada beban pahat, semakin tinggi *depth of cut* maka semakin meningkat juga beban yang diterima mata pahat.



**Gambar 2. 4** Axial depth of cut ( $a_p$ ) dan radial depth of cut ( $a_e$ )  
(Sumber: Davim, 2011)

a. *Axial Depth of Cut*

Jarak yang dilalui pahat saat memasuki benda kerja sepanjang sumbu z (*vertical*) dalam satu langkah pemotongan. Dikenal juga sebagai *step down*, atau kedalaman potong (*cut depth*).

b. *Radial Depth of Cut*

Jarak yang dilewati pahat saat melangkah ke dalam benda kerja. Dikenal juga sebagai *step over* atau lebar potong (*cut width*).

### 2.2.6 High Feed Machining

Metode ini muncul akibat peralihan mesin konvensional ke teknologi *progressive* yang berpatok pada efisiensi dan produktifitas. *High Feed Machining* (HFM) merupakan metode pemesinan yang berfokus pada laju *material removal* cepat, ringan, dan tekanan rendah. Hal ini menghasilkan peningkatan *material removal rate* dan mengurangi waktu siklus. Dalam HFM terdapat penyesuaian kecepatan dan laju pemakanan (hingga 10 kali lebih besar), serta kedalaman pemotongan. Saat ini *high feed machining* diterapkan di berbagai industri, termasuk *modal and die, ramping, plunging, hole enlarging, slotting, drilling, dan milling*.

*High feed machining* tiga kali lipat lebih cepat dari mesin konvensional, melalui penurunan nilai  $a_p$  dan pemakanan per gigi ( $f_z$ ) yang tinggi. Nilai maksimal *cutting depth* yaitu 2 mm dengan *feed per tooth* sangat tinggi (lebih dari 4mm/tooth) seperti yang dilakukan oleh Duplák (Duplák *et al.*, 2018). Teknik ini marak diterapkan pada operasi milling dan turning, atau dikenal sebagai *high feed milling* yang diterapkan pada mesin CNC. Menurut Gyliene dan Eidukynas (Gyliene and Eidukynas, 2016) *high feed milling* adalah penghilangan *chip* dalam waktu sesingkat mungkin.

### 2.2.7 Aluminum 6061

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminum 6061. Paduan Al 6061 (tersusun atas Al, Mg, Si, Cr, Cu) telah menjadi obyek dari banyak riset, terutama karena keringannya, murah dan kemudahan untuk difabrikasi disadur dari Schwartz (Schwartz, 1992). Al 6061 memiliki ketahanan korosi yang tinggi, karena logam ini mudah teroksidasi, dan akan terbentuk aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) pada permukaannya, jika bereaksi dengan udara, lapisan ini akan terkelupas sehingga terbentuk lapisan baru yang membuat logam tidak mudah berkarat.

**Tabel 2.2** Mechanical Properties Al 6061

Properties	Metric	Imperial
Density	2.7 g/cm <sup>3</sup>	0.0975 lb/in <sup>3</sup>
Tensile strength	310 MPa	45000 psi
Yield strength	276 MPa	40000 psi
Shear strength	207 MPa	30000 psi
Fatigue strength	96.5 MPa	14000 psi

Elastic modulus	68.9 GPa	10000 ksi
Poisson's ratio	0.33	0.33
Elongation	12-17%	12-17%
Hardness, Brinell	95	95

(Sumber: azom.com)

### 2.2.8 High Speed Steel

*High Speed Steel* (HSS) adalah baja perkakas campuran yang mampu mempertahankan kekerasan pada suhu tinggi, lebih baik dibandingkan baja karbon tinggi dan baja paduan rendah. Kekerasan panas yang baik memungkinkan alat-alat yang terbuat dari HSS digunakan pada kecepatan pemotongan yang lebih tinggi bersumber dari Groover (Groover, 2010). Menurut Amstead (Amstead, B.H.; Ostwald, Phillip F; Begeman, 1986) kandungan 18% tungsten dan 5,5% kromium serta paduan lainnya seperti vanadium, molybdenum, dan kobalt pada HSS menghasilkan kemampuan yang sangat baik dalam menahan pelunakan suhu tinggi. Kemampuan yang dikenal sebagai *hardenability* atau *hardness reel*, mampu mempertahankan mata potong hingga suhu 1200 °F (650 °C).

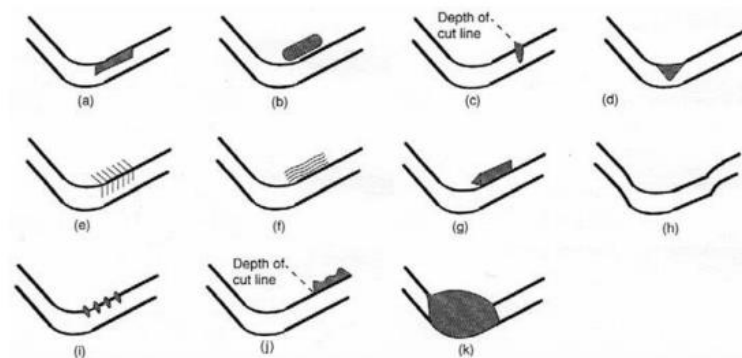
Kandungan Vanadium (V), Mo, dan Cr meningkatkan nilai *hardness* (Rc 65-70) dan *wear resistance* mengacu pada Kohser (Black, J T.; Kohser, 2008). Terdapat dua tipe High Speed Steel (HSS) sebagaimana dikatakan oleh Kalpakjian (Kalpakjian and Schmid, 2020) molybdenum (seri M) dan tungsten (seri T). Seri M mengandung hingga sekitar 10% Mo, dengan Cr, V, W, dan Co sebagai elemen paduan. Seri T mengandung 12 hingga 18% W, dengan Cr, V, dan Co sebagai elemen paduan. Material pahat HSS cocok diaplikasikan pada geometri pahat yang rumit, seperti *drill*, *taps*, *milling cutters*, dan *broaches* mengacu pada Groover (Groover, 2010).

### 2.2.9 Keausan Pahat

Keausan didefinisikan oleh ASTM sebagai kerusakan permukaan benda yang secara umum berhubungan dengan peningkatan hilangnya material yang disebabkan oleh pergerakan relatif benda dan sebuah substansi kontak dikatakan oleh Abidin (Abidin, 2010). Peristiwa ini timbul secara alami akibat pemotongan logam. Faktor terjadinya disebabkan oleh material yang diproses, alat pemesinan, alat potong, kondisi pendinginan

dan pemotongan. Klasifikasi mekanisme keausan pahat, diantaranya abrasi, adhesi, diffuse, reaksi kimia, dan deformasi plastik dikutip dari Groover (Groover, 2010).

Selama pemesinan, alat potong berinteraksi langsung dengan material. Panas yang muncul sebagian besar terbawa oleh geram, sebagian merambat melalui pahat, dan sisanya mengalir melalui benda kerja menuju ke sekeliling. Karena tekanan yang besar akibat gaya pemotongan serta temperatur yang tinggi, maka permukaan aktif dari pahat akan mengalami keausan. Keausan tersebut makin lama makin membesar yang selain memperlemah pahat juga akan memperbesar gaya pemotongan sehingga dapat menimbulkan kerusakan fatal merujuk pada Abidin (Abidin, 2010).



**Gambar 2.5** Macam-macam keausan pahat

(Sumber: Stephenson, D.A. and Agapiou, 2006)

Menurut Stephenson (Stephenson, D.A. and Agapiou, 2006) tipe keausan berdasarkan titik tunggal pada alat potong terbagi: (a) keausan *flank*, (b) keausan *crater*, (c) keausan *notch*, (d) keausan *nose radius*, (e) patahan *thermal*, (f) patahan *parallel*, (g) *Built-Up Edge* (BUE), (h) deformasi plastis nyata, (i) *edge chipping*, (j) *chip hammering* dan (k) perpecahan nyata.

### 2.2.9.1 Kriteria Umur Pahat

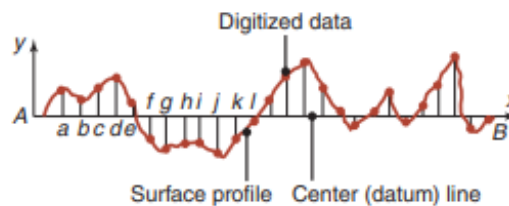
Umur pahat adalah ukuran dari seberapa lama pahat akan memotong dengan baik atau waktu diantara perubahan pahat berdasarkan Amstead (Amstead, B.H.; Ostwald, Phillip F; Begeman, 1986). Pahat perlu diasah ulang atau diganti ketika permukaan akhir hasil benda kerja memburuk, gaya pemotongan dan suhu meningkat secara signifikan disadur dari Kalpakjian (Kalpakjian and Schmid, 2020). Terdapat batasan atau toleransi yang diperbolehkan pada bagian pemotong pahat yang telah mengalami keausan, dikenal

dengan allowable wear land. Menurut Davim (Davim, 2011) terdapat *tool wear* pada milling yang dijelaskan pada standard ISO 8688 bagian 1 dan 2 (ISO 1989):

- Keausan seragam: 0.3 mm rata-rata pada semua gigi.
- Keausan lokal: maksimal 0.5 mm pada setiap gigi.

**2.2.10 Tekstur Permukaan dan Kekasaran**

Tekstur permukaan adalah penyimpangan berulang atau acak dari permukaan nominal yang membentuk topografi tiga dimensi permukaan. Tekstur permukaan meliputi *roughness, waviness, lay, and flaws* seperti yang dinyatakan oleh Bhushan (Bhushan, 2000). Kekasaran permukaan (*roughness surface*) dapat didefinisikan sebagai rata-rata vertikal deviasi dari permukaan nominal pada panjang permukaan tertentu disadur dari Groover (Groover, 2010). Berdasarkan *surface roughnes comparator*, nilai kekasaran permukaan pada proses *turning* dan *milling* berkisar  $0.4 \mu m \leq R_a \leq 12.5 \mu m$ . Terdapat dua metode dalam karakteristik *surface roughness* sebagaimana dikatakan oleh Kalpakjian (Kalpakjian and Schmid, 2020):



**Gambar 2.6** Koordinat Kekasaran Permukaan  
(Sumber: Kalpakjian and Schmid, 2020)

*Arithmetic mean value* ( $R_a$ ) didasarkan pada ilustrasi skematik *rough surface*, ditunjukkan pada gambar 2.8.

$$R_a = \frac{a+b+c+d+\dots}{n}, \dots\dots\dots (2.7)$$

**2.2.11 Analisis Variansi**

Analisis ragam (ANOVA), atau sering disebut sebagai analisis variansi, adalah metode statistika yang digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan dalam rata-rata antara kelompok atau populasi yang diamati sesuai dengan Lusiana (Lusiana and Mahmudi, 2021). ANOVA adalah pengembangan dari uji-t karena umumnya digunakan

untuk menguji adanya perbedaan rata-rata dari dua atau lebih kelompok/populasi. Menurut Budiharti (Budiharti, 2018) terdapat dua model dalam analisis varians:

a. Model I (Model Tetap)

Model ini beranggapan bahwa tidak ada perbedaan antara efek-efek dari k perlakuan yang digunakan dalam eksperimen. Hipotesis ini umumnya dirumuskan sebagai:

$$H: \tau_i = 0 \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, k \dots \dots \dots (2.8)$$

Jika H benar, maka RJK K yang berasal dari kekeliruan eksperimen dan RJK yang berasal dari antar perlakuan masing-masing merupakan taksiran untuk  $\sigma_{\epsilon^2}$ .

Karena  $\sigma_{ij} \sim DNI(0, \sigma_{\epsilon^2})$ , maka perbandingan yang ditentukan oleh:

$$F = \frac{P}{E} = \frac{RJK(\text{antar perlakuan})}{ERJK(\text{kekeliruan eksperimen})} \dots \dots \dots (2.9)$$

berdistribusi F dengan dk pembilang  $v_1 = k - 1$  dan dk penyebut  $v_2 = \sum(n_i - 1)$ . Jika harga F di atas lebih besar daripada  $F_{\alpha(v_1, v_2)}$  dengan  $\alpha$  merupakan taraf signifikansi, maka hipotesa H akan ditolak. Kesimpulannya ialah bahwa terdapat perbedaan di antar efek k buah perlakuan.

b. Model II (Model Acak)

Model II memiliki hipotesis yaitu tidak terdapat perbedaan di antara efek-efek semua perlakuan di dalam populasi dimana sebuah sampel telah diambil sebanyak k perlakuan. Perumusan hipotesis untuk model ini biasa ditulis sebagai:

$$H: \sigma^2_{\tau} = 0 \dots \dots \dots (2.10)$$

Pengujian untuk model ini juga sama dengan pengujian untuk model tetap. Jadi ditentukan perbandingan:

$$F = \frac{P}{E} \dots \dots \dots (2.11)$$

dengan distribusi dan daerah penolakan hipotesis seperti dalam model tetap yang disebutkan di atas.

Beberapa asumsi perlu diambil agar pengujian statistik yang akan diambil menjadi berlaku. Asumsi yang biasa diambil dalam ANOVA ialah sifat aditif, linieritas, normalitas, independen dan homogenitas variansi. Model yang digunakan adalah model linier dengan persamaan

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}; (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n_k) \dots \dots \dots (2.12)$$

Mengenai  $\tau_i$  ada dua pilihan yang dapat diambil, ialah:

$$1) \quad \sum_{i=1}^K \tau_i = 0$$

menggambarkan hanya terdapat hubungan dengan k buah perlakuan selama eksperimen. Kejadian ini dinamakan Model I atau tetap atau singkatnya model tetap.

$$2) \quad \tau_i \sim DNI(0, \sigma^2_{\tau})$$

menggambarkan terdapat hubungan dengan sebuah populasi perlakuan sedangkan sebuah sampel acak perlakuan sebanyak k buah diambil sebagai eksperimen. Kejadian dinamakan Model II atau model komponen variansi atau model efek acak.

### 2.2.12 Analisis Regresi

Analisis/uji regresi merupakan suatu kajian dari hubungan antara satu variabel, yaitu variabel yang diterangkan (*the explained variabel*) dengan satu atau lebih variabel, yaitu variabel yang menerangkan (*the explanatory*) bersumber dari Yuliara (Yuliara, 2016). Tujuan dari uji regresi yaitu memprediksi atau mengukur nilai dari pengaruh satu variabel (bebas/*independent/predictor*) terhadap variabel lain (tak bebas/*dependent/response*). Apabila variabel bebasnya hanya satu, maka analisis regresinya disebut dengan regresi sederhana. Sedangkan, jika variabel bebasnya lebih dari satu, maka analisis regresinya dikenal dengan regresi linear berganda.

Persamaan regresi linear sederhana secara matematik sebagai:

$$\hat{Y} = a + bX \dots \dots \dots (2.13)$$

yang mana:

$\hat{Y}$  = garis regresi/ *variable response*

$a$  = konstanta (intersep), perpotongan dengan sumbu vertikal

$b$  = konstanta regresi

$X$  = variabel bebas/ *predictor*

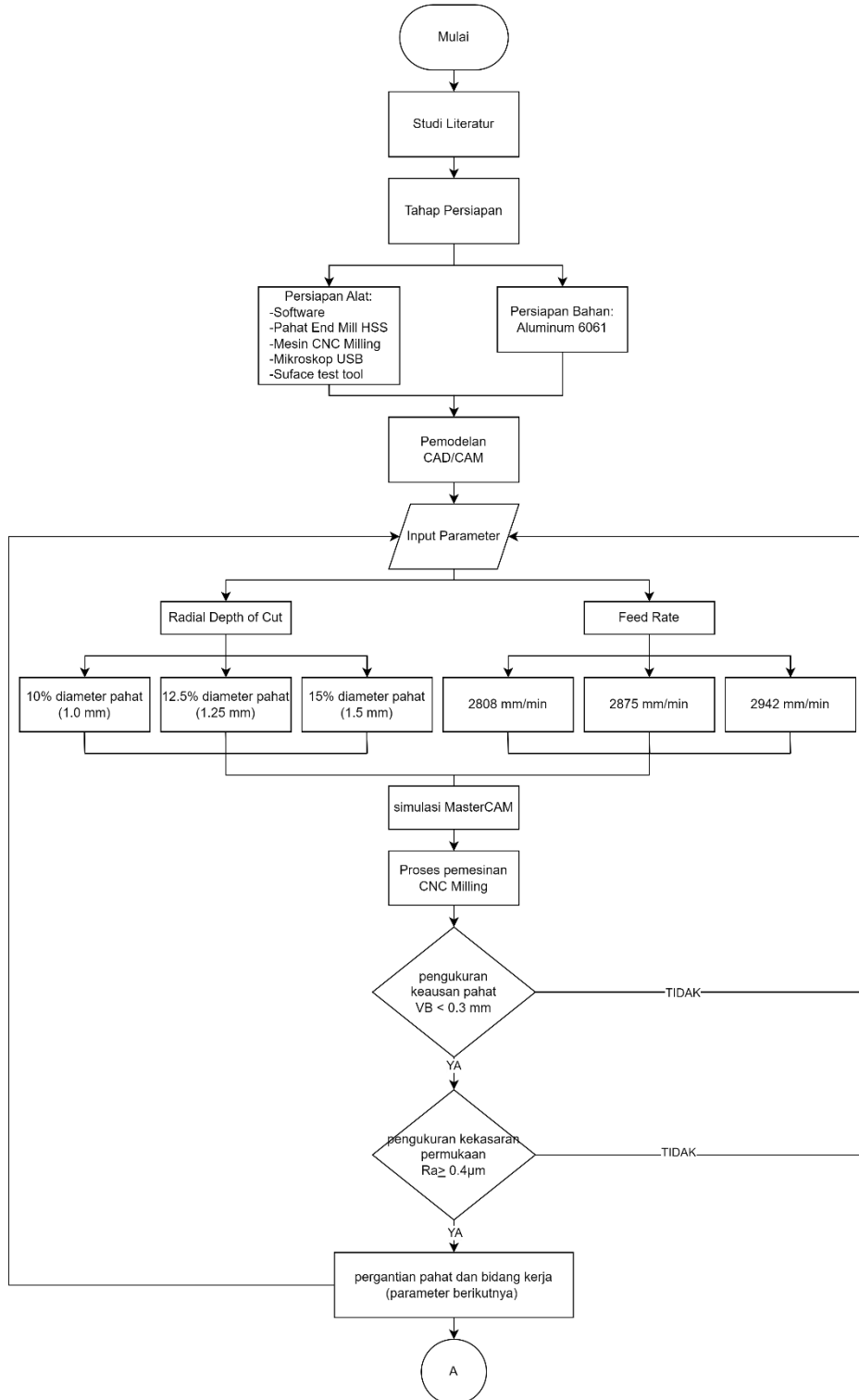


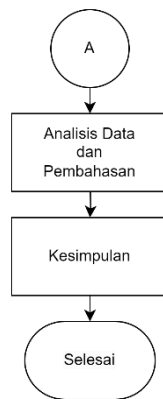
# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metode yang Digunakan

Berikut adalah diagram alir penelitian yang akan dijelaskan pada gambar 3.1





**Gambar 3.1** Diagram Alir

### 3.1.1 Studi Literatur

Penelitian ini memanfaatkan studi literatur sebagai metode untuk mencari dan menghimpun informasi yang relevan untuk digunakan dalam penelitian. Proses mencakup identifikasi topik penelitian, pencarian sumber literatur yang relevan, seleksi sumber-sumber yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

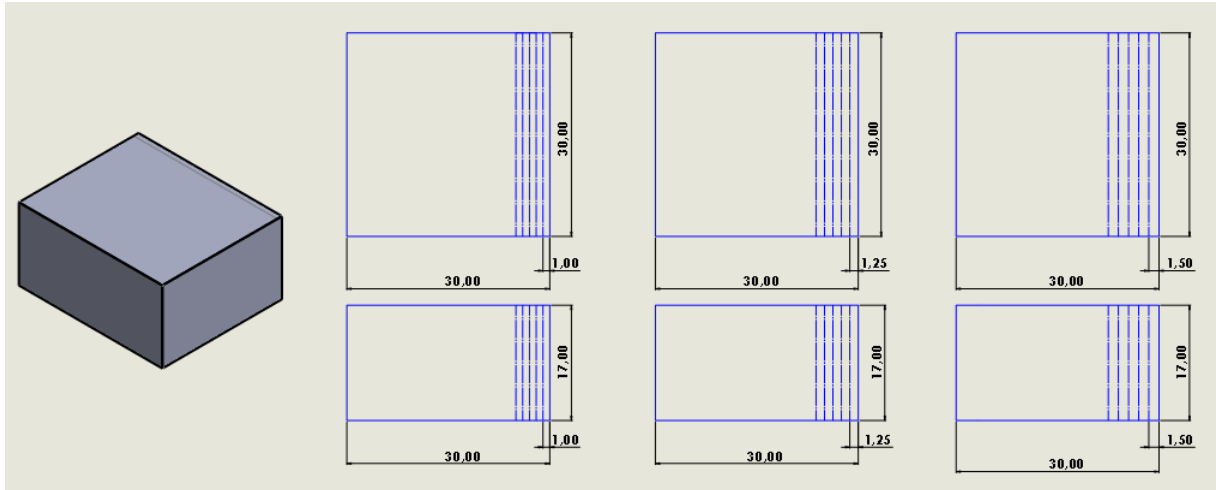
### 3.1.2 Tahap Persiapan

Persiapan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu material Aluminum 6061 dengan dimensi 30 mm x 30 mm x 17 mm. Adapun beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

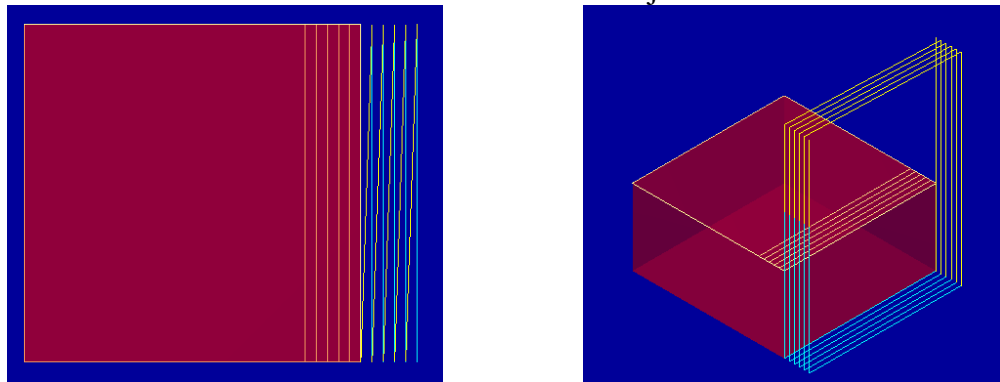
1. Software MasterCAM dan SolidWork
2. Mesin CNC *Milling* YCM MV Series 86A
3. Pahat *End Mill* HSS SWT dengan ukuran diameter 10 mm 2 *flute*
4. Mikroskop USB
5. Mitutoyo *surface test* SJ-210

### 3.1.3 Pemodelan CAD/CAM

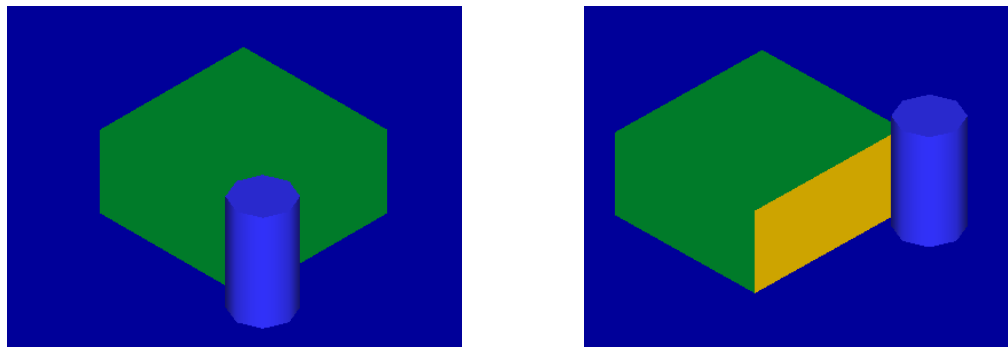
Pemodelan CAD/CAM melibatkan pembuatan model 3D dari benda kerja dan pemrograman komputer untuk mengatur pergerakan mesin CNC, serta menentukan *toolpath*. Jenis *toolpath* yang dilakukan adalah *contour* dengan dimensi 30 mm x 30 mm x 17 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Desain Benda Kerja



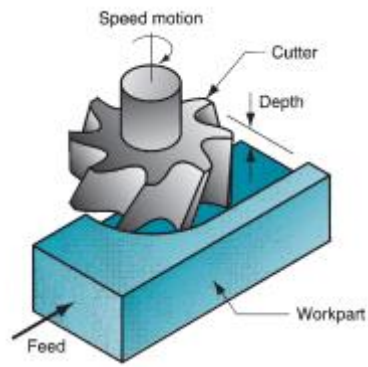
**Gambar 3.3** Backplot tampak atas dan isometrik



**Gambar 3.4** Simulasi 3D

### 3.1.4 Input Parameter

Variasi parameter pemotongan adalah *depth of cut* dan *high feed rate*. Kedalaman potong (*depth of cut*) mengacu pada sejauh mana pahat masuk ke dalam benda kerja saat proses pemotongan, sementara laju makan tinggi (*high feed rate*) adalah kecepatan pergerakan pahat relatif terhadap benda kerja. Berdasarkan ISO 8688-2:1989 batas nilai maksimum kedalaman potong radial untuk *end milling*  $0.8 D$ . Maka, variasi persentase *radial depth of cut* yang digunakan sebesar 10%, 12.5%, dan 15% dari diameter pahat.



