

**ANALISIS KEKASARAN PERMUKAAN DAN GETARAN PADA
PEMESINAN BUBUT MENGGUNAKAN PAHAT PUTAR MODULAR
(*MODULAR ROTARY TOOLS*) UNTUK MATERIAL
TITANIUM 6AL-4V ELI**

(Skripsi)

Oleh
MUCHDY KURNIAWAN



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2018

ABSTRAK

ANALISIS KEKASARAN PERMUKAAN DAN GETARAN PADA PEMESINAN BUBUT MENGGUNAKAN PAHAT PUTAR MODULAR (*MODULAR ROTARY TOOLS*) UNTUK MATERIAL TITANIUM 6AL-4V ELI

Oleh

MUCHDY KURNIAWAN

Titanium merupakan material yang banyak diaplikasikan dalam industri terutama dalam implan biomedis, industri lepas pantai, tangki dan industri otomotif. Sifat titanium yaitu tahan korosi, ringan dan memiliki sifat biokompatibel yang baik. Namun titanium memiliki konduktivitas termal rendah sehingga pada proses pemesinan, panas yang dihasilkan tidak berkurang dengan cepat sehingga suhu pemotongan akan terlokalisasi pada ujung pahat dan memicu bertumbuhnya *Build Up Edge* (BUE) yang dapat berkontribusi terhadap kerusakan permukaan. Modulus elastisitas titanium yang rendah akan menghasilkan defleksi benda kerja yang besar pada proses pemesinan dan menyebabkan getaran yang dihasilkan meningkat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kekasaran permukaan dan getaran, mengetahui pengaruh parameter pemesinan titanium terhadap kekasaran permukaan dan getaran, mengetahui parameter kekasaran permukaan yang optimal dan mencari model prediksi kekasaran permukaan. Parameter pemesinan bubut menggunakan pahat putar adalah *feeding* (f) 0.1, 0.2 mm/rev, kecepatan potong (Vc) 60, 210 m/min, kecepatan putar pahat (Vt) 100, 700, 1500 rpm dan sudut inklinasi pahat 5, 10, 15°. Jenis pahat yang digunakan adalah pahat karbida berdiameter 16 mm dan 20 mm.

Hasil pengujian pemesinan bubut Ti 6Al-4V ELI dengan pahat putar modular (pahat karbida RCMT) menunjukkan hasil yaitu nilai rata-rata kekasaran permukaan terendah sebesar 0,38 μm dan nilai kekasaran permukaan tertinggi sebesar 1,67 μm . Sedangkan nilai getaran terendah 0.00 mm/sec dan nilai getaran tertinggi 9.5 mm/sec. Berdasarkan analisis Taguchi disimpulkan bahwa kecepatan potong dan sudut inklinasi adalah parameter yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan dan getaran secara signifikan. Semakin tinggi kecepatan potong dan sudut inklinasi maka getaran yang dihasilkan semakin tinggi sehingga menyebabkan kekasaran permukaan juga meningkat. Kondisi optimum pemesinan untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang terbaik adalah pada diameter pahat 16 mm, *feeding* 0.2 mm/rev, kecepatan potong 60 m/min, kecepatan putar pahat 100 rpm dan sudut inklinasi pahat 5°. Model matematik kekasaran permukaan adalah $R_a = -0.363 + (0.0360 \cdot D) + (-1.54 \cdot f) + (0.003412 \cdot V_c) + (0.000063 \cdot V_t) + (0.0292 \cdot \theta)$ dimana dapat digunakan untuk memprediksi kekasaran permukaan

Kata Kunci : Titanium Ti 6Al4V ELI, pemesinan, pahat putar, kekasaran permukaan.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS AND VIBRATION ON TURNING MACHINING USING MODULAR ROTARY TOOLS (*MODULAR ROTARY TOOLS*) FOR TITANIUM MATERIAL 6AL-4V ELI

By

MUCHDY KURNIAWAN

Titanium alloy is a material that is widely applied in industry, especially in the biomedical implant, offshore industry, tank and automotive. The characteristic of titanium are corrosion resistant, lightweight and have good biocompatible. However, titanium has a low thermal conductivity so that in the machining process, the heat generated does not decrease rapidly so the cutting temperature will be localized to the tip of the tools and lead the growth of Build Up Edge (BUE) which can contribute to surface damage. The low titanium modulus of elasticity will result in a large workpiece deflection in the machining process and cause the resulting vibration to increase. The purpose of this study was to analyze the surface roughness and vibration, to know the effect of titanium machining parameters on surface roughness and vibration, to know the parameters of optimal surface roughness and to search for surface roughness prediction model. The parameters of turning machining using rotary tools are feeding (f) 0.1, 0.2 mm/rev, cutting speed (V_c) 60, 210 m/min, rotary tools speed (V_t) 100, 700, 1500 rpm and inclination angle 5, 10, 15°. Type of tools used is carbide tools diameter 16 