**Gambar 3.5** Parameter Pemotongan  
(Sumber: Kalpakjian and Schmid, 2020)

Penerapan *high feed milling* ditentukan pada nilai *feed-per-tooth* (fz) yang digunakan dalam menghasilkan nilai *feed rate*. Berikut tabel rekomendasi umum operasi milling yang disadur dari Krar (Krar, S.F; Amand, 1977).

**Tabel 3.1** Rekomendasi Umum Operasi Milling dengan HSS

Material	Cutting Speed		Feed per Tooth	
	m/min	ft./min	milimetres	inches
Aluminum	150-300	500-1000	0.28	0.11

(Sumber: Krar, S.F; Amand, 1977)

Pada tabel 3.2 menampilkan variasi parameter yang digunakan pada penelitian yang telah disimulasikan pada software MasterCam X5. Nilai *feed rate* diperoleh berdasarkan kenaikan sebesar 5%, 7.5%, dan 10% dari *feed rate* maksimum yang direkomendasikan untuk proses *milling* pada jenis pahat *end milling*, yaitu 2674 mm/min.

**Tabel 3.2** Parameter Penelitian

Level	Feed (mm-per-tooth)	Radial Depth of Cut (mm)	Feed rate (mm/min)
1	0.294	1.00	2808
		1.25	
		1.50	
2	0.301	1.00	2875
		1.25	
		1.50	
3	0.308	1.00	2942
		1.25	
		1.50	

### 3.1.5 Simulasi MasterCAM

Simulasi MasterCAM ditujukan untuk memvalidasi dan mensimulasikan pemrograman CNC. Melalui simulasi didapatkan bahwa program pemesinan yang telah dibuat bekerja dengan benar dan memberikan estimasi waktu pemesinan.

### 3.1.6 Proses Pemesinan

Langkah-langkah yang dilakukan pada mesin CNC Milling sebagai berikut:

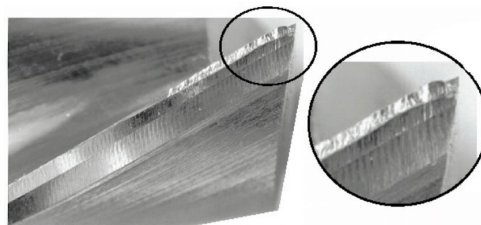
1. Memasang benda kerja pada ragum mesin.
2. Memasukkan program pemesinan ke dalam mesin CNC.
3. *Setting* benda kerja.
4. *Running* program

### 3.1.7 Proses Pengukuran

Proses pengukuran dilakukan untuk mengevaluasi hasil pemesinan dengan dua indikator yaitu keausan pahat dan kekasaran permukaan. Berikut merupakan proses pengukuran indikator tersebut:

#### 1. Pengukuran Keausan Pahat

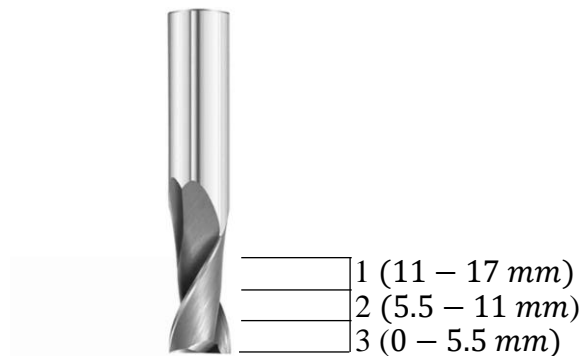
Proses pengamatan dan pengukuran keausan pahat dilakukan menggunakan mikroskop USB. Tujuan dari pengukuran keausan pahat adalah untuk menganalisis dan mendeteksi tingkat keausan pahat setelah melewati proses pemotongan benda kerja. Penelitian ini mengukur keausan tepi (*flank wear*) disimbolkan dengan VB, jenis ini dipilih karena paling sering terjadi pada pahat ditunjukkan pada gambar 3.6. Keausan pahat hanya diukur dibagian muka tegak pahat pada setiap *flute*. Berdasarkan standard ISO 8688, pahat dikatakan aus jika mencapai nilai keausan seragam sebesar 0.3 mm rata-rata pada semua gigi.



**Gambar 3.6** Keausan tepi (VB)

Penelitian menggunakan dua belas titik posisi pengukuran keausan pahat, masing-masing *flute* terdiri dari enam titik. Enam titik terbagi menjadi tiga rentang dari nilai *axial depth of cut* yang diterapkan. Nilai diukur dari tepi pahat bagian muka. Rentang nilai ditunjukkan

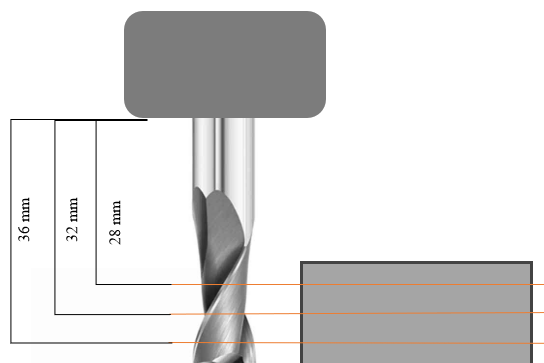
pada gambar 3.7, nilai 3 berada pada rentang 0 – 5.5 mm, nilai 2 berada pada rentang 5.5 – 11 mm, dan nilai 1 berada pada rentang 11 – 17 mm.



**Gambar 3. 7** Posisi Pengukuran Keausan Pahat

## 2. Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan alat Mitutoyo Surftest SJ-210 untuk menentukan tingkat kekasaran pada permukaan suatu material. Dengan melakukan pengukuran ini didapatkan hasil tingkat kekasaran pada benda kerja setelah proses pemesinan dengan parameter yang berbeda. Berdasarkan *surface comparator*, rentang nilai kekasaran permukaan aritmatik ( $R_a$ ) untuk pengerjaan *turning* dan *milling* berada pada N5-N10 sebesar  $0.4\mu\text{m} < R_a < 12.5\mu\text{m}$ . Pengukuran kekasaran permukaan hanya dilakukan pada satu sisi vertikal. Terdapat tiga titik pengukuran pada setiap bidang, didasarkan dari jarak dari *collet* yaitu 28 mm, 32 mm, dan 36 mm.



**Gambar 3. 8** Posisi Pengukuran Kekasaran Pahat

### 3.1.8 Analisis Data

Analisis data meliputi analisis varians (ANOVA) dan analisis regresi dengan perangkat lunak IBM SPSS statistic dan Minitab18. Data diolah melalui uji ANOVA dengan satu variabel dependen dan tiga faktor tetap. Analisis terbagi menjadi dua, yaitu terhadap keausan pahat dan kekasaran permukaan. Analisis dengan variabel ( $Y_1$ ) berupa keausan pahat memiliki tiga faktor,

yaitu *radial depth of cut* ( $X_1$ ), *feed per tooth* ( $X_2$ ), dan rentang *axial depth of cut* yang digunakan dalam pemotongan ( $X_3$ ). Analisis dengan variabel ( $Y_2$ ) berupa kekasaran permukaan memiliki tiga faktor *radial depth of cut* ( $X_1$ ), *feed per tooth* ( $X_2$ ), dan jarak dari *collet* ( $X_3$ ). Uji ANOVA memiliki persyaratan diantaranya nilai residual standard berdistribusi normal dan varian antar kelompok harus homogen. Dengan demikian, diperlukan uji normalitas dan homogenitas sebelum dilakukan uji ANOVA.

a. Uji Normalitas

Terdapat dua uji normalitas:  $Y_1$  terhadap  $X_1, X_2, X_3$  dan  $Y_2$  terhadap  $X_1, X_2, X_3$ . Beberapa metode yang digunakan dalam analisis normalitas data meliputi Liliefors, kolmogorof-smirnov, chi square, dan lain-lain dikutip dari Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017).

b. Uji Homogenitas

Terdapat dua uji homogenitas:  $Y_1$  terhadap  $X_1, X_2, X_3$  dan  $Y_2$  terhadap  $X_1, X_2, X_3$ . Beberapa metode yang digunakan untuk uji homogenitas meliputi uji Harley, Cochran, Levene dan Barlett disadur dari Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017).

c. ANOVA

Analisis varian digunakan untuk menguji hipotesis nol tentang perbedaan dua buah rata-rata atau lebih. Berdasarkan Wijaya (Wijaya *et al.*, 2024) keputusan untuk menerima atau menolak hipotesis dilakukan dengan membandingkan nilai statistik uji ( $F_{hitung}$ ) dengan nilai  $F_{tabel}$ , dan nilai Sign./P-value dengan nilai alpha. Hasil uji ANOVA yang menyatakan penolakan terhadap hipotesis awal atau menunjukkan hasil signifikan dapat dilanjutkan pada *post hoc test* (uji pasca hoc) merujuk pada Usjadi (Usjadi, 2017). Tujuan utama dari *post hoc test* adalah untuk menentukan secara spesifik di mana perbedaan yang signifikan terjadi di antara kelompok-kelompok yang dibandingkan. Jenis-jenis *post hoc test* yang umum yaitu Tukey, Bonferroni, Duncan, Scheffe, dan Newman.

Analisis regresi sederhana megutip Kadir (Kadir, 2010) digunakan untuk menjelaskan hubungan antara kedua variabel. Analisis regresi linear sederhana dilakukan untuk menguji atau memprediksi pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Tujuan analisis yaitu mengetahui arah hubungan variabel bebas dan variabel terikat, dengan hubungan variabel bebas negatif atau positif, dan memprediksi nilai variabel terikat jika nilai variabel bebas meningkat atau menurun.

### 3.1.9 Metode

Metode penelitian proyek akhir ini berupa eksperimen. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan parameter *radial depth of cut* dan *feed rate* dalam skala tinggi. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium CAD/CAM CNC DTMI FV ITS dengan menggunakan mesin CNC Milling serta alat pengujian mikroskop USB dan Mitutoyo Surftest SJ – 210.

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah:

#### 1. Variabel Bebas

Variabel bebas atau *independent variable* (X) adalah variabel yang tidak tergantung dari variabel lainnya. Variabel bebas yang digunakan adalah:

*Radial depth of cut* = 10%, 12.5%, dan 15% dari diameter pahat

*Feed rate* = 2808 mm/min, 2875 mm/min, dan 2942 mm/min

Jarak dari *collet* = 28 mm, 32 mm, dan 36 mm

Rentang  $A_p$  = 33.33%, 66.67%, dan 100% dari  $A_p$

#### 2. Variabel Terikat

Variabel terikat atau *dependent variable* (Y) adalah variabel yang tergantung pada variabel lainnya. Variabel terikat dari penelitian ini adalah kekasaran permukaan aluminum dan keausan pahat *end mill*.

#### 3. Variabel Terkontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dikendalikan sehingga pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat tidak dipengaruhi oleh faktor luar yang tidak diteliti. Variabel terkontrol yang digunakan antara lain:

Diameter *end-mill cutter* = 10 mm

Kecepatan potong = 150 m/min

*Flute* = 2

*Spindle Speed* = 4775 rev/min

### 3.2 Bahan dan Alat

#### 1. Mesin CNC

Mesin CNC (*Computerized Numerical Control*) adalah sistem otomatisasi yang mengendalikan alat-alat dengan menggunakan komputer.





**Gambar 3.9** CNC Milling Machine

(Sumber: DirectIndustry)

- a. Merek = YCM
- b. Jenis = CNC Milling
- c. Model = MV Series 86A

2. Mikroskop USB

Mikroskop USB merupakan tipe mikroskop yang terhubung dengan computer atau *device* lain melalui USB. Mikroskop jenis ini membutuhkan *software* tambahan untuk menangkap dan menganalisis gambar, seperti HiView.



**Gambar 3.10** Mikroskop USB

3. Mitutoyo *Surftest* SJ – 210

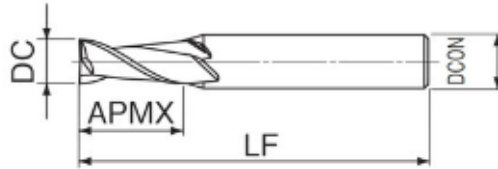
*Surface test tool* adalah alat yang digunakan untuk mengukur kekasaran pada permukaan.



**Gambar 3.11** Surftest Tool

4. End-Mill Cutter

Pahat end mill HSS (High-Speed Steel) adalah jenis pahat potong yang digunakan dalam proses milling.



**Gambar 3.12** End-Mill Cutter

Keterangan:

Diameter Mata Pisau (DC)	: 10 mm
Diameter Shank (DCON)	: 10 mm
Panjang Flute (APMX)	: 25 mm
Panjang Total (LF)	: 72 mm
Jumlah mata	: 2 flute
Merk	: SWT
Material	: HSS

5. Benda Kerja

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Aluminum 6061. Dimensi 30 mm x 30 mm x 17 mm.



**Gambar 3.13** Aluminum 6061

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimen. Hasil penelitian berupa nilai pengukuran keausan pahat dan kekasaran permukaan benda kerja. Pengolahan data menggunakan perangkat lunak IBM SPSS *Statistics* dan Minitab18 dengan menerapkan dua analisis statistik, yaitu Analysis of Variance (ANOVA) dan uji regresi. Pengujian statistik bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter yang divariasikan terhadap keausan pahat dan kekasaran permukaan.

##### 4.1.1 Parameter Pemesinan

Variasi parameter *radial depth of cut* sebesar 10%, 12.5%, dan 15% dari diameter pahat sebesar 10 mm. Sementara *feed rate* yang digunakan sebesar 2808 mm/min, 2875 mm/min, dan 2942 mm/min didasari oleh pengaplikasian nilai *feed per tooth* di atas dari nilai rekomendasi yang disadur dari Krar (Krar, S.F; Amand, 1977).

Nilai *spindle speed* dengan rekomendasi umum:

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D} = \frac{150 \times 1000}{\pi \times 10} = 4774.648 \text{ rpm} = 4775 \text{ rpm}$$

Nilai *feed rate* dengan rekomendasi umum dengan *feed per tooth* maksimum:

$$v_f = f_z \times z \times n = 0.28 \times 2 \times 4775 = 2674 \text{ mm/min}$$

Dipilih nilai *feed rate* dengan penambahan persentase 5%, 7.5%, dan 10% dari kenaikan nilai *feed rate* rekomendasi umum, yaitu sebesar 2808 mm/min, 2875 mm/min, dan 2942 mm/min.

Nilai *feed per tooth* pada level 1:

$$\begin{aligned} v_f &= f_z \times z \times n \\ 2808 &= f_z \times 2 \times 4775 \\ f_z &= 0.294 \text{ mm/min} \end{aligned}$$

Nilai *feed per tooth* pada level 2:

$$\begin{aligned} v_f &= f_z \times z \times n \\ 2875 &= f_z \times 2 \times 4775 \\ f_z &= 0.301 \text{ mm/min} \end{aligned}$$

Nilai *feed per tooth* pada level 3:

$$v_f = f_z \times z \times n$$

$$2942 = f_z \times 2 \times 4775$$

$$f_z = 0.308 \text{ mm/min}$$

Berikut parameter pemesinan dan posisi pengukuran yang diterapkan pada penelitian.

**Tabel 4. 1** Parameter Pemesinan dan Pengukuran

Level	Feed (mm-per-tooth)	Radial Depth of Cut (mm)	Feed rate (mm/min)	Pengukuran Keausan dari rentang Ap (mm)			Pengukuran Kekasaran ( $\mu m$ )		
1	0.294	1.00	2808	1	2	3	36	32	28
		1.25		1	2	3	36	32	28
		1.50		1	2	3	36	32	28
2	0.301	1.00	2875	1	2	3	36	32	28
		1.25		1	2	3	36	32	28
		1.50		1	2	3	36	32	28
3	0.308	1.00	2942	1	2	3	36	32	28
		1.25		1	2	3	36	32	28
		1.50		1	2	3	36	32	28

#### 4.1.2 Hasil Proses Pemesinan

Berikut merupakan hasil proses pemesinan CNC *milling* dengan jenis *toolpath contour*. Terdapat sembilan sampel, masing-masing menggunakan pahat yang berbeda untuk setiap parameter.

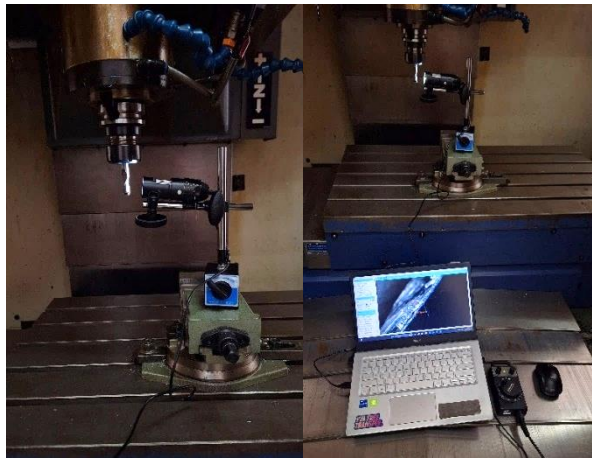


**Gambar 4. 1** Hasil Pemesinan Benda Kerja

#### 4.1.3 Pengukuran Keausan Pahat

Data keausan pahat diperoleh melalui pengukuran keausan tepi (*flank wear*) pada bagian badan pahat di setiap *flute*-nya. Pembacaan pengukuran menggunakan mikroskop USB yang terhubung dengan *software HiView*. Pengukuran keausan pahat dilakukan pada mesin CNC *milling* dengan tujuan menghasilkan gerak yang lebih stabil. Sedangkan mikroskop USB

ditopang oleh *stand magnetic base* sehingga hasil tangkapan gambar mikroskop USB lebih akurat dan mendapatkan fokus lebih mudah.



**Gambar 4. 2** Pengukuran Keausan Pahat



**Gambar 4. 3** Kalibrasi Mikroskop

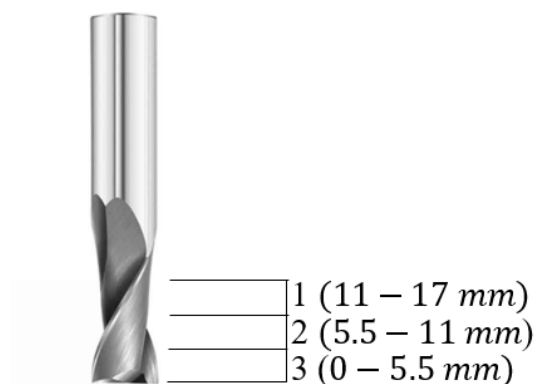
Terdapat beberapa langkah dalam pengukuran keausan pahat, sebagai berikut:

1. Pasang mikroskop pada *magnetic stand* dengan posisi tegak lurus. Hubungkan mikroskop dengan laptop melalui USB. Letakkan *magnetic stand* pada ragum atau meja mesin CNC.
2. Pasang pahat pada *collet* dan pasang di *chuck*.
3. Install *software HiView*. Buka *software*, pilih menu "*microscope*" pada panel *device*. Pilih resolusi dan format yang dibutuhkan. Penelitian ini menggunakan *resolution* 1280x720 dan format YUY2.
4. Atur posisi mikroskop mendekati pahat dengan menggunakan *handle* dan mesin dalam mode *handle*. Setelah mikroskop cukup dekat dan mengkap gambar pahat, atur fokus mikroskop dengan memutar perbesaran hingga mendapatkan fokus paling jelas.

5. Jauhkan mikroskop dan lakukan kalibrasi tanpa mengubah perputaran fokus yang sudah didapatkan sebelumnya. Pilih menu “*calibration*”. Tambahkan daftar baru dengan nama yang diinginkan, pilih opsi “*calibrate*”. Kemudian muncul *reference line*. Masukkan nilai yang sesuai dengan panjang garis referensi (unit dalam milimeter). Gunakan bantuan *calibration card* dan arahkan pada bagian *ruler*. Setelah itu, pilih “*apply*”.
6. Atur kembali posisi mikroskop hingga menangkap gambar flute pahat yang ingin diamati. Ukur lebar keausan menggunakan fitur *icon* “*measure with a line*”. Tarik garis pada daerah yang terlihat aus, panjang garis akan muncul secara otomatis.
7. Lakukan dokumentasi sebagai bukti pendukung dengan menekan *icon* “*camera*” pada panel “*device*”.
8. Lakukan hal yang sama pada *flute* lainnya dan pada pahat yang berbeda, tanpa mengubah perbesaran mikroskop.

#### 4.1.4 Hasil Pengukuran Keausan Pahat

Pengukuran keausan pahat menggunakan mikroskop USB dan pada setiap *flute* dilakukan pengambilan gambar. Jumlah *flute* pahat yang digunakan dalam penelitian adalah dua buah. Oleh karena itu, pengamatan nilai aus terbagi menjadi dua. Terdapat enam nilai di setiap *flute* yang terbagi menjadi pada tiga rentang dari *axial depth of cut*. Baris 1 dan 2 didapatkan nilai keausan pada *flute* pertama, dan baris 3 dan 4 didapatkan dari *flute* kedua. Rentang nilai diukur dari tepi pahat bagian muka. Setiap *flute* terbagi menjadi 3 kolom yang didasarkan pada rentang yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Nilai 3 berada pada rentang 0 – 5.5 mm, nilai 2 berada pada rentang 5.5 – 11 mm, dan nilai 1 berada pada rentang 11 – 17 mm.



**Gambar 4. 4** Posisi Pengukuran Keausan Pahat

Berikut merupakan data keausan pahat yang ditunjukkan pada tabel 4.2.



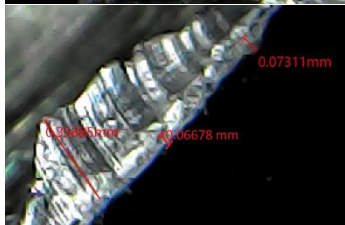
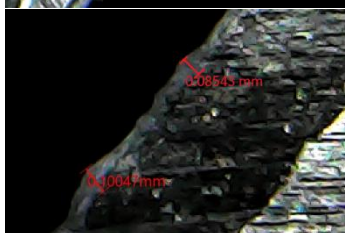
**Tabel 4. 2** Hasil Pengukuran Keausan Pahat

Sampel Pahat	Parameter		Flute	Pengamatan Nilai Aus (mm)		
	Feed (mm- per-tooth)	Radial Depth of Cut (mm)		1	2	3
1	0.294	1.00	1	0.05682	0.07471	0.06316
				0.04055	0.06488	0.07435
			2	0.07029	0.07421	0.05339
				0.05480	0.09301	0.05812
2	0.294	1.25	1	0.05985	0.06342	0.11662
				0.08002	0.06686	0.09408
			2	0.05785	0.06123	0.09192
				0.04659	0.06904	0.10192
3	0.294	1.50	1	0.07311	0.07974	0.10670
				0.06678	0.05542	0.10814
			2	0.06779	0.09125	0.09192
				0.06144	0.08969	0.11786
4	0.301	1.00	1	0.06058	0.08638	0.10047
				0.05826	0.07327	0.08543
			2	0.05745	0.06137	0.07637
				0.04659	0.06308	0.07097
5	0.301	1.25	1	0.04153	0.05322	0.11624
				0.04075	0.07300	0.10814
			2	0.07327	0.09530	0.13924
				0.07303	0.11619	0.14110
6	0.301	1.50	1	0.07471	0.09959	0.10623
				0.06840	0.09138	0.11355
			2	0.06299	0.09057	0.09814
				0.05812	0.08135	0.11000
7	0.308	1.00	1	0.04839	0.09018	0.09463
				0.05407	0.08381	0.08787
			2	0.05948	0.09733	0.14870
				0.08799	0.12615	0.17089

8	0.308	1.25	1	0.07664	0.12173	0.12619
				0.08462	0.13302	0.12383
			2	0.09016	0.07949	0.14872
				0.09143	0.09679	0.16629
9	0.308	1.50	1	0.08306	0.09981	0.15285
				0.09092	0.09625	0.11558
			2	0.12550	0.13153	0.17060
				0.11182	0.14110	0.17263

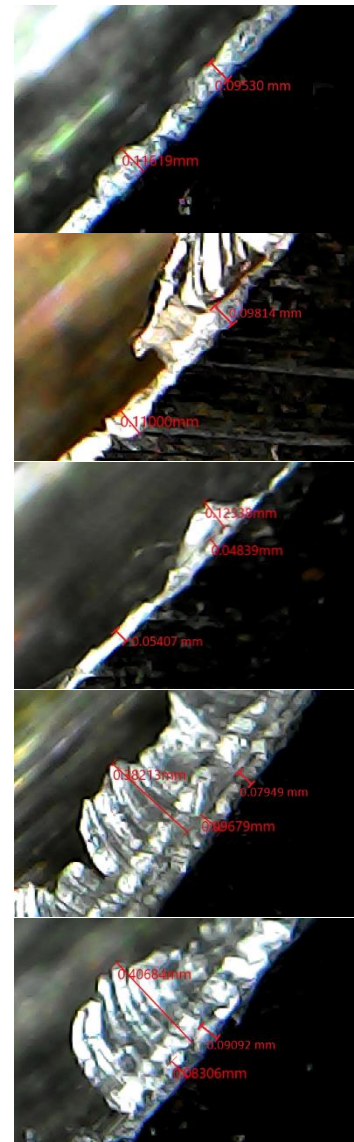
Tabel 4.3 menunjukkan beberapa sampel dokumentasi keausan pahat yang disebutkan pada tabel 4.2. Keseluruhan dokumentasi pengukuran keausan pahat dapat dilihat pada lampiran bagian B.

**Tabel 4. 3** Dokumentasi Hasil Pengukuran Keausan Pahat

Sampel Pahat	Data pada Tabel			Nilai pada Gambar	Keausan Pahat pada Flute
	Posisi	Flute	Baris		
1	3	2	3	0.05339	
			4	0.05812	
2	3	1	1	0.11662	
			2	0.09408	
3	1	1	1	0.07311	
			2	0.6678	
4	3	1	1	0.10047	
			2	0.08543	



5	2	2	3	0.09530
			4	0.11619
6	3	2	3	0.09814
			4	0.11000
7	1	1	1	0.04839
			2	0.05407
8	2	2	3	0.07949
			4	0.09679
9	1	1	1	0.08306
			2	0.09092



#### 4.1.3.1 Built-Up Edge (BUE)

Selama proses pemesinan, muncul keausan pahat jenis *Built-Up Edge* (BUE) di sekitar *flute*. Keausan BUE mulai terlihat samar pada pengerjaan pertama dan semakin meningkat pada pengerjaan ketiga atau terakhir. BUE terjadi ketika material benda kerja menyatu dengan mata pahat. Hal ini mengubah geometri pahat karena BUE berfungsi sebagai mata potong baru.

Pada proses *milling* CNC, BUE terbentuk dari interaksi antara alat potong dan benda kerja. Pada proses ini, alat potong berputar pada spindel dan bergerak ke samping untuk memotong material benda kerja secara bertahap. Gesekan antara alat potong dan benda kerja menghasilkan panas yang tinggi, yang menyebabkan material benda kerja menempel pada alat potong dan membentuk lapisan yang dapat

terkelupas secara berulang dengan penumpukan lapisan metal baru. Keausan pahat BUE pada pahat secara makro dapat dilihat pada lampiran A dan secara mikro pada lampiran B.

#### 4.1.5 Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan Mitutoyo SJ 210. Hasil proses pemesinan terdiri dari satu bidang horizontal. Pada bidang horizontal ini dilakukan tiga titik pengujian. Berikut langkah-langkah mengukur kekasaran permukaan menggunakan Mitutoyo SJ 210.

1. Letakkan benda kerja yang ingin diukur dalam jangkauan *probe* alat *surface roughness*. Hidupkan alat dengan menekan tombol “ON”
2. Tekan tombol “Menu”, pilih “*measurement condition*”, dan pilih “*setting*”. Tentukan beberapa *measurement condition* yang diinginkan. Pada penelitian ini *measurement condition* yang dipilih, sebagai berikut:

Standard : ISO 1997

Profile : R

Filter : GAUSS

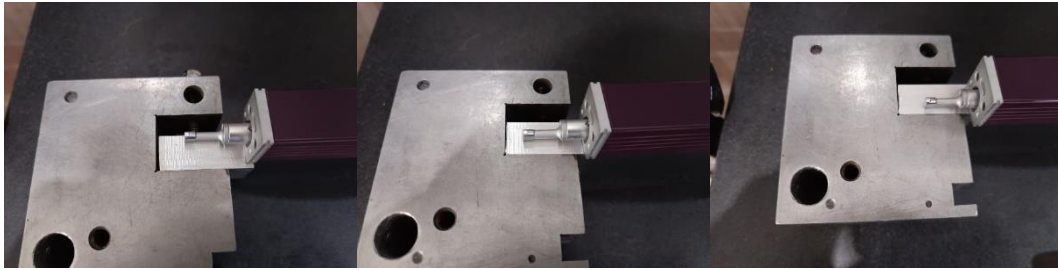
$\lambda_c$  : 2.5

M-Speed : 0.5 mm/s

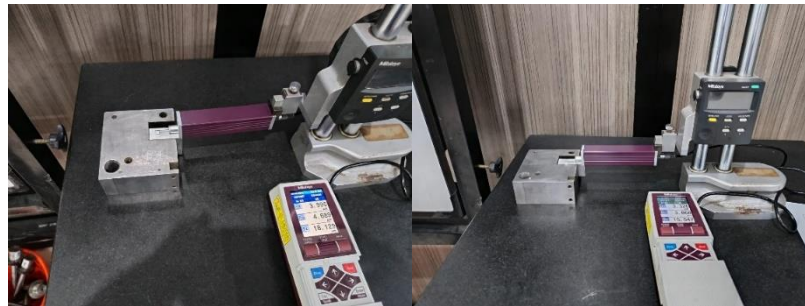
3. Setelah menetapkan *measurement condition* lalu pilih “Start”.
4. Namun, sebelum mengukur benda kerja. Lakukan kalibrasi dahulu melalui pengukuran salah satu *surface roughness comparator*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui bahwa alat sudah terkalibrasi dan menunjukkan hasil yang tepat, seperti ditunjukkan pada gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Kalibrasi Surface Roughness Tester



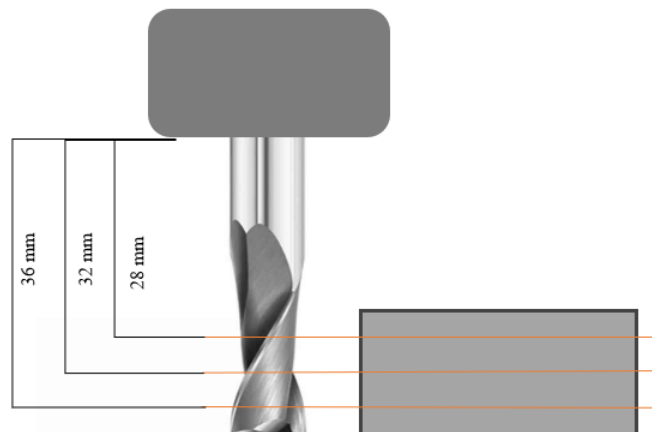
**Gambar 4. 6** Titik Pengujian *Surface Roughness*



**Gambar 4. 7** Pengujian *Surface Roughness*

#### 4.1.6 Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan

Berdasarkan hasil pengukuran kekasaran permukaan, data yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 4.4. Material yang diuji hanya terdiri dari satu bidang, bidang tersebut dibagi menjadi tiga bagian untuk keperluan pengujian. Pembagian ini memungkinkan pengukuran yang lebih mendetail dan akurat, sehingga menghasilkan tiga nilai kekasaran permukaan yang berbeda. Titik pembagian dikelompokkan berdasarkan jarak dari *collet*, yaitu 28 mm, 32 mm, dan 36 mm, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8. Setiap titiknya dilakukan tiga kali pengujian yang disajikan pada baris 1, 2, dan 3 pada setiap sampel benda kerja. Kekasaran rata-rata ( $R_a$ ) adalah parameter internasional yang paling umum digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan dalam proses produksi dikutip dari Saputro (Saputro, 2010).



**Gambar 4. 8** Posisi Pengukuran Kekasaran Permukaan

**Tabel 4. 4** Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Sampel Benda Kerja	Parameter		Pengujian Ke-	Nilai Ra ( $\mu\text{m}$ )		
	Feed (mm- per-tooth)	Radial Depth of Cut (mm)		Bawah (36 mm)	Tengah (32 mm)	Atas (28 mm)
1	0.294	1.00	1	2.151	2.066	1.908
			2	2.181	2.100	1.896
			3	2.101	2.031	1.916
2	0.294	1.25	1	2.848	2.478	1.837
			2	2.795	2.449	1.846
			3	2.815	2.472	1.857
3	0.294	1.50	1	2.727	2.268	2.052
			2	2.769	2.286	2.082
			3	2.765	2.294	2.079
4	0.301	1.00	1	2.611	2.380	2.177
			2	2.619	2.236	2.176
			3	2.632	2.355	2.183
5	0.301	1.25	1	2.518	2.418	2.350
			2	2.569	2.420	2.221
			3	2.562	2.424	2.317
6	0.301	1.50	1	2.976	2.396	2.091
			2	3.028	2.294	2.100
			3	3.045	2.328	2.137
7	0.308	1.00	1	3.325	2.480	1.899
			2	3.373	2.513	1.881
			3	3.355	2.528	1.883
8	0.308	1.25	1	4.032	2.654	2.372
			2	4.272	2.642	2.473
			3	4.208	2.639	2.474
9	0.308	1.50	1	4.471	3.257	2.863
			2	4.436	3.220	2.885
			3	4.470	3.253	2.847

## 4.2 Pengujian Statistik

Penelitian yang dilakukan menggunakan uji statistik *analysis of variance* (ANOVA) dan uji regresi linear sederhana. Analisis Varians merupakan formula statistik komparatif yang dapat digunakan untuk mengetahui ada atau tidak adanya perbedaan fenomena antar banyak kelompok, dalam hal ini di antara dua atau lebih kelompok berdasarkan Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017). Analisis regresi linear sederhana (*simple linear regression analysis*) melibatkan dua variabel: satu variabel independen (yang mempengaruhi) dan satu variabel dependen (yang dipengaruhi). Istilah "sederhana" mengacu pada keterlibatan hanya dua variabel dalam analisis. "Linear" berarti asumsi yang digunakan adalah hubungan antara kedua variabel tersebut bersifat linear menurut Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017).

### 4.2.1 Uji Asumsi

*Analysis of Variance* (ANOVA) dapat dilakukan setelah memenuhi beberapa persyaratan, diantaranya varian data yang homogen dan distribusi data yang normal dikutip dari Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017). Oleh karena itu, uji normalitas dan uji homogenitas harus dilakukan sebelum pengujian ANOVA.

Uji normalitas adalah prosedur untuk menentukan apakah data berasal dari populasi yang terdistribusi normal. Berdasarkan Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017) beberapa metode yang digunakan dalam analisis normalitas data meliputi Liliefors, kolmogorof-smirnov, chi square, dan lain-lain. *Test of normality* dengan metode Kolmogorov-Smirnov digunakan untuk sampel besar ( $>50$ ) dan Shapiro-Wilk untuk sampel kecil ( $\leq 50$ ). Data dapat dikatakan berdistribusi normal jika nilai  $P$  (Sig.)  $> 0.05$  pada uji Kolmogorov-Smirnov maupun Shapiro-Wilk seperti yang dinyatakan oleh Setyawan (Setyawan, 2021).

Uji homogenitas adalah prosedur uji statistik untuk menunjukkan bahwa dua atau lebih kelompok data sampel berasal dari populasi dengan variansi yang sama. Beberapa metode yang kerap digunakan untuk uji homogenitas meliputi uji Harley, Cochran, Levene dan Barlett merujuk pada Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017). Penelitian ini menggunakan metode Levene sebagai uji homogenitas. Jika nilai signifikansi ( $P$ -Value)  $< 0.05$  disimpulkan bahwa "varian dari dua kelompok data atau lebih adalah tidak sama (tidak homogen)" mengacu pada Setyawan (Setyawan, 2021). Uji Levene sama dengan analisis varians (ANOVA) satu arah, yaitu dengan deviasi absolut pengamatan dari rata-rata setiap kelompok sebagai variabel dependen (*center="mean"*). Bersumber dari M.B. Brown (M. B., Brown & Forsythe, 1974) memodifikasi

uji Levene's dengan menggunakan deviasi absolut pengamatan dari median (*center = "median"*). Secara standar, uji Levene's menggunakan deviasi absolut observasi dari median.

#### 4.2.1.1 Uji Asumsi Keausan Pahat

Berikut ini dibahas uji normalitas dan uji homogenitas data keausan pahat sebelum dilakukan uji *analysis of variance* (ANOVA). Kedua pengujian menggunakan *software Minitab18*.

Mean	-6,16148E-16
StDev	0,02128
N	108
KS	0,068
P-Value	>0,150

**Gambar 4. 9** Uji Normalitas Keausan Pahat Kolmogorov-Smirnov

Jumlah data (N) keausan pahat berjumlah 108. Menurut Setyawan (Setyawan, 2021) pengujian Kolmogorov-Smirnov digunakan untuk sampel lebih besar dari 50 (>50). Berdasarkan gambar 4.9, uji normalitas keausan pahat menggunakan *kolmogorov-smirnov test* menunjukkan nilai signifikansi atau *p-value* >0.150, yang berarti nilai >0.050 sehingga data berdistribusi normal.

**Tabel 4. 5** Uji Homogenitas Keausan Pahat

Method	Test	
	Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0,266
Levene	1,58	0,063

Berdasarkan hasil uji homogenitas pada tabel di atas, diketahui bahwa keausan pahat memiliki signifikansi atau *p-value* 0.063. Nilai ini menunjukkan bahwa distribusi data homogen karena  $0.063 > 0.05$ . Dari kedua hasil pengujian, disimpulkan bahwa data bersifat homogen dan normal, sehingga memenuhi syarat untuk uji *analysis of variance* (ANOVA). Dengan demikian, data eksperimen dapat dilanjutkan ke tahap pengujian ANOVA.

#### 4.2.1.2 Uji Asumsi Kekasaran Permukaan

Berikut ini dibahas uji normalitas dan uji homogenitas data kekasaran permukaan sebelum dilakukan uji *analysis of variance* (ANOVA). Kedua pengujian menggunakan *minitab18*.

Mean	-4,21062E-15
StDev	0,3252
N	81
KS	0,092
P-Value	0,091

**Gambar 4. 10** Uji Normalitas Kekasaran Permukaan Kolmogorov-Smirnov

Jumlah data (N) keausan pahat berjumlah 81. Menurut Setyawan (Setyawan, 2021) pengujian Kolmogorov-Smirnov digunakan untuk sampel lebih besar dari 50 (>50). Berdasarkan gambar 4.10, uji normalitas kekasaran permukaan menggunakan *kolmogorov-smirnov test* menunjukkan nilai signifikan  $0.091 > 0.05$ , artinya data berdistribusi normal.

**Tabel 4. 6** Uji Homogenitas Kekasaran Permukaan

Method	Test	
	Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0,002
Levene	1,21	0,274

Berdasarkan hasil uji homogenitas pada tabel di atas, diketahui bahwa kekasaran permukaan memiliki *P-Value* sebesar 0.285. Nilai ini menunjukkan bahwa distribusi data homogen karena  $0.274 > 0.05$ . Dari kedua hasil pengujian, disimpulkan bahwa data bersifat homogen dan normal, sehingga memenuhi syarat untuk dapat dilanjutkan ke uji *analysis of variance* (ANOVA).

#### 4.2.2 Analysis of Variance (ANOVA)

Analisis varians (*Analysis of Variance*) dapat digunakan untuk menguji hipotesis mengenai perbedaan rata-rata antara kelompok-kelompok sampel disadur dari Kadir (Kadir, 2010). Keputusan untuk menerima atau menolak hipotesis dilakukan dengan membandingkan nilai statistik uji ( $F_{hitung}$ ) dengan nilai  $F_{tabel}$ , serta nilai Sign.P-Value dengan alpha dinyatakan oleh Wijaya (Wijaya *et al.*, 2024). Jika hasil uji ANOVA menyatakan penolakan terhadap hipotesis awal atau menunjukkan hasil signifikan, maka dapat dilanjutkan *post hoc test* (uji pasca hoc) mengacu pada Usmani (Usmani, 2017). Tujuan utama dari *post hoc test* adalah untuk menentukan secara spesifik di mana perbedaan yang signifikan terjadi di antara kelompok-kelompok yang dibandingkan. Jenis-jenis *post hoc test* yang umum yaitu Tukey, Bonferroni, Duncan, Scheffe, dan Newman. Uji Tukey dinyatakan oleh Usmani (Usmani, 2017) sering disebut uji beda nyata jujur atau HSD (*honestly Significant difference*) yang digunakan untuk

membandingkan seluruh pasangan rata-rata perlakuan setelah uji analisis varian dilakukan. Tukey's HSD memiliki keunggulan dalam mengurangi risiko kesalahan tipe I dan II. Sedangkan Bonferroni *post-hoc* digunakan pada situasi data membutuhkan koreksi multipel, yaitu dilakukan banyak uji hipotesis sekaligus.

#### 4.2.2.1 ANOVA Keausan Pahat

**Tabel 4. 7** ANOVA Keausan Pahat

<b>Tests of Between-Subjects Effects</b>					
Dependent Variable: Keausan Pahat					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.072 <sup>a</sup>	26	.003	6.903	.000
Intercept	.827	1	.827	2062.167	.000
FPT	.029	2	.015	36.430	.000
RDOC	.008	2	.004	9.709	.000
Ap	.027	2	.013	33.185	.000
FPT * RDOC	.001	4	.000	.349	.844
FPT * Ap	.004	4	.001	2.256	.070
RDOC * Ap	.002	4	.001	1.427	.233
FPT * RDOC *	.002	8	.000	.588	.785
Ap					
Error	.033	81	.000		
Total	.932	108			
Corrected Total	.105	107			

a. R Squared = .689 (Adjusted R Squared = .589)

Hasil pengujian ANOVA ditunjukkan pada tabel 4.7 dengan taraf signifikansi  $\alpha = 0.05$ .

Terdapat tiga distribusi yang dapat diketahui:

- Pada distribusi F dengan  $v_1 = 2$  dan  $v_2 = 81$  didapatkan  $F_{tabel} = 3.11$
- Pada distribusi F dengan  $v_1 = 4$  dan  $v_2 = 81$  didapatkan  $F_{tabel} = 2.48$
- Pada distribusi F dengan  $v_1 = 8$  dan  $v_2 = 81$  didapatkan  $F_{tabel} = 2.05$

Pengaruh dari masing-masing faktor dijelaskan sebagai berikut:

a. Pengaruh *Feed per Tooth* Terhadap Keausan Pahat

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 36.430 > F_{tabel} 0.05(3.11)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga



menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada perbedaan keausan pahat berdasarkan nilai *feed per tooth*” dengan *confidence level* 95%.

b. Pengaruh *Radial Depth of Cut* Terhadap Keausan Pahat

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 9.709 > F_{tabel} 0.05(3.11)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada perbedaan keausan pahat berdasarkan nilai *radial depth of cut*” dengan *confidence level* 95%.

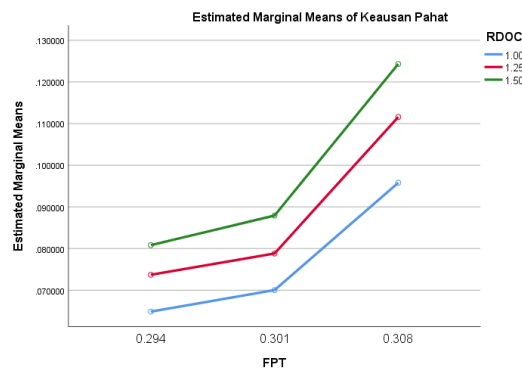
c. Pengaruh rentang *Axial depth of Cut* terhadap Keausan Pahat

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 33.185 > F_{tabel} 0.05(3.11)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada perbedaan keausan pahat berdasarkan nilai rentang *axial depth of cut*” dengan *confidence level* 95%.

Ketiga variabel yang diuji (*Feed per Tooth*, *Radial Depth of Cut*, dan rentang *Axial Depth of Cut*) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keausan pahat. *Feed per Tooth* (FPT) memiliki pengaruh terkuat terhadap keausan pahat, diikuti oleh rentang *Axial Depth of Cut*, dan terakhir *Radial Depth of Cut* (RDOC). Meskipun RDOC memiliki nilai F-hitung terendah di antara ketiga variabel, pengaruhnya tetap signifikan secara statistik.

d. Interaksi *Feed per Tooth* dengan *Radial Depth of Cut* pada Keausan Pahat

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 0.349 < F_{tabel} 0.05(2.48)$  berarti hipotesis diterima. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.844 > 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis diterima. Ini menyatakan bahwa “tidak ada interaksi *feed per tooth* dengan *radial depth of cut* dalam menentukan keausan pahat”. Dengan kata lain, efek kombinasi dari perubahan FPT dan RDOC tidak memiliki pengaruh yang statistik signifikan terhadap keausan pahat. Pada gambar 4.11. terlihat garis memiliki sifat sejajar dan tidak berpotongan yang menunjukkan tidak ada interaksi.

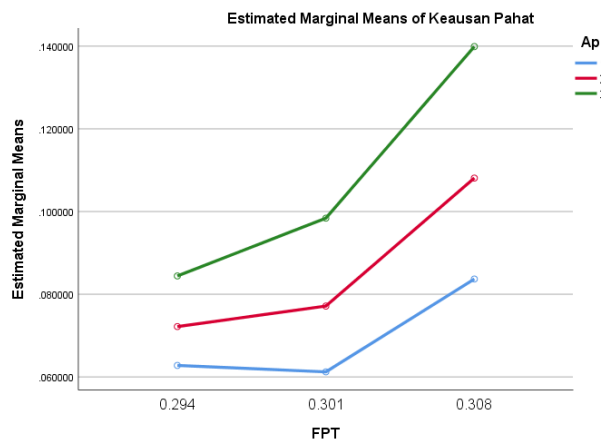


**Gambar 4. 11** Grafik FPT dan RDOC Keausan Pahat

Grafik menunjukkan pada semua nilai RDOC, keausan pahat cenderung meningkat seiring dengan peningkatan Feed per Tooth (FPT). Selain itu, nilai RDOC yang lebih tinggi cenderung menghasilkan keausan pahat yang lebih besar. FPT tampaknya memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap keausan pahat dibandingkan dengan RDOC, terlihat dari peningkatan keausan yang konsisten seiring peningkatan FPT. Ketiadaan interaksi yang signifikan menunjukkan bahwa efek FPT terhadap keausan pahat relatif konsisten terlepas dari nilai RDOC yang digunakan, dan sebaliknya. Penelitian yang dilakukan oleh Palanisamy (Palanisamy, Rajendran and Shanmugasundaram, 2008) juga menunjukkan grafik dengan garis meningkat pada setiap penambahan *feed rate* dalam unit mm/tooth.

e. Interaksi *Feed per Tooth* dengan rentang *Axial Depth of Cut* pada Keausan Pahat

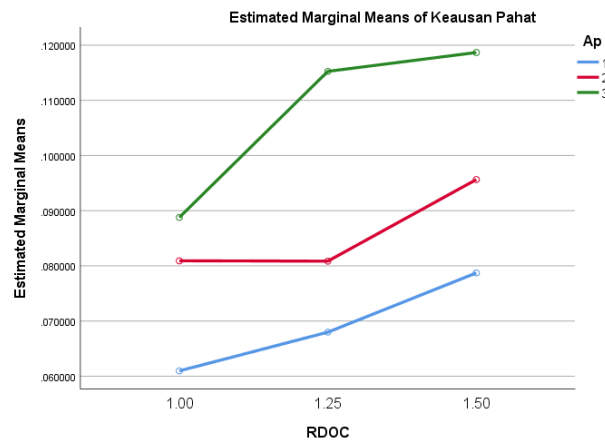
Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 2.256 < F_{tabel} 0.05(2.48)$  berarti hipotesis diterima. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.070 > 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis diterima. Ini menyatakan bahwa “tidak ada interaksi *feed per tooth* dengan rentang *axial depth of cut* dalam menentukan keausan pahat”. Dengan kata lain, efek kombinasi dari perubahan FPT dan rentang *axial depth of cut* tidak memiliki pengaruh yang statistik signifikan terhadap keausan pahat. Pada gambar 4.12. terlihat garis memiliki sifat sejajar dan tidak berpotongan yang menunjukkan tidak ada interaksi.



**Gambar 4. 12** Grafik FPT dan Ap Keausan Pahat

Grafik menunjukkan untuk semua rentang ADOC, keausan pahat cenderung meningkat seiring dengan peningkatan Feed per Tooth (FPT). Rentang ADOC sebesar 3 konsisten menunjukkan keausan pahat tertinggi, diikuti oleh rentang 2 dan rentang 1 menunjukkan keausan pahat terendah. Seiring peningkatan level setiap parameter, nilai keausan juga meningkat.

- f. Interaksi *Radial Depth of Cut* dengan rentang *Axial Depth of Cut* pada Keausan Pahat  
 Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 1.427 < F_{tabel} 0.05(2.48)$  berarti hipotesis diterima. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.233 > 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis diterima. Ini menyatakan bahwa “tidak ada interaksi *radial depth of cut* dengan rentang *axial depth of cut* dalam menentukan keausan pahat”. Dengan kata lain, efek kombinasi dari perubahan RDOC dan rentang *axial depth of cut* tidak memiliki pengaruh yang statistik signifikan terhadap keausan pahat. Pada gambar 4.13. terlihat garis memiliki sifat sejajar dan tidak berpotongan yang menunjukkan tidak ada interaksi.



**Gambar 4.13** Grafik RDOC dan Ap Keausan Pahat

Grafik menunjukkan pada semua rentang ADOC, keausan pahat cenderung meningkat seiring dengan peningkatan RDOC. Rentang ADOC 3 konsisten menunjukkan keausan pahat tertinggi, diikuti oleh rentang 2 dan rentang 1 menunjukkan keausan pahat terendah.

- g. Interaksi *Feed per Tooth*, *Radial Depth of Cut*, dan rentang *Axial Depth of Cut* pada Keausan Pahat

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.7, nilai  $F_{hitung} = 0.588 < F_{tabel} 0.05(2.05)$  berarti hipotesis diterima. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.785 > 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis diterima. Ini menyatakan bahwa “tidak ada interaksi *feed per tooth*, *radial depth of cut*, dan rentang *axial depth of cut* dalam menentukan keausan pahat”.

Pada beberapa hasil pengujian ANOVA menyatakan hipotesis ditolak, berarti terdapat perbedaan atau signifikansi. Dengan demikian, terdapat uji lanjutan *post hoc test* menggunakan *Minitab18* dengan metode Tukey dan Bonferroni untuk mengidentifikasi secara spesifik pasangan kelompok mana yang berbeda secara signifikan setelah ANOVA menunjukkan adanya perbedaan umum.

**Tabel 4. 8** Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: FPT Keausan Pahat

**Grouping Information Using the Tukey Method and Bonferroni Method 95% Confidence**

<u>FPT</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>	<u>FPT</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>
0,308	36	0,114279	A	0,308	36	0,114279	A
0,301	36	0,082396	B	0,301	36	0,082396	B
0,294	36	0,074937	B	0,294	36	0,074937	B

*Means that do not share a letter are significantly different.*

Analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam tingkat keausan pahat pada berbagai nilai FPT. Hasil pengelompokan adalah sebagai berikut:

1. FPT 0.308 mm/tooth (ditandai dengan huruf A) menghasilkan tingkat keausan pahat yang secara statistik berbeda signifikan dan lebih tinggi dibandingkan dengan dua nilai FPT lainnya.
2. FPT 0.301 mm/tooth dan 0.294 mm/tooth (keduanya ditandai dengan huruf B) menghasilkan tingkat keausan pahat yang secara statistik tidak berbeda signifikan satu sama lain, namun keduanya berbeda signifikan dan lebih rendah dibandingkan dengan FPT 0.308 mm/tooth.

Hasil mengindikasikan bahwa peningkatan nilai FPT ke 0.308 mm/tooth berdampak nyata pada peningkatan keausan pahat. Hal ini dapat dijelaskan oleh beban pemotongan yang lebih besar per gigi pahat pada FPT yang lebih tinggi, yang mengakibatkan peningkatan gaya potong dan gesekan pada setiap gigi, sehingga mempercepat keausan. Tabel menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan dalam keausan pahat antara FPT 0.301 mm/tooth dan 0.294 mm/tooth. Ini menunjukkan bahwa dalam rentang nilai ini, perubahan FPT tidak cukup besar untuk menghasilkan perbedaan yang terdeteksi dalam tingkat keausan pahat. Penggunaan FPT yang lebih rendah (0.301 mm/tooth atau 0.294 mm/tooth) dapat dipertimbangkan untuk memperpanjang umur pahat. Selain itu, terdapat ambang batas FPT (dalam hal ini, antara 0.301 dan 0.308 mm/tooth) yaitu keausan pahat meningkat secara signifikan. Hal ini searah dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Suresh (Suresh, Basavarajappa and Gaitonde, 2015) yang menyatakan nilai keausan meningkat seiring dengan peningkatan nilai *feed rate*.

**Tabel 4. 9** Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: RDOC Keausan Pahat

**Grouping Information Using the Tukey Method and Bonferroni Method 95% Confidence**

<u>RDOC</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>	<u>RDOC</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>
1,50	36	0,0987978	A	1,50	36	0,0987978	A
1,25	36	0,0959256	A	1,25	36	0,0959256	A
1,00	36	0,0768889	B	1,00	36	0,0768889	B

*Means that do not share a letter are significantly different*

Analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam tingkat keausan pahat pada berbagai nilai RDOC. Hasil pengelompokan adalah sebagai berikut:

1. RDOC 1.50 mm dan 1.25 mm (keduanya ditandai dengan huruf A) menghasilkan tingkat keausan pahat yang secara statistik tidak berbeda signifikan satu sama lain.
2. RDOC 1.00 mm (ditandai dengan huruf B) menghasilkan tingkat keausan pahat yang secara statistik berbeda signifikan dan lebih rendah dibandingkan dengan dua nilai RDOC lainnya.

Hasil mengindikasikan bahwa peningkatan nilai RDOC ke 1.25 mm atau lebih tinggi berdampak nyata pada peningkatan keausan pahat. Hal ini dapat dijelaskan oleh beban pemotongan yang lebih besar pada RDOC yang lebih tinggi, yang mengakibatkan peningkatan gaya potong, gesekan, dan panas yang lebih intens pada pahat, sehingga mempercepat keausan. Tabel menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan dalam keausan pahat antara RDOC 1.50 mm dan 1.25 mm. Ini menunjukkan bahwa dalam rentang nilai ini, peningkatan RDOC tidak menghasilkan perbedaan yang terdeteksi dalam tingkat keausan pahat. Penggunaan RDOC yang lebih rendah (1.00 mm) dapat dipertimbangkan untuk memperpanjang umur pahat. Selain itu, terdapat ambang batas RDOC (dalam hal ini antara 1.00 dan 1.25 mm) yaitu keausan pahat meningkat secara signifikan.

**Tabel 4. 10** Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: Ap Keausan Pahat

**Grouping Information Using the Tukey Method and Bonferroni Method 95% Confidence**

Ap	N	Mean	Grouping	Ap	N	Mean	Grouping
3	36	0,107569	A	3	36	0,107569	A
2	36	0,093701	B	2	36	0,093701	B
1	36	0,070342	C	1	36	0,070342	C

*Means that do not share a letter are significantly different.*

Analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam tingkat keausan pahat pada beberapa rentang Ap. Ketiga nilai jarak yang diuji menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan satu sama lain, dengan pengelompokan sebagai berikut:

1. Rentang Ap 3 (ditandai dengan huruf A) menghasilkan keausan pahat tertinggi.
2. Rentang Ap 2 (ditandai dengan huruf B) menghasilkan tingkat keausan pahat menengah.
3. Rentang Ap 1 (ditandai dengan huruf C) menghasilkan tingkat keausan pahat terendah.

Hasil mengindikasikan bahwa peningkatan rentang ADOC berdampak nyata pada penurunan keausan pahat. Hal ini dapat dijelaskan oleh distribusi beban pemotongan yang lebih merata sepanjang mata potong pada ADOC yang lebih tinggi, yang mengakibatkan

pengurangan konsentrasi stress dan panas pada titik-titik tertentu, sehingga memperlambat keausan.

#### 4.2.2.2 ANOVA Kekasaran Permukaan

**Tabel 4. 11** ANOVA Kekasaran Permukaan

<b>Tests of Between-Subjects Effects</b>					
Dependent Variable: Kekasaran Permukaan					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	31.048 <sup>a</sup>	26	1.194	346.376	.000
Intercept	541.012	1	541.012	156926.849	.000
FPT	9.656	2	4.828	1400.462	.000
RDOC	2.954	2	1.477	428.445	.000
Collet	11.621	2	5.810	1685.399	.000
FPT * RDOC	1.763	4	.441	127.877	.000
FPT * Collet	3.769	4	.942	273.308	.000
RDOC * Collet	.538	4	.135	39.043	.000
FPT * RDOC * Collet	.746	8	.093	27.033	.000
Error	.186	54	.003		
Total	572.246	81			
Corrected Total	31.234	80			

a. R Squared = ,994 (Adjusted R Squared = ,991)

Hasil pengujian ANOVA ditunjukkan pada tabel 4.11 dengan taraf signifikansi  $\alpha = 0.05$ .

Terdapat tiga distribusi yang dapat diketahui:

- Pada distribusi F dengan  $v_1 = 2$  dan  $v_2 = 54$  didapatkan  $F_{tabel} = 3.17$
- Pada distribusi F dengan  $v_1 = 4$  dan  $v_2 = 54$  didapatkan  $F_{tabel} = 2.54$
- Pada distribusi F dengan  $v_1 = 8$  dan  $v_2 = 54$  didapatkan  $F_{tabel} = 2.12$

Pengaruh dari masing-masing faktor dijelaskan sebagai berikut:

a. Pengaruh *Feed per Tooth* Terhadap Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 1400.462 > F_{tabel} 0.05(3.17)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada perbedaan kekasaran permukaan berdasarkan nilai *feed per tooth*” dengan *confidence level* 95%.

b. Pengaruh *Radial Depth of Cut* Terhadap Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 428.445 > F_{tabel}0.05(3.17)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada perbedaan kekasaran permukaan berdasarkan nilai *radial depth of cut*” dengan *confidence level* 95%.

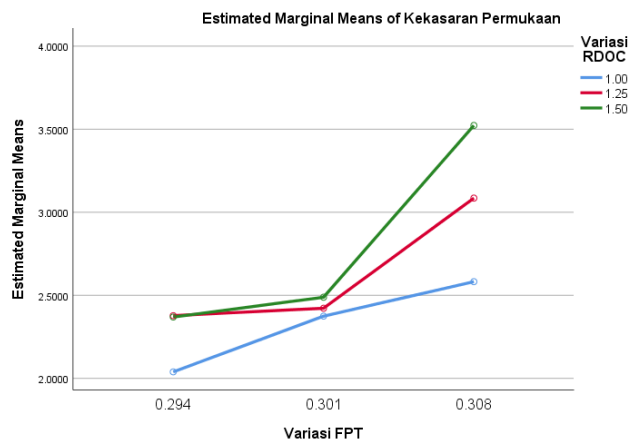
c. Pengaruh Jarak dari *Collet* terhadap Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 1685.399 > F_{tabel}0.05(3.17)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada perbedaan kekasaran permukaan berdasarkan nilai jarak dari *collet*” dengan *confidence level* 95%.

Ketiga variabel yang diuji (*Feed per Tooth*, *Radial Depth of Cut*, dan jarak dari *collet*) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. Jarak dari *collet* memiliki pengaruh terkuat terhadap kekasaran permukaan, diikuti oleh FPT (*Feed per Tooth*), dan terakhir *Radial Depth of Cut* (RDOC). Meskipun RDOC memiliki nilai F-hitung terendah di antara ketiga variabel, pengaruhnya tetap signifikan secara statistik.

d. Interaksi *Feed per Tooth* dengan *Radial Depth of Cut* pada Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 127.877 > F_{tabel}0.05(2.54)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada interaksi *feed per tooth* dengan *radial depth of cut* dalam menentukan kekasaran permukaan”. Dengan kata lain, efek kombinasi dari perubahan FPT dan RDOC memiliki pengaruh yang statistik signifikan terhadap kekasaran permukaan. Pada gambar 4.14. terlihat adanya potongan garis pada grafik yang menunjukkan adanya interaksi tersebut.

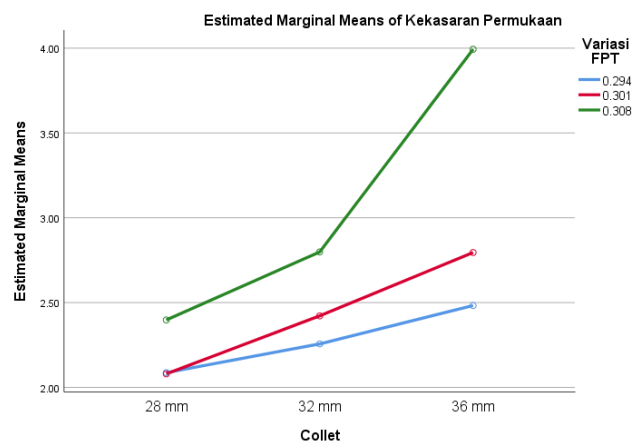


**Gambar 4. 14** Grafik FPT dan RDOC Kekasaran Permukaan

Grafik menunjukkan pada semua nilai RDOC, kekasaran permukaan cenderung meningkat seiring dengan peningkatan FPT. Penelitian Dhiah Purbosari (Purbosari, 2012) mengungkapkan bahwa dengan *feed rate* yang besar maka pergerakan pahat untuk melakukan pemakanan pada permukaan benda kerja akan semakin besar, sehingga akan meninggalkan alur pengerjaan yang besar dan akan semakin kasar. Pada FPT rendah (0.294), perbedaan kekasaran permukaan antar nilai RDOC relatif kecil. Saat FPT meningkat, perbedaan kekasaran permukaan antar nilai RDOC menjadi semakin jelas, dengan RDOC yang lebih tinggi menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi. Terlihat jelas adanya interaksi antara FPT dan RDOC, ditunjukkan oleh perbedaan kemiringan garis untuk berbagai nilai RDOC. Berarti bahwa efek FPT terhadap kekasaran permukaan sangat bergantung pada nilai RDOC yang digunakan, dan sebaliknya

e. Interaksi *Feed per Tooth* dengan Jarak dari *Collet* pada Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 273.308 > F_{tabel} 0.05(2.54)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada interaksi *feed per tooth* dengan *radial depth of cut* dalam menentukan kekasaran permukaan”. Dengan kata lain, efek kombinasi dari perubahan FPT dan jarak dari *collet* memiliki pengaruh yang statistik signifikan terhadap kekasaran permukaan. Pada gambar 4.15. terlihat adanya potongan garis pada grafik yang menunjukkan adanya interaksi tersebut.



**Gambar 4. 15** Grafik FPT dan Jarak dari Collet Kekasaran Permukaan

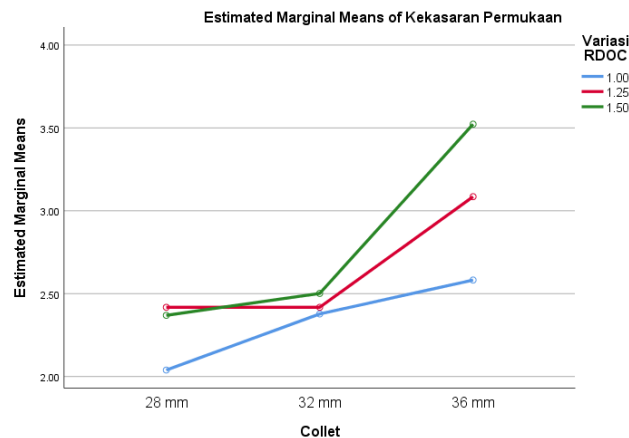
Grafik menunjukkan terdapat perbedaan tren kekasaran permukaan untuk setiap level RDOC seiring dengan perubahan FPT. Secara umum, kekasaran permukaan cenderung meningkat dengan bertambahnya nilai FPT untuk semua level RDOC. RDOC 1.50 menunjukkan peningkatan kekasaran permukaan yang paling drastis, terutama pada nilai



FPT yang lebih tinggi. Hasil ini mengindikasikan bahwa pemilihan kombinasi FPT dan jarak dari collet yang tepat sangat penting dalam mengendalikan kekasaran permukaan.

f. Interaksi *Radial Depth of Cut* dengan Jarak dari *Collet* pada Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 39.043 > F_{tabel} 0.05(2.54)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada interaksi *radial depth of cut* dengan jarak dari *collet* dalam menentukan kekasaran permukaan”. Dengan kata lain, efek kombinasi dari perubahan RDOC dan jarak dari *collet* memiliki pengaruh yang statistik signifikan terhadap kekasaran permukaan. Pada gambar 4.16 terlihat adanya potongan garis pada grafik yang menunjukkan adanya interaksi tersebut.



**Gambar 4. 16** Grafik RDOC dan Jarak dari Collet Kekasaran Permukaan

Grafik menunjukkan tren kekasaran permukaan cenderung meningkat seiring dengan peningkatan jarak dari collet, dari 28 mm ke 36 mm. Terlihat bahwa garis-garis untuk berbagai nilai RDOC tidak paralel, yang menunjukkan adanya interaksi. Khususnya, pada jarak collet yang lebih besar (36 mm), perbedaan kekasaran permukaan antara berbagai nilai RDOC menjadi lebih jelas.

g. Interaksi *Feed per Tooth*, *Radial Depth of Cut*, dan Jarak dari *Collet* pada Kekasaran Permukaan

Berdasarkan tabel ANOVA pada tabel 4.11, nilai  $F_{hitung} = 27.033 > F_{tabel} 0.05(2.12)$  berarti hipotesis ditolak. Nilai signifikansi menunjukkan angka  $0.000 < 0.05$ , juga menunjukkan hipotesis ditolak. Ini menyatakan bahwa “ada interaksi *feed per tooth*, *radial depth of cut*, dan jarak dari *collet* dalam menentukan kekasaran permukaan”.

Hasil pengujian ANOVA menyatakan hipotesis ditolak, berarti terdapat perbedaan atau signifikansi. Dengan demikian, terdapat uji lanjutan *post hoc test* menggunakan *Minitab18*

dengan metode Tukey dan Bonferroni untuk mengidentifikasi secara spesifik pasangan kelompok mana yang berbeda secara signifikan setelah ANOVA menunjukkan adanya perbedaan umum.

**Tabel 4. 12** Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: FPT Kekasaran Permukaan

**Grouping Information Using the Tukey Method and Bonferroni Method 95% Confidence**

FPT	N	Mean	Grouping	FPT	N	Mean	Grouping
0,308	27	3,06315	A	0,308	27	3,06315	A
0,301	27	2,42826	B	0,301	27	2,42826	B
0,294	27	2,26181	B	0,294	27	2,26181	B

*Means that do not share a letter are significantly different.*

Analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam tingkat kekasaran permukaan pada berbagai nilai FPT. Hasil pengelompokkan adalah sebagai berikut:

1. FPT 0.308 mm/tooth (ditandai dengan huruf A) menghasilkan kekasaran permukaan tertinggi. Tingkat kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan dari dua nilai lainnya (FPT 0.301 mm/tooth dan FPT 0.294 mm/tooth)
2. FPT 0.301 mm/tooth dan FPT 0.294 mm/tooth (ditandai dengan huruf B) menghasilkan kekasaran permukaan lebih rendah dibanding FPT 0.308 mm/tooth. Keduanya ditandai dengan huruf B yang berarti menghasilkan tingkat kekasaran permukaan tidak berbeda signifikan satu sama lain.

Hasil mengindikasikan bahwa peningkatan nilai FPT berdampak nyata pada peningkatan kekasaran permukaan. Hal ini mungkin disebabkan oleh jarak yang lebih besar antara jejak pemotongan gigi pahat pada FPT yang lebih tinggi, yang mengakibatkan profil permukaan yang lebih kasar. Hasil di atas selaras dengan penelitian Zubaidi (Zubaidi, Syafa'at and Darmanto, 2012) menyimpulkan bahwa harga *feeding* berpengaruh pada tingkat kekasaran permukaan, semakin besar harga *feeding* semakin besar tingkat kekasarannya.

**Tabel 4. 13** Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: RDOC Kekasaran Permukaan  
**Grouping Information Using the Tukey Method and Bonferroni Method 95% Confidence**

RDOC	N	Mean	Grouping	RDOC	N	Mean	Grouping
1,50	27	2,79330	A	1,50	27	2,79330	A
1,25	27	2,62822	A	1,25	27	2,62822	A
1,00	27	2,33170	B	1,00	27	2,33170	B

*Means that do not share a letter are significantly different.*

Analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam tingkat kekasaran permukaan pada berbagai nilai RDOC. Hasil pengelompokan adalah sebagai berikut:

1. RDOC 1.50 mm dan 1.25 mm (ditandai dengan huruf A) menghasilkan tingkat kekasaran permukaan tidak berbeda signifikan satu sama lain.
2. RDOC 1.00 mm (ditandai dengan huruf B) menghasilkan kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan dan lebih rendah dibandingkan dengan dua nilai RDOC lainnya (RDOC 1.25 mm dan 1.50 mm).

Hasil mengindikasikan bahwa peningkatan nilai RDOC berdampak nyata pada peningkatan kekasaran permukaan. Hal ini dapat dijelaskan oleh beban pemotongan yang lebih besar pada RDOC yang lebih tinggi, yang mengakibatkan peningkatan gaya potong dan getaran, sehingga mempengaruhi kualitas permukaan hasil pemesinan. Penggunaan RDOC yang lebih rendah (1.00 mm) dapat dipertimbangkan untuk menghasilkan permukaan yang lebih halus.

**Tabel 4. 14** Tukey dan Bonferroni Pairwise Comparisons: Jarak Collet Kekasaran Permukaan

**Grouping Information Using the Tukey Method and Bonferroni Method 95% Confidence**

Collet	N	Mean	Grouping	Collet	N	Mean	Grouping
36	27	3,08974	A	36	27	3,08974	A
32	27	2,48563	B	32	27	2,48563	B
28	27	2,17785	C	28	27	2,17785	C

*Means that do not share a letter are significantly different.*

Analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam tingkat kekasaran permukaan pada berbagai jarak dari collet. Ketiga nilai jarak yang diuji menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan satu sama lain, dengan pengelompokan sebagai berikut:

1. Jarak 36 mm dari collet (ditandai dengan huruf A) menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan dan lebih tinggi dibandingkan dengan dua nilai jarak lainnya.
2. Jarak 32 mm dari collet (ditandai dengan huruf B) menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan dan lebih rendah dibandingkan dengan jarak 36 mm, namun lebih tinggi dibandingkan dengan jarak 28 mm.
3. Jarak 28 mm dari collet (ditandai dengan huruf C) menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang secara statistik berbeda signifikan dan paling rendah dibandingkan dengan dua nilai jarak lainnya.

Hasil mengindikasikan bahwa peningkatan jarak dari collet berdampak nyata pada peningkatan kekasaran permukaan. Hal ini dapat dijelaskan oleh berkurangnya kekakuan sistem seiring bertambahnya jarak dari collet, yang mengakibatkan peningkatan getaran dan defleksi pahat, sehingga mempengaruhi kualitas permukaan hasil pemesinan.

### 4.2.3 Analisis Regresi

Analisis regresi digunakan untuk penelitian korelasi. Analisis korelasi bertujuan untuk mengetahui ada atau tidaknya hubungan serta mengukur kuat atau lemahnya hubungan antara dua variabel. Analisis regresi sederhana menurut Kadir (Kadir, 2010) digunakan untuk menjelaskan hubungan antara kedua variabel. Selain itu, analisis regresi bertujuan menentukan persamaan regresi yang dapat digunakan untuk menaksir nilai variabel dependen bersumber dari Nuryadi (Nuryadi *et al.*, 2017).

#### 4.2.3.1 Analisis Regresi Keausan Pahat

Berikut ini dibahas analisis regresi data keausan pahat yang terdiri dari dua tabel, yaitu *model summary* dan *coefficients*.

**Tabel 4. 15** Analisis Regresi Keausan Pahat

<b>Model Summary</b>				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.491 <sup>a</sup>	.241	.234	.027350324
2	.273 <sup>b</sup>	.074	.066	.030210017
3	.503 <sup>c</sup>	.253	.246	.027134995

a. Predictors: (Constant), FPT

b. Predictors: (Constant), RDOC

c. Predictors: (Constant), Ap

Pada tabel 4.15, model 1 memiliki nilai korelasi atau hubungan (R) sebesar 0.491 antara *feed per tooth* dengan keausan pahat. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada model 1 sebesar 0.241, yang menunjukkan bahwa pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat adalah sebesar 24.1%.

Model 2 memiliki nilai korelasi atau hubungan (R) sebesar 0.273 antara *radial depth of cut* dengan keausan pahat. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada model 2 sebesar 0.074, yang menunjukkan bahwa pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat adalah sebesar 7.4%.

Model 3 memiliki nilai korelasi atau hubungan (R) sebesar 0.503 antara rentang *axial depth of cut* dengan keausan pahat. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada model 2 sebesar 0.253, yang menunjukkan bahwa pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat adalah sebesar 25.3%.

Disimpulkan bahwa besar pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat sebesar 24.1%, pengaruh *radial depth of cut* sebesar 7.4%, dan rentang *axial depth of cut* sebesar 25.3%.

**Tabel 4. 16** Koefisien Regresi Keausan Pahat Variabel FPT

		Coefficients <sup>a</sup>			t	Sig.
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.050	.007		7.194	.000
	FPT	.019	.003	.491	5.807	.000

a. Dependent Variable: Keausan Pahat

Pada tabel 4.16, nilai *constant* (a) adalah 0.050 dan nilai *feed per tooth* (b) adalah 0.019. Konstanta positif menunjukkan bahwa jika nilai *feed per tooth* nol, maka nilai keausan pahat sebesar 0.050. Koefisien regresi variabel *feed per tooth* bernilai positif, artinya saat *feed per tooth* meningkat, keausan pahat juga meningkat. Setiap peningkatan 1 satuan *feed per tooth* menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.019. Sehingga, persamaan regresinya:

$$Y = 0.050 + 0.019X$$

Persamaan tersebut berarti:

- Konstanta sebesar 0.050 menunjukkan bahwa nilai tetap variabel keausan pahat adalah 0.050.
- Koefisien regresi X sebesar 0.019 menyatakan bahwa setiap peningkatan 1% *feed per tooth* menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.019 atau 1.9%. Karena koefisien regresi bernilai positif, arah pengaruh variabel X terhadap Y adalah positif.

Berdasarkan nilai signifikansi dari tabel *coefficients*, diperoleh nilai signifikansi  $0.000 < 0.05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *feed per tooth* (X) berpengaruh terhadap variabel keausan pahat (Y).

Nilai  $t_{hitung}$  sebesar  $5.807 > t_{tabel}$  1.982, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *feed per tooth* (X) berpengaruh signifikan terhadap variabel keausan pahat (Y).

**Tabel 4. 17** Koefisien Regresi Keausan Pahat Variabel RDOC

Model		Coefficients <sup>a</sup>			t	Sig.
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.067	.008		8.678	.000
	RDOC	.010	.004	.273	2.919	.004

a. Dependent Variable: Keausan Pahat

Pada tabel 4.17, nilai *constant* (a) adalah 0.067 dan nilai *radial depth of cut* (b) adalah 0.010. Konstanta positif menunjukkan bahwa jika nilai *radial depth of cut* nol, maka nilai keausan pahat sebesar 0.067. Koefisien regresi variabel *radial depth of cut* bernilai positif, artinya saat *radial depth of cut* meningkat, keausan pahat juga meningkat. Setiap peningkatan 1 satuan *radial depth of cut* menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.010. Sehingga, persamaan regresinya:

$$Y = 0.067 + 0.010X$$

Persamaan tersebut berarti:

- Konstanta sebesar 0.067 menunjukkan bahwa nilai tetap variabel keausan pahat adalah 0.067.
- Koefisien regresi X sebesar 0.010 menyatakan bahwa setiap peningkatan 1% *radial depth of cut* menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.010 atau 1.0%. Karena koefisien regresi bernilai positif, arah pengaruh variabel X terhadap Y adalah positif.

Berdasarkan nilai signifikansi dari tabel *coefficients*, diperoleh nilai signifikansi  $0.004 < 0.05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *radial depth of cut* (X) berpengaruh terhadap variabel keausan pahat (Y).

Nilai  $t_{hitung}$  sebesar  $2.919 > t_{tabel}$  1.98282, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *radial depth of cut* (X) berpengaruh signifikan terhadap variabel keausan pahat (Y).

**Tabel 4. 18** Koefisien Regresi Keausan Pahat Variabel Rentang Ap

Model		Coefficients <sup>a</sup>			t	Sig.
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.049	.007		7.119	.000
	Ap	.019	.003	.503	5.996	.000

a. Dependent Variable: Keausan Pahat

Pada tabel 4.18, nilai *constant* (a) adalah 0.049 dan nilai rentang Ap (b) adalah 0.019. Konstanta positif menunjukkan bahwa jika nilai rentang Ap nol, maka nilai keausan pahat sebesar 0.049. Koefisien regresi variabel rentang Ap bernilai positif, artinya saat rentang Ap meningkat, keausan pahat juga meningkat. Setiap peningkatan 1 satuan rentang Ap menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.019. Sehingga, persamaan regresinya:

$$Y = 0.049 + 0.019X$$

Persamaan tersebut berarti:

- Konstanta sebesar 0.049 menunjukkan bahwa nilai tetap variabel keausan pahat adalah 0.049.
- Koefisien regresi X sebesar 0.019 menyatakan bahwa setiap peningkatan 1% rentang Ap menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.019 atau 1.9%. Karena koefisien regresi bernilai positif, arah pengaruh variabel X terhadap Y adalah positif.

Berdasarkan nilai signifikansi dari tabel *coefficients*, diperoleh nilai signifikansi  $0.000 < 0.05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel rentang Ap (X) berpengaruh terhadap variabel keausan pahat (Y).

Nilai  $t_{hitung}$  sebesar  $5.996 > t_{tabel} 1.98282$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel rentang Ap (X) berpengaruh signifikan terhadap variabel keausan pahat (Y).

#### 4.2.3.2 Analisis Regresi Kekasaran Permukaan

Berikut ini dibahas analisis regresi data kekasaran permukaan yang terdiri dari dua tabel, yaitu *model summary* dan *coefficients*.

**Tabel 4. 19** Analisis Regresi Kekasaran Permukaan

<b>Model Summary</b>				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.527 <sup>a</sup>	.278	.268	.53445
2	.303 <sup>b</sup>	.092	.081	.59913
3	.600 <sup>c</sup>	.359	.351	.50326

- a. Predictors: (Constant), Variasi FPT
- b. Predictors: (Constant), Variasi RDOC
- c. Predictors: (Constant), Collet

Pada tabel 4.19, model 1 memiliki nilai korelasi atau hubungan (R) sebesar 0.527 antara *feed per tooth* dengan kekasaran permukaan. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada model 1 sebesar

0.278, yang menunjukkan bahwa pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat adalah sebesar 27.8%.

Model 2 memiliki nilai korelasi atau hubungan (R) sebesar 0.303 antara *radial depth of cut* dengan kekasaran permukaan. Koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) pada model 2 sebesar 0.092, yang menunjukkan bahwa pengaruh *radial depth of cut* terhadap keausan pahat adalah sebesar 9.2%.

Model 3 memiliki nilai korelasi atau hubungan (R) sebesar 0.600 antara jarak dari *collet* dengan kekasaran permukaan. Koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) pada model 2 sebesar 0.359, yang menunjukkan bahwa pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat adalah sebesar 35.9%.

Disimpulkan bahwa besar pengaruh *feed per tooth* terhadap keausan pahat sebesar 27.8%, pengaruh *radial depth of cut* terhadap keausan pahat sebesar 9.2%, dan pengaruh jarak dari *collet* sebesar 35.9%.

**Tabel 4. 20** Koefisien Regresi Kekasaran Permukaan Variabel FPT

		Coefficients <sup>a</sup>			t	Sig.
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	1.783	.157		11.349	.000
	Variasi FPT	.401	.073	.527	5.509	.000

a. Dependent Variable: Kekasaran Permukaan

Pada tabel 4.20, nilai *constant* (a) adalah 1.783 dan nilai *feed per tooth* (b) adalah 0.401. Konstanta positif menunjukkan bahwa jika nilai *feed per tooth* nol, maka nilai kekasaran permukaan sebesar 1.783. Koefisien regresi variabel *feed per tooth* bernilai positif, artinya saat *feed per tooth* meningkat, kekasaran permukaan juga meningkat. Setiap peningkatan 1 satuan *feed per tooth* menyebabkan keausan pahat bertambah sebesar 0.401. Sehingga, persamaan regresinya:

$$Y = 1.783 + 0.401X$$

Persamaan tersebut berarti:

- Konstanta sebesar 1.783 menunjukkan bahwa nilai tetap variabel kekasaran permukaan adalah 1.783.
- Koefisien regresi X sebesar 0.401 menyatakan bahwa setiap peningkatan 1% *feed per tooth* menyebabkan kekasaran permukaan bertambah sebesar 0.401 atau 40.1%. Karena koefisien regresi bernilai positif, arah pengaruh variabel X terhadap Y adalah positif.



Berdasarkan nilai signifikansi dari tabel *coefficients*, diperoleh nilai signifikansi  $0.000 < 0.05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *feed per tooth* (X) berpengaruh terhadap variabel kekasaran permukaan (Y).

Nilai  $t_{hitung}$  sebesar  $5.509 > t_{tabel}$  1.990, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *feed per tooth* (X) berpengaruh signifikan terhadap variabel kekasaran permukaan (Y).

**Tabel 4. 21** Koefisien Regresi Kekasaran Permukaan Variabel RDOC

Model		Coefficients <sup>a</sup>			t	Sig.
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	2.123	.176		12.053	.000
	Variasi RDOC	.231	.082	.303	2.831	.006

a. Dependent Variable: Kekasaran Permukaan

Pada tabel 4.21, nilai *Constant* (a) adalah 2.123 dan nilai *radial depth of cut* (b) adalah 0.231. Konstanta positif menunjukkan bahwa jika nilai *radial depth of cut* nol, maka nilai kekasaran permukaan sebesar 2.123. Koefisien regresi variabel *radial depth of cut* bernilai positif, artinya saat *radial depth of cut* meningkat, kekasaran permukaan mengalami kenaikan. Setiap peningkatan 1 satuan *radial depth of cut* menyebabkan kekasaran permukaan bertambah sebesar 0.231. Sehingga, persamaan regresinya:

$$Y = 2.123 + 0.231X$$

Persamaan tersebut berarti:

- Konstanta sebesar 2.123 menunjukkan bahwa nilai tetap variabel kekasaran permukaan adalah 2.123.
- Koefisien regresi X sebesar 0.231 menyatakan bahwa setiap peningkatan 1% *radial depth of cut* menyebabkan kekasaran permukaan bertambah sebesar 0.231 atau 23.1%. Karena koefisien regresi bernilai positif, arah pengaruh variabel X terhadap Y adalah positif.

Berdasarkan nilai signifikansi dari tabel *coefficients*, diperoleh nilai signifikansi  $0.006 < 0.05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *radial depth of cut* (X) berpengaruh terhadap variabel kekasaran permukaan (Y).

Nilai  $t_{hitung}$  sebesar  $2.831 > t_{tabel}$  1.990, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel *feed per tooth* (X) berpengaruh signifikan terhadap variabel kekasaran permukaan (Y).

**Tabel 4. 22** Koefisien Regresi Kekasaran Permukaan Variabel Jarak dari Collet

		Coefficients <sup>a</sup>				
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized	t	Sig.
		B	Std. Error	Coefficients Beta		
1	(Constant)	1.673	.148		11.305	.000
	Collet	.456	.068	.600	6.658	.000

a. Dependent Variable: Kekasaran Permukaan

Pada tabel 4.22, nilai *constant* (a) adalah 1.673 dan nilai jarak dari *collet* (b) adalah 0.456. Konstanta positif menunjukkan bahwa jika nilai jarak dari *collet* nol, maka nilai kekasaran permukaan sebesar 1.673. Koefisien regresi variabel jarak dari *collet* bernilai positif, artinya saat jarak dari *collet* meningkat, kekasaran permukaan mengalami kenaikan. Setiap peningkatan 1 satuan jarak dari *collet* menyebabkan kekasaran permukaan bertambah sebesar 0.456. Sehingga, persamaan regresinya:

$$Y = 1.637 + 0.456X$$

Persamaan tersebut berarti:

- Konstanta sebesar 1.637 menunjukkan bahwa nilai tetap variabel kekasaran permukaan adalah 1.637.
- Koefisien regresi X sebesar 0.456 menyatakan bahwa setiap peningkatan 1% jarak dari *collet* menyebabkan kekasaran permukaan bertambah sebesar 0.456 atau 45.6%. Karena koefisien regresi bernilai positif, arah pengaruh variabel X terhadap Y adalah positif.

Berdasarkan nilai signifikansi dari tabel *coefficients*, diperoleh nilai signifikansi  $0.000 < 0.05$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel jarak dari *collet* (X) berpengaruh terhadap variabel kekasaran permukaan (Y).

Nilai  $t_{hitung}$  sebesar  $6.658 > t_{tabel}$  1.990, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel jarak dari *collet* (X) berpengaruh signifikan terhadap variabel kekasaran permukaan (Y).

### 4.3 Waktu Proses Pemesinan

Variasi parameter pada penelitian menghasilkan perbedaan estimasi waktu dalam proses pemesinan. Data yang diperoleh dalam setiap variasi parameter sebagai berikut.

**Tabel 4. 23** Cycle Time dan Path Length

Sampel	Parameter		Cycle Time	Path Length	
	Feed (mm-per-tooth)	Radial Depth of Cut (mm)		Feed	Rapid
1	0.294	1.00	32.09s	751.113	30.
2	0.294	1.25	32.09s	751.132	30.
3	0.294	1.50	32.09s	751.155	30.
4	0.301	1.00	31.75s	751.113	30.
5	0.301	1.25	31.75s	751.132	30.
6	0.301	1.50	31.75s	751.155	30.
7	0.308	1.00	31.41s	751.113	30.
8	0.308	1.25	31.41s	751.132	30.
9	0.308	1.50	31.41s	751.155	30.

Berdasarkan tabel di atas, siklus waktu paling cepat dalam proses pemesinan terdapat pada sampel 7, 8, dan 9, dengan waktu yang sama, yaitu 31.41 detik. Ketiga sampel tersebut menggunakan parameter *feed-per-tooth* sebesar 0.308 dan *radial depth of cut* masing-masing sebesar 1.00, 1.25, dan 1.50 mm. Sementara itu, siklus waktu paling lambat terdapat pada sampel 1, 2 dan 3, dengan waktu yang sama, yaitu 32.09 detik. Ketiga sampel tersebut menggunakan parameter *feed-per-tooth* sebesar 0.294 dan *radial depth of cut* masing-masing sebesar 1.00, 1.25, dan 1.50 mm. Dilihat dari tabel, semakin meningka nilai *feed-per-tooth*, maka siklus waktu semakin cepat.

Penelitian ini melakukan tiga kali pengujian setiap sampel, sehingga waktu pada tabel dikalikan tiga untuk mendapatkan waktu total pengerjaan setiap sampel. Setiap pengerjaan terdiri dari 5 *passes*, sehingga satu sampel memiliki 15 *passes*.

Pada *path length* setiap sampel, terlihat bahwa panjang pergerakan pahat saat *feed* ditentukan oleh besarnya nilai *radial depth of cut*. Selain itu, *path length* saat *rapid* memiliki panjang yang sama karena adanya sistem *keep tool down*. Nilai *feed* pada *path length* paling pendek adalah 751.113 untuk *radial depth of cut* sebesar 1.00 mm. Sedangkan, nilai *feed* pada *path length* paling panjang adalah 751.155 untuk *radial depth of cut* sebesar 1.50 mm. Semakin besar nilai *radial depth of cut*, maka pergerakan pahat sedikit lebih panjang, dan sebaliknya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen yang sudah dilakukan pada proses *high feed machining* mengenai pengaruh tiga variasi parameter terhadap keausan pahat dan kekasaran permukaan, didapatkan kesimpulan, yaitu:

1. Nilai keausan pahat tertinggi diperoleh pada *feed per tooth* 0.308 (kenaikan 10% dari rekomendasi *feed* maksimum) dan *radial depth of cut* 1.50 mm (15% diameter pahat). Sedangkan nilai keausan pahat terendah diperoleh pada *feed per tooth* 0.294 (kenaikan 5% dari rekomendasi *feed* maksimum) dan *radial depth of cut* 1.00 mm (10% diameter pahat).
2. Pengaruh *feed per tooth*, *radial depth of cut*, dan rentang Ap memiliki pengaruh yang signifikan pada keausan pahat. Model persamaan regresi untuk variabel *feed per tooth* terhadap keausan pahat yaitu  $Y = 0.050 + 0.019X$ , variabel *radial depth of cut* yaitu  $Y = 0.067 + 0.010X$ , dan variabel rentang Ap yaitu  $Y = 0.049 + 0.019X$
3. Nilai kekasaran permukaan tertinggi  $\mu\text{m}$  yang diperoleh pada *feed per tooth* 0.308 (kenaikan 10% dari rekomendasi *feed* maksimum) dan *radial depth of cut* 1.50 mm (15% diameter pahat). Sedangkan nilai kekasaran permukaan terendah diperoleh pada *feed per tooth* 0.294 (kenaikan 5% dari rekomendasi *feed* maksimum) dan *radial depth of cut* 1.00 mm (10% diameter pahat).
4. Pengaruh *feed per tooth*, *radial depth of cut*, dan jarak dari *collet* memiliki pengaruh yang signifikan pada kekasaran permukaan. Model persamaan regresi untuk variabel *feed per tooth* terhadap kekasaran permukaan yaitu  $Y = 1.783 + 0.401X$ , variabel *radial depth of cut* yaitu  $Y = 2.123 + 0.231X$ , dan jarak dari *collet* yaitu  $Y = 1.637 + 0.456X$ .

#### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan pembahasan sebelumnya, berikut terdapat saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Melakukan eksperimen pendahuluan sebelum melakukan penelitian utama, baik dari pertimbangan jenis/merk pahat, jenis material benda kerja, dan variasi parameter yang akan digunakan.

2. Memperluas rentang atau cakupan variasi parameter yang dipilih, sehingga pengaruh atau perbedaan setiap kenaikan parameter terlihat lebih signifikan.
3. Melakukan lebih dari satu eksperimen atau replikasi untuk setiap variasi parameter yang akan diteliti, guna meningkatkan keakuratan hasil.
4. Menggunakan alat uji selain mikroskop USB yang digunakan dalam penelitian ini, untuk mendapatkan hasil pengamatan yang lebih baik dan akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z. (2010) 'Mekanisme Keausan Pahat Pada Proses Pemesinan: Sebuah Tinjauan Pustaka', *Jurnal Momentum UNWAHAS*, 6(1), pp. 9–16.
- Amala, M. and Widyanto, S. (2014) 'Pengembangan Perangkat Lunak Sistem Operasi Mesin Milling CNC Trainer', *Jurnal Teknik Mesin*, 2(3), pp. 204–210.
- Amstead, B.H.; Ostwald, Phillip F; Begeman, M. L. (1986) *Manufacturing Processes Eighth Edition*. Eighth. Canada: JOHN WILEY & SONS.
- Bhushan, B. (2000) 'Surface roughness analysis and measurement techniques', *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*, pp. 49–119. doi: 10.1201/9780849377877-10.
- Black, J T.; Kohser, R. A. (2008) *DeGarmo's MATERIALS AND PROCESSES IN MANUFACTURING*. TENTH. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Budiharti, N. (2018) *Teori Dan Aplikasi Desain Eksperimen*. Malang: CV. Dream Litera Buana.
- Davim, J. P. (ed.) (2011) *Modern Machining Technology A practical guide*. United Kingdom: Woodhead Publishing.
- Duplák, J. *et al.* (2018) 'Evaluation of time efficiency of high feed milling', *TEM Journal*, 7(1), pp. 13–18. doi: 10.18421/TEM71-02.
- Groover, M. P. (2010) *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING*. 4th edn. JOHN WILEY & SONS, INC.
- Gyliene, V. and Eidukynas, V. (2016) 'The Numerical Analysis of Cutting Forces in High Feed Face Milling, Assuming the Milling Tool Geometry', *Procedia CIRP*, 46, pp. 436–439. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.132.
- Haripriadi, B. D. (2019) 'Analisa Pengaruh Variasi Parameter Pemotongan Dan Pendingin Terhadap Tingkat Keausan Pahat End Mill HSS Hasil Pemesinan CNC Router Milling Pada Aluminium Sheet 1100', *Journal of POLIMESIN*, 17(2), pp. 13–20.
- Jiang, Y. *et al.* (2023) 'Investigation on the high-feed milling of M28', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–27. doi: 10.1007/s00170-023-12005-9.
- Joshua (2015) *Experimental Investigation of Cutting Parameters on Surface Roughness Prediction during End Milling of Aluminium 6061 under MQL (Minimum Quantity Lubrication)*. University of Lagos.
- Jurina, F. *et al.* (2019) 'The tool wear observation of milling tools in high feed machining of hardened steels', *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM*

- Symposium*, 30(1), pp. 753–757. doi: 10.2507/30th.daaam.proceedings.103.
- Kadir (2010) *Statistika untuk Penelitian Ilmu-Ilmu Sosial*. Edited by Juredi. Jakarta: Rosemata Sampurna.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S. (2020) *Manufacturing Engineering and Technology Eighth Edition in SI Units Manufacturing Engineering and Technology*. 8th edn. United Kingdom: Pearson Education Limited.
- Krar, S.F; Amand, J. E. S. (1977) *Machine Shop Training Third Edition*. 3rd edn. Canada: McGraw-Hill Ryerson Limited.
- Kuruc, M. *et al.* (2018) ‘Comparison of high feed machining with conventional milling in terms of dimension accuracy and productivity’, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 29(1), pp. 0426–0434. doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.063.
- Kuruc, M. *et al.* (2019) ‘Comparison of high feed machining with conventional milling in terms of surface quality and productivity’, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 30(1), pp. 376–383. doi: 10.2507/30th.daaam.proceedings.051.
- Lusiana, E. D. and Mahmudi, M. (2021) *ANOVA untuk Penelitian Eksperimen*. Universitas Brawijaya Press.
- M. B., Brown & Forsythe, A. B. (1974) ‘Robust tests for the equality of variances’, *Journal of the American Statistical Association*, (69), pp. 364–367.
- Nuryadi *et al.* (2017) *Buku Ajar Dasar-dasar Statistik Penelitian, Sibuku Media*.
- Palanisamy, P., Rajendran, I. and Shanmugasundaram, S. (2008) ‘Prediction of tool wear using regression and ANN models in end-milling operation’, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(1–2), pp. 29–41. doi: 10.1007/s00170-007-0948-5.
- Purbosari, D. dkk (2012) *Karakterisasi Tingkat Kekasaran Permukaan Baja St 40 Hasil Pemesinan Cnc Milling Zk 7040 Efek Dari Kecepatan Pemakanan (Feed Rate) Dan Awal Waktu Pemberian Pendingin, Jurnal Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta*. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59379-1%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420070-8.00002-7%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.ab.2015.03.024%0Ahttps://doi.org/10.1080/07352689.2018.1441103%0Ahttp://www.chile.bmw-motorrad.cl/sync/showroom/lam/es/>.
- Saputro, H. (2010) ‘MODEL MATEMATIK UNTUK MEMPREDIKSI KEKASARAN



- PERMUKAAN HASIL PROSES CNC BUBUT TANPA PENDINGINAN Herman Saputro', 10(1), pp. 18–31.
- Schwartz, M. M. (1992) *Composite Materials Handbook*.
- Setyawan, D. A. (2021) *Petunjuk Praktikum Uji Normalitas & Uji Homogenitas Data dengan SPSS*, CV. Tahta Media Group.
- Stephenson, D.A. and Agapiou, J. S. (2006) *Metal Cutting Theory and Practice*. 2nd edn. CRC Press, Taylor & Francis group.
- Suresh, R., Basavarajappa, S. and Gaitonde, V. N. (2015) 'Experimental studies on the performance of multilayer coated carbide tool in hard turning of high strength low alloy steel', *Journal of Materials Research*, 30(20), pp. 3056–3064. doi: 10.1557/jmr.2015.236.
- Usmadi (2017) 'Uji Tukey dan Uji Scheffee : Uji Lanjut (Post Hoc Test)', *Jurnal of Information and Computer Technology Education*, 3(2), pp. 1–9.
- Wijaya, E. *et al.* (2024) *PENGANTAR STATISTIK (Konsep Dasar untuk Analisa Data)*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Youssef, E.-H. (2008) *Machining Technology Machine Tools and Operations*. London: CRC Press.
- Yudha, R. S. (2018) *PENGARUH AXIAL DEPTH OF CUT PADA PROSES SLOT MILLING DENGAN METODE MINIMUM QUANTITY LUBRICATION TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN ALUMINIUM A6061*. UNIVERSITAS BRAWIJAYA.
- Yuliara, I. M. (2016) *REGRESI LINIER SEDERHANA*. Universitas Udayana. doi: 10.1093/bja/62.4.429.
- Zubaidi, Syafa'at, A. and Darmanto (2012) 'Pengaruh Kecepatan Putar dan Kecepatan Pemakanan Terhadap Kekasaran Permukaan Material FCD 40 pada Mesin Bubut CNC', *Jurnal Momentum Fakultas Teknik*, 8, pp. 40–47. Universitas Wahid Hasyim Semarang.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

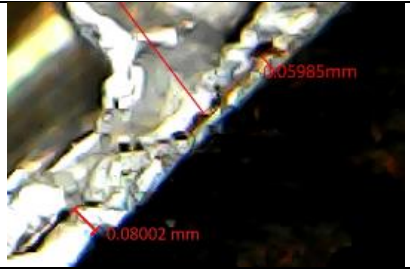
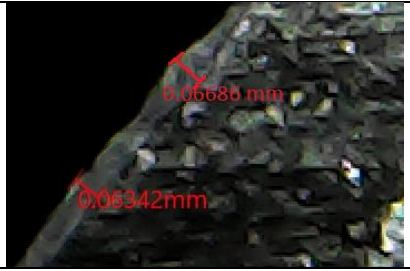

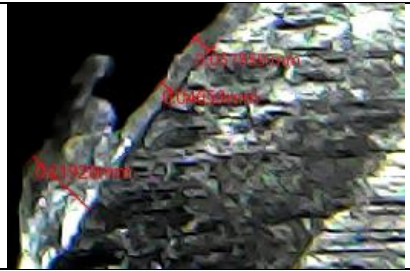
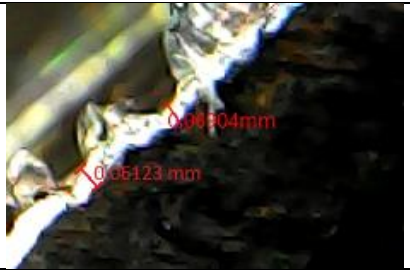
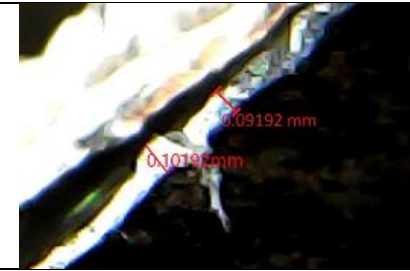
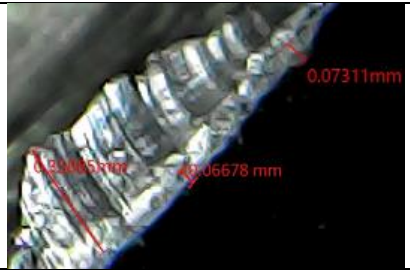
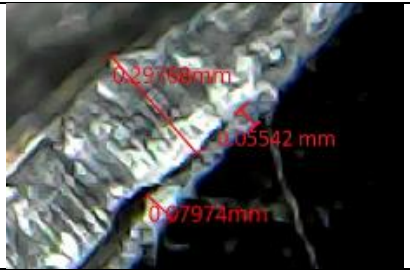
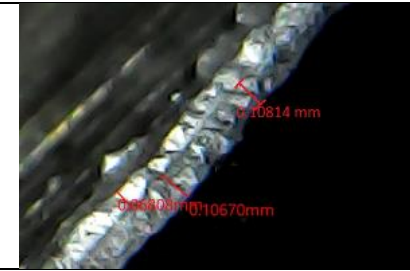
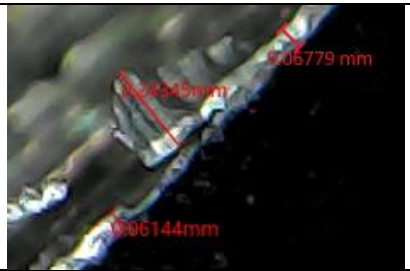
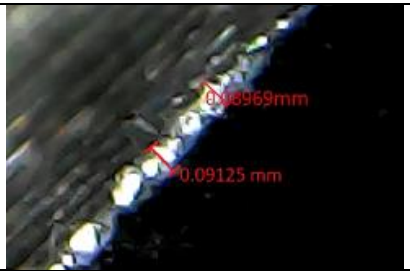
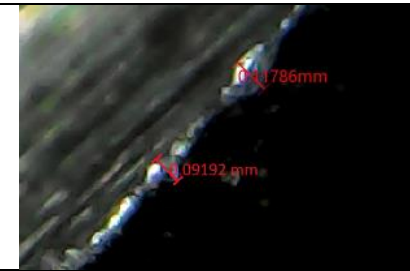
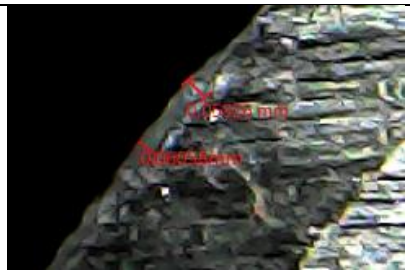

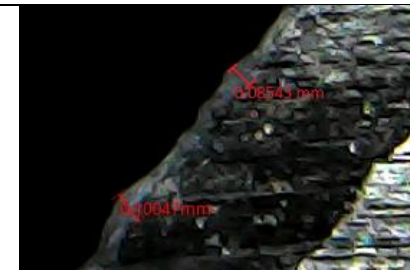
### A. Hasil Pahat

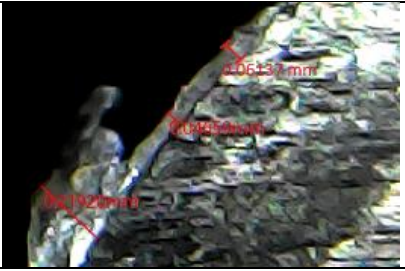
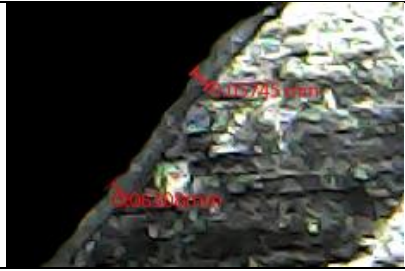
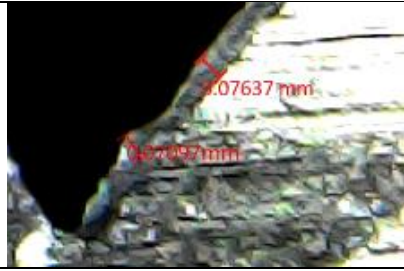
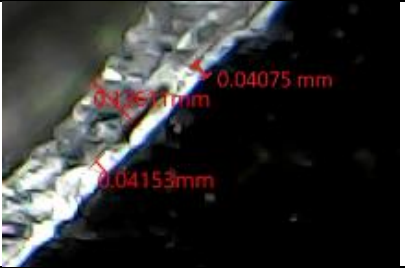
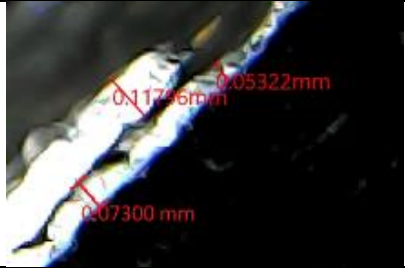
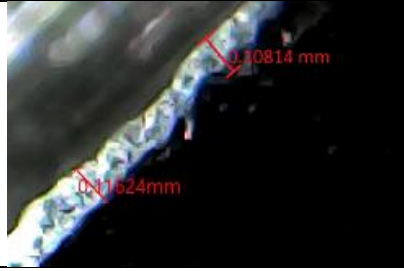
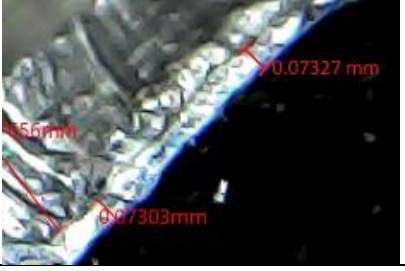
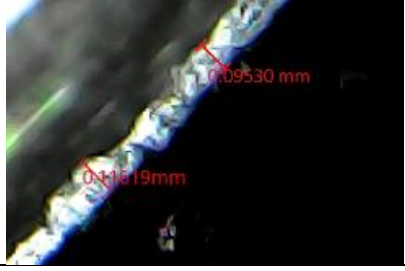


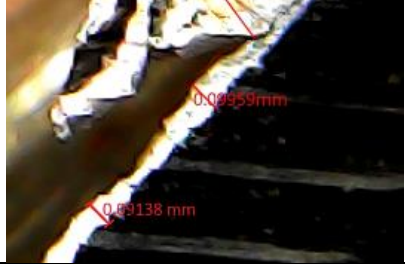
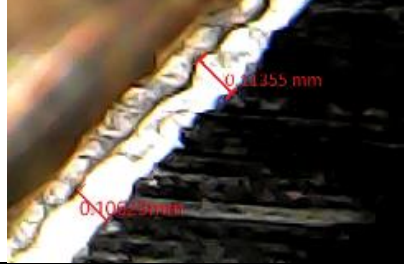
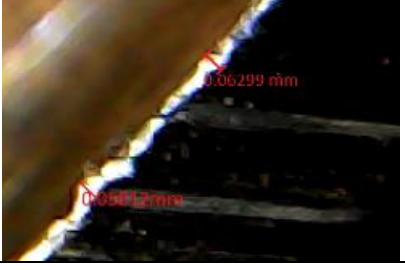
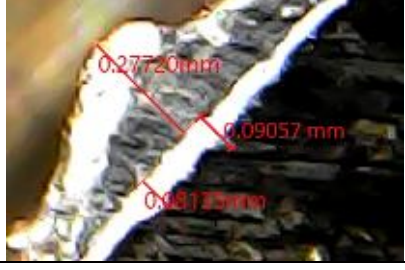

No	Pengerjaan 1		Pengerjaan 2		Pengerjaan 3	
	Flute 1	Flute 2	Flute 1	Flute 2	Flute 1	Flute 2
1						
2						
3						
4						
5						
6						



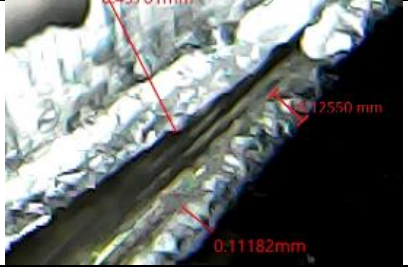
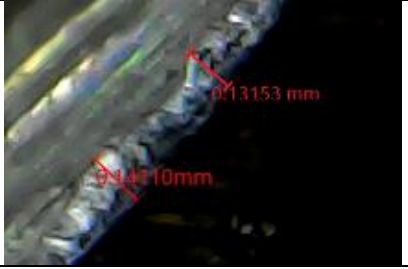
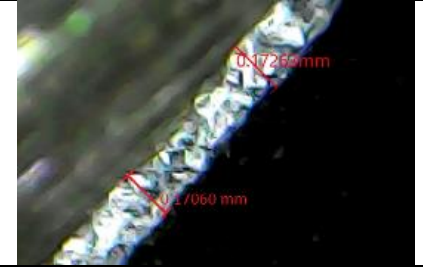
B. Hasil Pengamatan dan Pengukuran Aus Pahat Melalui Mikroskop USB

No dan Flute	Posisi Pengukuran (Rentang)		
	1	2	3
1 F1			
	0.05682 0.04055	0.07471 0.06488	0.06316 0.07435
F2			
	0.07029 0.05480	0.07421 0.09301	0.05339 0.05812

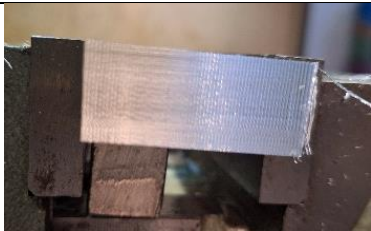
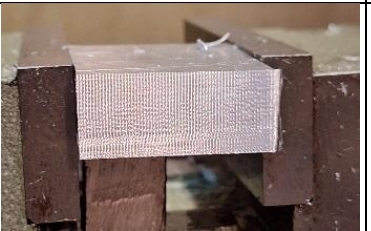



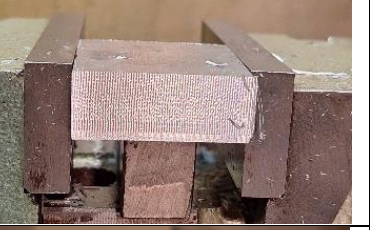
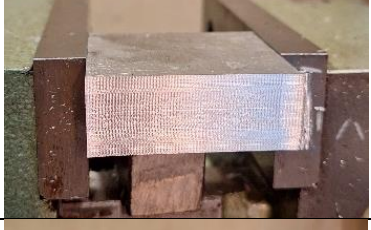


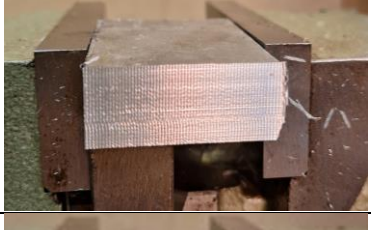
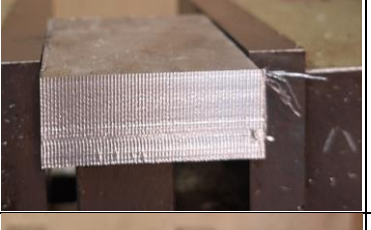
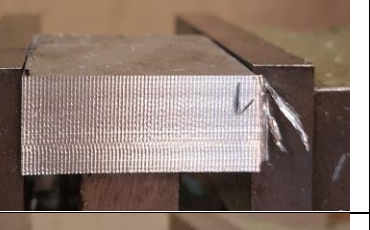

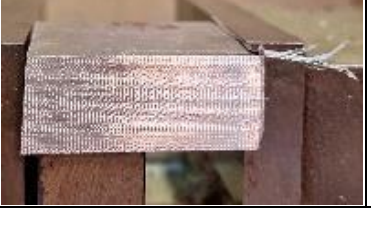

2	F1			
		0.05985	0.06342	0.11662
		0.08002	0.06686	0.09408
	F2			
		0.05785	0.06123	0.09192
		0.04659	0.06904	0.10192
3	F1			
		0.07311	0.07974	0.10670
		0.06678	0.05542	0.10814
	F2			
		0.06779	0.09125	0.09192
		0.06144	0.08969	0.11786
4	F1			
		0.06058	0.08638	0.10047
	0.05826	0.07327	0.08543	

	F2			
		0.05745	0.06137	0.07637
		0.04659	0.06308	0.07097
5	F1			
		0.04153	0.05322	0.11624
		0.04075	0.07300	0.10814
	F2			
		0.07327	0.09530	0.13924
		0.07303	0.11619	0.14110
6	F1			
		0.07471	0.09959	0.10623
		0.06840	0.09138	0.11355
	F2			
		0.06299	0.09057	0.09814
		0.05812	0.08135	0.11000

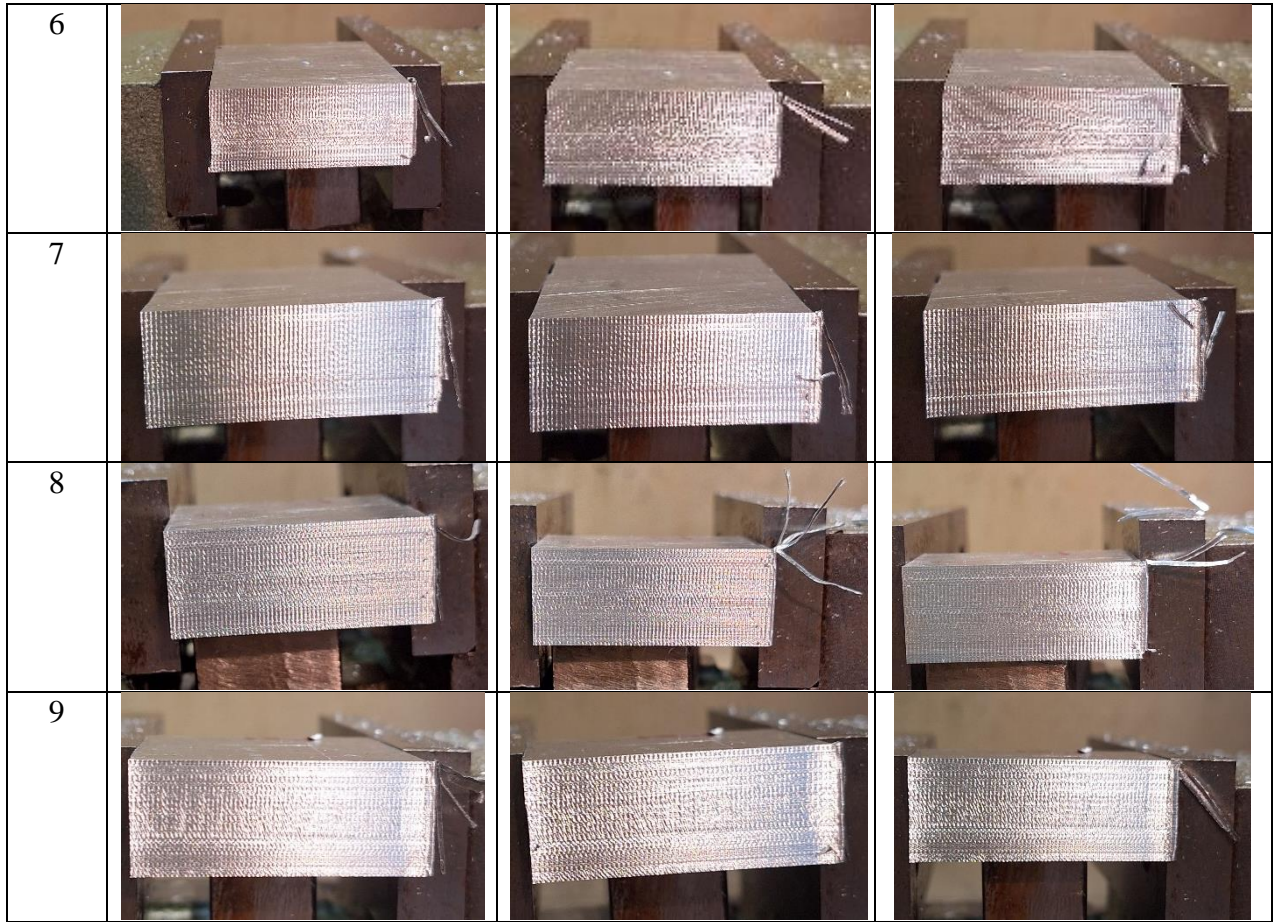
7	F1			
		0.04839	0.09018	0.09463
		0.05407	0.08381	0.08787
	F2			
		0.05948	0.09733	0.14870
		0.08799	0.12615	0.17089
8	F1			
		0.07664	0.12173	0.12619
		0.08462	0.13302	0.12383
	F2			
		0.09016	0.07949	0.14872
		0.09143	0.09679	0.16629
9	F1			
		0.08306	0.09981	0.15285
	0.09092	0.09625	0.11558	

F2			
	0.12550 0.11182	0.13153 0.14110	0.17060 0.17263

C. Hasil Benda Kerja

Pahat	Pengerjaan Ke-		
	1	2	3
1			
2			
3			
4			
5			





#### D. Hasil Pengujian *Surface Roughness*

No	Baris dan Posisi	Nilai	Grafik						
1	1B	<table border="1"> <tr> <td>Ra</td> <td>2.151 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>2.608 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>12.379 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </table>	Ra	2.151 $\mu\text{m}$	Rq	2.608 $\mu\text{m}$	Rz	12.379 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.151 $\mu\text{m}$							
Rq	2.608 $\mu\text{m}$								
Rz	12.379 $\mu\text{m}$								
1T	<table border="1"> <tr> <td>Ra</td> <td>2.066 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>2.574 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>12.570 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </table>	Ra	2.066 $\mu\text{m}$	Rq	2.574 $\mu\text{m}$	Rz	12.570 $\mu\text{m}$		
Ra	2.066 $\mu\text{m}$								
Rq	2.574 $\mu\text{m}$								
Rz	12.570 $\mu\text{m}$								

1A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.908 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.358 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>10.904 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.908 $\mu\text{m}$	Rq	2.358 $\mu\text{m}$	Rz	10.904 $\mu\text{m}$	
Ra	1.908 $\mu\text{m}$							
Rq	2.358 $\mu\text{m}$							
Rz	10.904 $\mu\text{m}$							
2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.181 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.591 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>10.626 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.181 $\mu\text{m}$	Rq	2.591 $\mu\text{m}$	Rz	10.626 $\mu\text{m}$	
Ra	2.181 $\mu\text{m}$							
Rq	2.591 $\mu\text{m}$							
Rz	10.626 $\mu\text{m}$							
2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.100 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.605 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.349 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.100 $\mu\text{m}$	Rq	2.605 $\mu\text{m}$	Rz	12.349 $\mu\text{m}$	
Ra	2.100 $\mu\text{m}$							
Rq	2.605 $\mu\text{m}$							
Rz	12.349 $\mu\text{m}$							
2A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.896 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.365 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.660 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.896 $\mu\text{m}$	Rq	2.365 $\mu\text{m}$	Rz	11.660 $\mu\text{m}$	
Ra	1.896 $\mu\text{m}$							
Rq	2.365 $\mu\text{m}$							
Rz	11.660 $\mu\text{m}$							
3B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.101 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.505 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>10.306 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.101 $\mu\text{m}$	Rq	2.505 $\mu\text{m}$	Rz	10.306 $\mu\text{m}$	
Ra	2.101 $\mu\text{m}$							
Rq	2.505 $\mu\text{m}$							
Rz	10.306 $\mu\text{m}$							
3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.031 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.349 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.105 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.031 $\mu\text{m}$	Rq	2.349 $\mu\text{m}$	Rz	9.105 $\mu\text{m}$	
Ra	2.031 $\mu\text{m}$							
Rq	2.349 $\mu\text{m}$							
Rz	9.105 $\mu\text{m}$							
3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.916 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.387 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.099 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.916 $\mu\text{m}$	Rq	2.387 $\mu\text{m}$	Rz	11.099 $\mu\text{m}$	
Ra	1.916 $\mu\text{m}$							
Rq	2.387 $\mu\text{m}$							
Rz	11.099 $\mu\text{m}$							

2	1B	Ra	2.848 $\mu\text{m}$		
		Rq	3.410 $\mu\text{m}$		
		Rz	14.693 $\mu\text{m}$		
	1T	Ra	2.478 $\mu\text{m}$		
		Rq	2.907 $\mu\text{m}$		
		Rz	12.459 $\mu\text{m}$		
	1A	Ra	1.837 $\mu\text{m}$		
	Rq	2.204 $\mu\text{m}$			
	Rz	9.704 $\mu\text{m}$			
2B	Ra	2.795 $\mu\text{m}$			
	Rq	3.353 $\mu\text{m}$			
	Rz	14.491 $\mu\text{m}$			
2T	Ra	2.449 $\mu\text{m}$			
	Rq	2.854 $\mu\text{m}$			
	Rz	12.062 $\mu\text{m}$			
2A	Ra	1.846 $\mu\text{m}$			
	Rq	2.215 $\mu\text{m}$			
	Rz	9.311 $\mu\text{m}$			
3B	Ra	2.815 $\mu\text{m}$			
	Rq	3.377 $\mu\text{m}$			
	Rz	14.541 $\mu\text{m}$			

	3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.472 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.940 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.676 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.472 $\mu\text{m}$	Rq	2.940 $\mu\text{m}$	Rz	11.676 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.472 $\mu\text{m}$							
Rq	2.940 $\mu\text{m}$								
Rz	11.676 $\mu\text{m}$								
3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.857 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.233 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.847 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.857 $\mu\text{m}$	Rq	2.233 $\mu\text{m}$	Rz	9.847 $\mu\text{m}$		
Ra	1.857 $\mu\text{m}$								
Rq	2.233 $\mu\text{m}$								
Rz	9.847 $\mu\text{m}$								
3	1B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.727 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.348 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>14.185 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.727 $\mu\text{m}$	Rq	3.348 $\mu\text{m}$	Rz	14.185 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.727 $\mu\text{m}$							
	Rq	3.348 $\mu\text{m}$							
	Rz	14.185 $\mu\text{m}$							
	1T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.268 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.793 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.193 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.268 $\mu\text{m}$	Rq	2.793 $\mu\text{m}$	Rz	12.193 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.268 $\mu\text{m}$							
Rq	2.793 $\mu\text{m}$								
Rz	12.193 $\mu\text{m}$								
1A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.052 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.520 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>10.823 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.052 $\mu\text{m}$	Rq	2.520 $\mu\text{m}$	Rz	10.823 $\mu\text{m}$		
Ra	2.052 $\mu\text{m}$								
Rq	2.520 $\mu\text{m}$								
Rz	10.823 $\mu\text{m}$								
2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.769 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.390 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>13.953 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.769 $\mu\text{m}$	Rq	3.390 $\mu\text{m}$	Rz	13.953 $\mu\text{m}$		
Ra	2.769 $\mu\text{m}$								
Rq	3.390 $\mu\text{m}$								
Rz	13.953 $\mu\text{m}$								
2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.286 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.807 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.152 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.286 $\mu\text{m}$	Rq	2.807 $\mu\text{m}$	Rz	12.152 $\mu\text{m}$		
Ra	2.286 $\mu\text{m}$								
Rq	2.807 $\mu\text{m}$								
Rz	12.152 $\mu\text{m}$								

	2A	Ra	2.082 $\mu\text{m}$	
		Rq	2.482 $\mu\text{m}$	
		Rz	10.508 $\mu\text{m}$	
	3B	Ra	2.765 $\mu\text{m}$	
		Rq	3.374 $\mu\text{m}$	
		Rz	13.914 $\mu\text{m}$	
	3T	Ra	2.294 $\mu\text{m}$	
		Rq	2.832 $\mu\text{m}$	
		Rz	12.297 $\mu\text{m}$	
	3A	Ra	2.079 $\mu\text{m}$	
		Rq	2.508 $\mu\text{m}$	
		Rz	11.143 $\mu\text{m}$	
4	1B	Ra	2.611 $\mu\text{m}$	
		Rq	3.132 $\mu\text{m}$	
		Rz	13.765 $\mu\text{m}$	
	1T	Ra	2.380 $\mu\text{m}$	
		Rq	2.891 $\mu\text{m}$	
		Rz	12.629 $\mu\text{m}$	
	1A	Ra	2.117 $\mu\text{m}$	
		Rq	2.533 $\mu\text{m}$	
		Rz	11.201 $\mu\text{m}$	

	2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.619 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.124 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>13.456 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.619 $\mu\text{m}$	Rq	3.124 $\mu\text{m}$	Rz	13.456 $\mu\text{m}$	
Ra	2.619 $\mu\text{m}$								
Rq	3.124 $\mu\text{m}$								
Rz	13.456 $\mu\text{m}$								
	2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.236 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.578 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.947 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.236 $\mu\text{m}$	Rq	2.578 $\mu\text{m}$	Rz	9.947 $\mu\text{m}$	
Ra	2.236 $\mu\text{m}$								
Rq	2.578 $\mu\text{m}$								
Rz	9.947 $\mu\text{m}$								
	2A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.176 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.594 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.587 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.176 $\mu\text{m}$	Rq	2.594 $\mu\text{m}$	Rz	11.587 $\mu\text{m}$	
Ra	2.176 $\mu\text{m}$								
Rq	2.594 $\mu\text{m}$								
Rz	11.587 $\mu\text{m}$								
	3B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.632 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.174 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>14.741 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.632 $\mu\text{m}$	Rq	3.174 $\mu\text{m}$	Rz	14.741 $\mu\text{m}$	
Ra	2.632 $\mu\text{m}$								
Rq	3.174 $\mu\text{m}$								
Rz	14.741 $\mu\text{m}$								
	3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.355 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.849 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.303 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.355 $\mu\text{m}$	Rq	2.849 $\mu\text{m}$	Rz	12.303 $\mu\text{m}$	
Ra	2.355 $\mu\text{m}$								
Rq	2.849 $\mu\text{m}$								
Rz	12.303 $\mu\text{m}$								
	3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.183 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.551 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.930 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.183 $\mu\text{m}$	Rq	2.551 $\mu\text{m}$	Rz	9.930 $\mu\text{m}$	
Ra	2.183 $\mu\text{m}$								
Rq	2.551 $\mu\text{m}$								
Rz	9.930 $\mu\text{m}$								
5	1B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.518 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.036 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>13.095 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.518 $\mu\text{m}$	Rq	3.036 $\mu\text{m}$	Rz	13.095 $\mu\text{m}$	
Ra	2.518 $\mu\text{m}$								
Rq	3.036 $\mu\text{m}$								
Rz	13.095 $\mu\text{m}$								

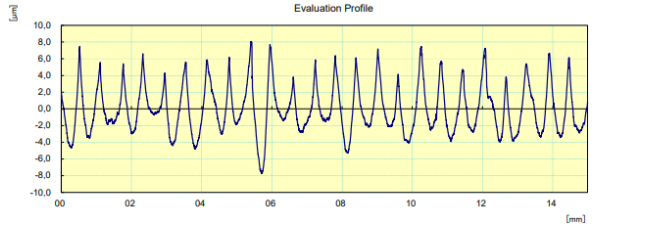
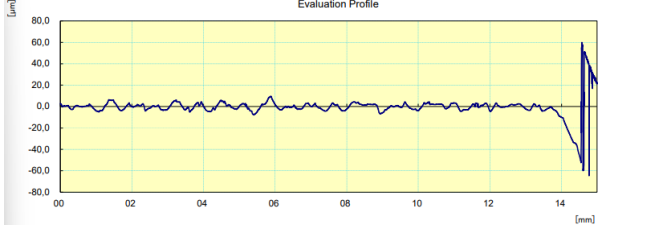
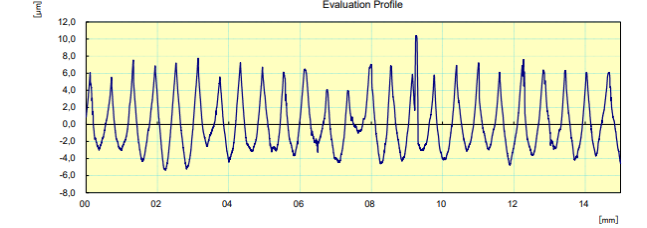
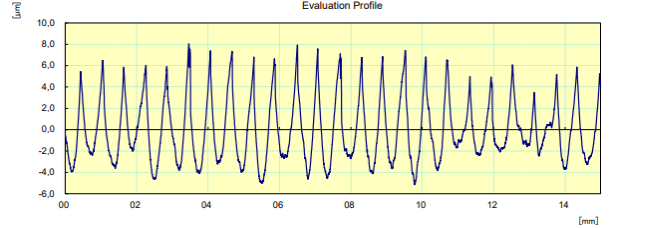
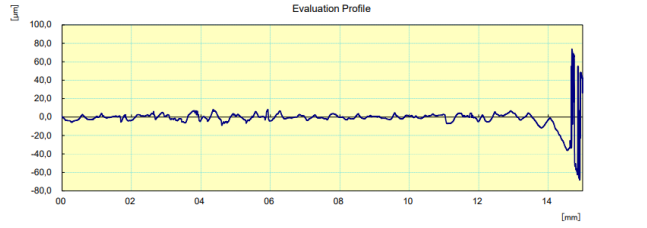
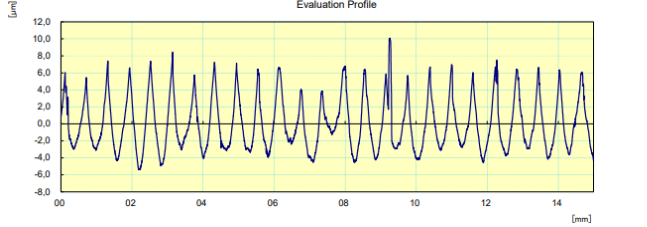
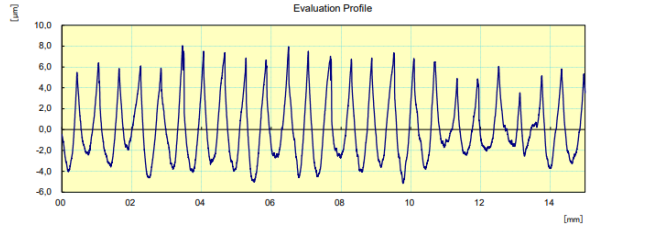
1T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.418 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.894 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.243 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.418 $\mu\text{m}$	Rq	2.894 $\mu\text{m}$	Rz	12.243 $\mu\text{m}$	
Ra	2.418 $\mu\text{m}$							
Rq	2.894 $\mu\text{m}$							
Rz	12.243 $\mu\text{m}$							
1A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.350 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.840 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.348 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.350 $\mu\text{m}$	Rq	2.840 $\mu\text{m}$	Rz	11.348 $\mu\text{m}$	
Ra	2.350 $\mu\text{m}$							
Rq	2.840 $\mu\text{m}$							
Rz	11.348 $\mu\text{m}$							
2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.569 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.072 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.734 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.569 $\mu\text{m}$	Rq	3.072 $\mu\text{m}$	Rz	12.734 $\mu\text{m}$	
Ra	2.569 $\mu\text{m}$							
Rq	3.072 $\mu\text{m}$							
Rz	12.734 $\mu\text{m}$							
2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.420 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.896 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.945 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.420 $\mu\text{m}$	Rq	2.896 $\mu\text{m}$	Rz	11.945 $\mu\text{m}$	
Ra	2.420 $\mu\text{m}$							
Rq	2.896 $\mu\text{m}$							
Rz	11.945 $\mu\text{m}$							
2A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.221 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.702 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.656 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.221 $\mu\text{m}$	Rq	2.702 $\mu\text{m}$	Rz	11.656 $\mu\text{m}$	
Ra	2.221 $\mu\text{m}$							
Rq	2.702 $\mu\text{m}$							
Rz	11.656 $\mu\text{m}$							
3B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.562 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.068 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.846 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.562 $\mu\text{m}$	Rq	3.068 $\mu\text{m}$	Rz	12.846 $\mu\text{m}$	
Ra	2.562 $\mu\text{m}$							
Rq	3.068 $\mu\text{m}$							
Rz	12.846 $\mu\text{m}$							
3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.424 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.900 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.217 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.424 $\mu\text{m}$	Rq	2.900 $\mu\text{m}$	Rz	12.217 $\mu\text{m}$	
Ra	2.424 $\mu\text{m}$							
Rq	2.900 $\mu\text{m}$							
Rz	12.217 $\mu\text{m}$							

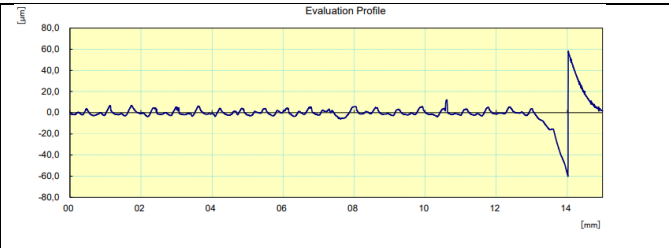
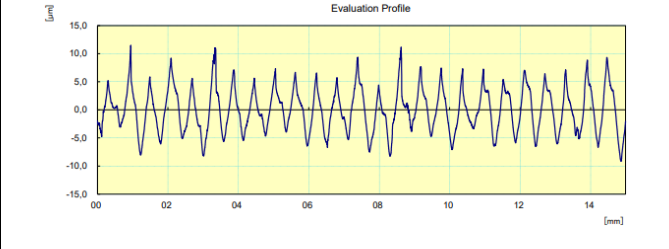
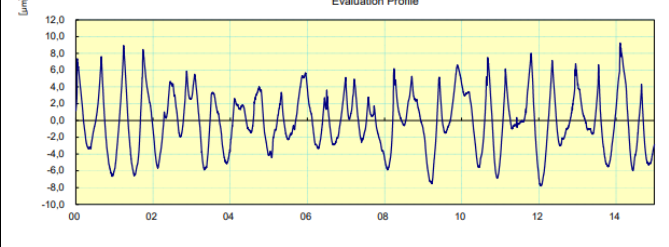
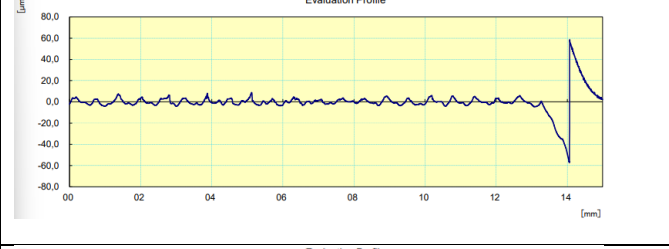
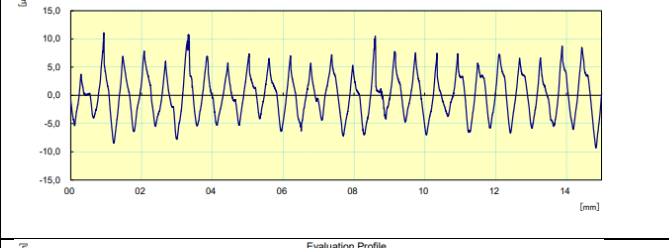
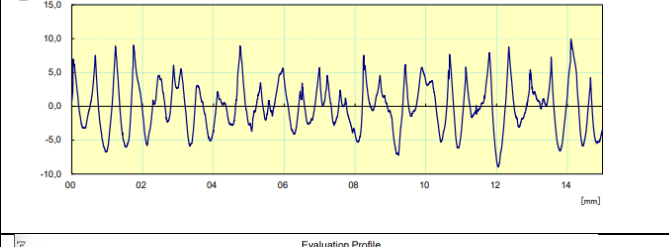
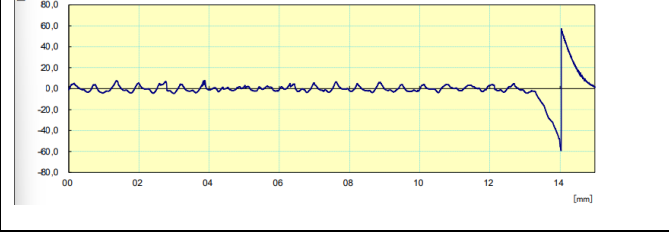
	3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.317 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.854 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.501 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.317 $\mu\text{m}$	Rq	2.854 $\mu\text{m}$	Rz	12.501 $\mu\text{m}$	
Ra	2.317 $\mu\text{m}$								
Rq	2.854 $\mu\text{m}$								
Rz	12.501 $\mu\text{m}$								
6	1B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.976 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.651 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>15.914 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.976 $\mu\text{m}$	Rq	3.651 $\mu\text{m}$	Rz	15.914 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.976 $\mu\text{m}$							
	Rq	3.651 $\mu\text{m}$							
	Rz	15.914 $\mu\text{m}$							
	1T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.396 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.946 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.396 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.396 $\mu\text{m}$	Rq	2.946 $\mu\text{m}$	Rz	12.396 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.396 $\mu\text{m}$							
	Rq	2.946 $\mu\text{m}$							
Rz	12.396 $\mu\text{m}$								
1A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.091 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.561 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.093 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.091 $\mu\text{m}$	Rq	2.561 $\mu\text{m}$	Rz	11.093 $\mu\text{m}$		
Ra	2.091 $\mu\text{m}$								
Rq	2.561 $\mu\text{m}$								
Rz	11.093 $\mu\text{m}$								
2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>3.028 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.686 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>16.134 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	3.028 $\mu\text{m}$	Rq	3.686 $\mu\text{m}$	Rz	16.134 $\mu\text{m}$		
Ra	3.028 $\mu\text{m}$								
Rq	3.686 $\mu\text{m}$								
Rz	16.134 $\mu\text{m}$								
2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.294 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.807 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>13.012 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.294 $\mu\text{m}$	Rq	2.807 $\mu\text{m}$	Rz	13.012 $\mu\text{m}$		
Ra	2.294 $\mu\text{m}$								
Rq	2.807 $\mu\text{m}$								
Rz	13.012 $\mu\text{m}$								
2A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.100 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.571 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.062 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.100 $\mu\text{m}$	Rq	2.571 $\mu\text{m}$	Rz	11.062 $\mu\text{m}$		
Ra	2.100 $\mu\text{m}$								
Rq	2.571 $\mu\text{m}$								
Rz	11.062 $\mu\text{m}$								



7	3B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>3.045 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.719 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>16.252 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	3.045 $\mu\text{m}$	Rq	3.719 $\mu\text{m}$	Rz	16.252 $\mu\text{m}$	
	Ra	3.045 $\mu\text{m}$							
	Rq	3.719 $\mu\text{m}$							
	Rz	16.252 $\mu\text{m}$							
	3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.328 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.936 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>13.575 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.328 $\mu\text{m}$	Rq	2.936 $\mu\text{m}$	Rz	13.575 $\mu\text{m}$	
Ra	2.328 $\mu\text{m}$								
Rq	2.936 $\mu\text{m}$								
Rz	13.575 $\mu\text{m}$								
3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.137 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.595 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.001 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.137 $\mu\text{m}$	Rq	2.595 $\mu\text{m}$	Rz	11.001 $\mu\text{m}$		
Ra	2.137 $\mu\text{m}$								
Rq	2.595 $\mu\text{m}$								
Rz	11.001 $\mu\text{m}$								
1B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>3.325 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.951 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>16.466 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	3.325 $\mu\text{m}$	Rq	3.951 $\mu\text{m}$	Rz	16.466 $\mu\text{m}$		
Ra	3.325 $\mu\text{m}$								
Rq	3.951 $\mu\text{m}$								
Rz	16.466 $\mu\text{m}$								
1T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.480 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.937 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.633 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.480 $\mu\text{m}$	Rq	2.937 $\mu\text{m}$	Rz	11.633 $\mu\text{m}$		
Ra	2.480 $\mu\text{m}$								
Rq	2.937 $\mu\text{m}$								
Rz	11.633 $\mu\text{m}$								
	1A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.899 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.238 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.563 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.899 $\mu\text{m}$	Rq	2.238 $\mu\text{m}$	Rz	9.563 $\mu\text{m}$	
Ra	1.899 $\mu\text{m}$								
Rq	2.238 $\mu\text{m}$								
Rz	9.563 $\mu\text{m}$								
	2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>3.373 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>4.000 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>16.779 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	3.373 $\mu\text{m}$	Rq	4.000 $\mu\text{m}$	Rz	16.779 $\mu\text{m}$	
Ra	3.373 $\mu\text{m}$								
Rq	4.000 $\mu\text{m}$								
Rz	16.779 $\mu\text{m}$								

	2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.513 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.998 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.583 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.513 $\mu\text{m}$	Rq	2.998 $\mu\text{m}$	Rz	11.583 $\mu\text{m}$	
	Ra	2.513 $\mu\text{m}$							
	Rq	2.998 $\mu\text{m}$							
	Rz	11.583 $\mu\text{m}$							
	2A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.881 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.217 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.422 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.881 $\mu\text{m}$	Rq	2.217 $\mu\text{m}$	Rz	9.422 $\mu\text{m}$	
	Ra	1.881 $\mu\text{m}$							
Rq	2.217 $\mu\text{m}$								
Rz	9.422 $\mu\text{m}$								
3B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>3.355 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.996 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>16.566 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	3.355 $\mu\text{m}$	Rq	3.996 $\mu\text{m}$	Rz	16.566 $\mu\text{m}$		
Ra	3.355 $\mu\text{m}$								
Rq	3.996 $\mu\text{m}$								
Rz	16.566 $\mu\text{m}$								
3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.528 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.005 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.000 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.528 $\mu\text{m}$	Rq	3.005 $\mu\text{m}$	Rz	12.000 $\mu\text{m}$		
Ra	2.528 $\mu\text{m}$								
Rq	3.005 $\mu\text{m}$								
Rz	12.000 $\mu\text{m}$								
3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>1.883 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.219 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>9.424 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	1.883 $\mu\text{m}$	Rq	2.219 $\mu\text{m}$	Rz	9.424 $\mu\text{m}$		
Ra	1.883 $\mu\text{m}$								
Rq	2.219 $\mu\text{m}$								
Rz	9.424 $\mu\text{m}$								
8	1B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>4.032 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>6.072 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>33.905 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	4.032 $\mu\text{m}$	Rq	6.072 $\mu\text{m}$	Rz	33.905 $\mu\text{m}$	
	Ra	4.032 $\mu\text{m}$							
Rq	6.072 $\mu\text{m}$								
Rz	33.905 $\mu\text{m}$								
1T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.654 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.172 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.629 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.654 $\mu\text{m}$	Rq	3.172 $\mu\text{m}$	Rz	12.629 $\mu\text{m}$		
Ra	2.654 $\mu\text{m}$								
Rq	3.172 $\mu\text{m}$								
Rz	12.629 $\mu\text{m}$								

1A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.372 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.915 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.201 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.372 $\mu\text{m}$	Rq	2.915 $\mu\text{m}$	Rz	12.201 $\mu\text{m}$	
Ra	2.372 $\mu\text{m}$							
Rq	2.915 $\mu\text{m}$							
Rz	12.201 $\mu\text{m}$							
2B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>4.272 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>6.001 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>30.793 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	4.272 $\mu\text{m}$	Rq	6.001 $\mu\text{m}$	Rz	30.793 $\mu\text{m}$	
Ra	4.272 $\mu\text{m}$							
Rq	6.001 $\mu\text{m}$							
Rz	30.793 $\mu\text{m}$							
2T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.642 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.152 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.523 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.642 $\mu\text{m}$	Rq	3.152 $\mu\text{m}$	Rz	12.523 $\mu\text{m}$	
Ra	2.642 $\mu\text{m}$							
Rq	3.152 $\mu\text{m}$							
Rz	12.523 $\mu\text{m}$							
2A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.473 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.942 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.629 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.473 $\mu\text{m}$	Rq	2.942 $\mu\text{m}$	Rz	11.629 $\mu\text{m}$	
Ra	2.473 $\mu\text{m}$							
Rq	2.942 $\mu\text{m}$							
Rz	11.629 $\mu\text{m}$							
3B	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>4.208 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>6.070 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>34.040 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	4.208 $\mu\text{m}$	Rq	6.070 $\mu\text{m}$	Rz	34.040 $\mu\text{m}$	
Ra	4.208 $\mu\text{m}$							
Rq	6.070 $\mu\text{m}$							
Rz	34.040 $\mu\text{m}$							
3T	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.639 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>3.143 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>12.484 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.639 $\mu\text{m}$	Rq	3.143 $\mu\text{m}$	Rz	12.484 $\mu\text{m}$	
Ra	2.639 $\mu\text{m}$							
Rq	3.143 $\mu\text{m}$							
Rz	12.484 $\mu\text{m}$							
3A	<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>2.474 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rq</td><td>2.940 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> <tr><td>Rz</td><td>11.568 <math>\mu\text{m}</math></td></tr> </table>	Ra	2.474 $\mu\text{m}$	Rq	2.940 $\mu\text{m}$	Rz	11.568 $\mu\text{m}$	
Ra	2.474 $\mu\text{m}$							
Rq	2.940 $\mu\text{m}$							
Rz	11.568 $\mu\text{m}$							

9	1B	Ra	4.471 $\mu\text{m}$	
		Rq	6.058 $\mu\text{m}$	
		Rz	29.261 $\mu\text{m}$	
	1T	Ra	3.257 $\mu\text{m}$	
		Rq	3.920 $\mu\text{m}$	
		Rz	17.809 $\mu\text{m}$	
	1A	Ra	2.863 $\mu\text{m}$	
	Rq	3.444 $\mu\text{m}$		
	Rz	13.752 $\mu\text{m}$		
2B	Ra	4.436 $\mu\text{m}$		
	Rq	5.892 $\mu\text{m}$		
	Rz	28.494 $\mu\text{m}$		
2T	Ra	3.220 $\mu\text{m}$		
	Rq	3.854 $\mu\text{m}$		
	Rz	16.967 $\mu\text{m}$		
2A	Ra	2.885 $\mu\text{m}$		
	Rq	3.517 $\mu\text{m}$		
	Rz	14.848 $\mu\text{m}$		
3B	Ra	4.470 $\mu\text{m}$		
	Rq	5.936 $\mu\text{m}$		
	Rz	28.108 $\mu\text{m}$		

3T	Ra	3.253 $\mu\text{m}$	
	Rq	3.877 $\mu\text{m}$	
	Rz	16.810 $\mu\text{m}$	
3A	Ra	2.847 $\mu\text{m}$	
	Rq	3.415 $\mu\text{m}$	
	Rz	13.711 $\mu\text{m}$	

### E. NC Program

Feeding 1 (2808 mm/min)		
RDOC (1 mm)	RDOC (1.25 mm)	RDOC (1.5 mm)
%	%	%
O0001	O0002	O0003
N100 G21	N100 G21	N100 G21
N104 T1 M6	N104 T1 M6	N104 T1 M6
N106 G0 G90 G54 X39. Y-30. S4775 M3	N106 G0 G90 G54 X38.75 Y-30. S4775 M3	N106 G0 G90 G54 X38.5 Y-30. S4775 M3
N108 Z25.	N108 Z25.	N108 Z25.
N110 Z10.	N110 Z10.	N110 Z10.
N112 G1 Z-17. F2808	N112 G1 Z-17. F2808	N112 G1 Z-17. F2808
N114 X29.	N114 X28.75	N114 X28.5
N116 G2 X19. Y-20. I0. J10.	N116 G2 X18.75 Y-20. I0. J10.	N116 G2 X18.5 Y-20. I0. J10.
N118 G1 Y20.	N118 G1 Y20.	N118 G1 Y20.
N120 G2 X29. Y30. I10. J0.	N120 G2 X28.75 Y30. I10. J0.	N120 G2 X28.5 Y30. I10. J0.
N122 G1 X39.	N122 G1 X38.75	N122 G1 X38.5
N124 X38. Y-30.	N124 X37.5 Y-30.	N124 X37. Y-30.
N126 X28.	N126 X27.5	N126 X27.
N128 G2 X18. Y-20. I0. J10.	N128 G2 X17.5 Y-20. I0. J10.	N128 G2 X17. Y-20. I0. J10.
N130 G1 Y20.	N130 G1 Y20.	N130 G1 Y20.
N132 G2 X28. Y30. I10. J0.	N132 G2 X27.5 Y30. I10. J0.	N132 G2 X27. Y30. I10. J0.
N134 G1 X38.	N134 G1 X37.5	N134 G1 X37.
N136 X37. Y-30.	N136 X36.25 Y-30.	N136 X35.5 Y-30.
N138 X27.	N138 X26.25	N138 X25.5
N140 G2 X17. Y-20. I0. J10.	N140 G2 X16.25 Y-20. I0. J10.	N140 G2 X15.5 Y-20. I0. J10.
N142 G1 Y20.	N142 G1 Y20.	N142 G1 Y20.
N144 G2 X27. Y30. I10. J0.	N144 G2 X26.25 Y30. I10. J0.	N144 G2 X25.5 Y30. I10. J0.
N146 G1 X37.	N146 G1 X36.25	N146 G1 X35.5
N148 X36. Y-30.	N148 X35. Y-30.	N148 X34. Y-30.
N150 X26.	N150 X25.	N150 X24.
N152 G2 X16. Y-20. I0. J10.	N152 G2 X15. Y-20. I0. J10.	N152 G2 X14. Y-20. I0. J10.
N154 G1 Y20.	N154 G1 Y20.	N154 G1 Y20.

N156 G2 X26. Y30. I10. J0. N158 G1 X36. N160 X35. Y-30. N162 X25. N164 G2 X15. Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20. N168 G2 X25. Y30. I10. J0. N170 G1 X35. N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %	N156 G2 X25. Y30. I10. J0. N158 G1 X35. N160 X33.75 Y-30. N162 X23.75 N164 G2 X13.75 Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20. N168 G2 X23.75 Y30. I10. J0. N170 G1 X33.75 N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %	N156 G2 X24. Y30. I10. J0. N158 G1 X34. N160 X32.5 Y-30. N162 X22.5 N164 G2 X12.5 Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20. N168 G2 X22.5 Y30. I10. J0. N170 G1 X32.5 N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %
Feeding 2 (2875 mm/min)		
RDOC (1 mm)	RDOC (1.25 mm)	RDOC (1.5 mm)
% O0001 N100 G21 N104 T1 M6 N106 G0 G90 G54 X39. Y-30. S4775 M3 N108 Z25. N110 Z10. N112 G1 Z-17. F2875 N114 X29. N116 G2 X19. Y-20. I0. J10. N118 G1 Y20. N120 G2 X29. Y30. I10. J0. N122 G1 X39. N124 X38. Y-30. N126 X28. N128 G2 X18. Y-20. I0. J10. N130 G1 Y20. N132 G2 X28. Y30. I10. J0. N134 G1 X38. N136 X37. Y-30. N138 X27. N140 G2 X17. Y-20. I0. J10. N142 G1 Y20. N144 G2 X27. Y30. I10. J0. N146 G1 X37. N148 X36. Y-30. N150 X26. N152 G2 X16. Y-20. I0. J10. N154 G1 Y20. N156 G2 X26. Y30. I10. J0. N158 G1 X36. N160 X35. Y-30.	% O0002 N100 G21 N104 T1 M6 N106 G0 G90 G54 X38.75 Y-30. S4775 M3 N108 Z25. N110 Z10. N112 G1 Z-17. F2875 N114 X28.75 N116 G2 X18.75 Y-20. I0. J10. N118 G1 Y20. N120 G2 X28.75 Y30. I10. J0. N122 G1 X38.75 N124 X37.5 Y-30. N126 X27.5 N128 G2 X17.5 Y-20. I0. J10. N130 G1 Y20. N132 G2 X27.5 Y30. I10. J0. N134 G1 X37.5 N136 X36.25 Y-30. N138 X26.25 N140 G2 X16.25 Y-20. I0. J10. N142 G1 Y20. N144 G2 X26.25 Y30. I10. J0. N146 G1 X36.25 N148 X35. Y-30. N150 X25. N152 G2 X15. Y-20. I0. J10. N154 G1 Y20. N156 G2 X25. Y30. I10. J0. N158 G1 X35. N160 X33.75 Y-30.	% O0003 N100 G21 N104 T1 M6 N106 G0 G90 G54 X38.5 Y-30. S4775 M3 N108 Z25. N110 Z10. N112 G1 Z-17. F2875 N114 X28.5 N116 G2 X18.5 Y-20. I0. J10. N118 G1 Y20. N120 G2 X28.5 Y30. I10. J0. N122 G1 X38.5 N124 X37. Y-30. N126 X27. N128 G2 X17. Y-20. I0. J10. N130 G1 Y20. N132 G2 X27. Y30. I10. J0. N134 G1 X37. N136 X35.5 Y-30. N138 X25.5 N140 G2 X15.5 Y-20. I0. J10. N142 G1 Y20. N144 G2 X25.5 Y30. I10. J0. N146 G1 X35.5 N148 X34. Y-30. N150 X24. N152 G2 X14. Y-20. I0. J10. N154 G1 Y20. N156 G2 X24. Y30. I10. J0. N158 G1 X34. N160 X32.5 Y-30.

N162 X25. N164 G2 X15. Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20. N168 G2 X25. Y30. I10. J0. N170 G1 X35. N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %	N162 X23.75 N164 G2 X13.75 Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20. N168 G2 X23.75 Y30. I10. J0. N170 G1 X33.75 N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %	N162 X22.5 N164 G2 X12.5 Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20. N168 G2 X22.5 Y30. I10. J0. N170 G1 X32.5 N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %
Feeding 3 (2942 mm/min)		
RDOC (1 mm)	RDOC (1.25 mm)	RDOC (1.5 mm)
% O0001 N100 G21 N104 T1 M6 N106 G0 G90 G54 X39. Y-30. S4775 M3 N108 Z25. N110 Z10. N112 G1 Z-17. F2942 N114 X29. N116 G2 X19. Y-20. I0. J10. N118 G1 Y20. N120 G2 X29. Y30. I10. J0. N122 G1 X39. N124 X38. Y-30. N126 X28. N128 G2 X18. Y-20. I0. J10. N130 G1 Y20. N132 G2 X28. Y30. I10. J0. N134 G1 X38. N136 X37. Y-30. N138 X27. N140 G2 X17. Y-20. I0. J10. N142 G1 Y20. N144 G2 X27. Y30. I10. J0. N146 G1 X37. N148 X36. Y-30. N150 X26. N152 G2 X16. Y-20. I0. J10. N154 G1 Y20. N156 G2 X26. Y30. I10. J0. N158 G1 X36. N160 X35. Y-30. N162 X25. N164 G2 X15. Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20.	% O0002 N100 G21 N104 T1 M6 N106 G0 G90 G54 X38.75 Y-30. S4775 M3 N108 Z25. N110 Z10. N112 G1 Z-17. F2942 N114 X28.75 N116 G2 X18.75 Y-20. I0. J10. N118 G1 Y20. N120 G2 X28.75 Y30. I10. J0. N122 G1 X38.75 N124 X37.5 Y-30. N126 X27.5 N128 G2 X17.5 Y-20. I0. J10. N130 G1 Y20. N132 G2 X27.5 Y30. I10. J0. N134 G1 X37.5 N136 X36.25 Y-30. N138 X26.25 N140 G2 X16.25 Y-20. I0. J10. N142 G1 Y20. N144 G2 X26.25 Y30. I10. J0. N146 G1 X36.25 N148 X35. Y-30. N150 X25. N152 G2 X15. Y-20. I0. J10. N154 G1 Y20. N156 G2 X25. Y30. I10. J0. N158 G1 X35. N160 X33.75 Y-30. N162 X23.75 N164 G2 X13.75 Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20.	% O0003 N100 G21 N104 T1 M6 N106 G0 G90 G54 X38.5 Y-30. S4775 M3 N108 Z25. N110 Z10. N112 G1 Z-17. F2942 N114 X28.5 N116 G2 X18.5 Y-20. I0. J10. N118 G1 Y20. N120 G2 X28.5 Y30. I10. J0. N122 G1 X38.5 N124 X37. Y-30. N126 X27. N128 G2 X17. Y-20. I0. J10. N130 G1 Y20. N132 G2 X27. Y30. I10. J0. N134 G1 X37. N136 X35.5 Y-30. N138 X25.5 N140 G2 X15.5 Y-20. I0. J10. N142 G1 Y20. N144 G2 X25.5 Y30. I10. J0. N146 G1 X35.5 N148 X34. Y-30. N150 X24. N152 G2 X14. Y-20. I0. J10. N154 G1 Y20. N156 G2 X24. Y30. I10. J0. N158 G1 X34. N160 X32.5 Y-30. N162 X22.5 N164 G2 X12.5 Y-20. I0. J10. N166 G1 Y20.

N168 G2 X25. Y30. I10. J0. N170 G1 X35. N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %	N168 G2 X23.75 Y30. I10. J0. N170 G1 X33.75 N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %	N168 G2 X22.5 Y30. I10. J0. N170 G1 X32.5 N172 G0 Z25. N174 M5 N176 G91 G28 Z0. N178 G28 X0. Y0. N180 M30 %
--	--	--



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 29 September 2001 di Bojonegoro, Jawa Timur. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Dalam menempuh jenjang pendidikan, penulis telah menyelesaikan pendidikan formal di jenjang berikut: SDN Pesanggrahan 01 Pagi, SMPN 177 Jakarta, dan SMAN 90 Jakarta. Penulis kemudian melanjutkan jenjang perkuliahan ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dengan program studi Teknologi Rekayasa Manufaktur di Departemen Teknik Mesin Industri (DTMI) Fakultas Vokasi ITS. Semasa perkuliahan, penulis aktif dalam beberapa kegiatan non akademik, diantaranya menjadi Sekretaris Departemen Hubungan Luar Negeri HMDM ITS, Kepala Finance and Administration Anargya EV ITS Team, dan staf *liaison officer* SEC ITS. Selain itu, penulis mengikuti perlombaan Pi-EV Formula Bharat di bidang *procerument document* dan Formula SAE Japan di bidang *Cost and Manufacturing*. Di sisi lain, penulis berkesempatan untuk aktif dalam kegiatan akademik yakni menjadi grader laboratorium proses manufaktur dan mengikuti program Indonesian International Student Mobility Awards (IISMA) edisi Vokasi tahun 2022 ke Cheng Shiu University, Taiwan selama satu semester dengan jurusan Intelligent Machinery and Precision Machining Technology. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui email dengan alamat [sitiamuawanah110@gmail.com](mailto:sitiamuawanah110@gmail.com).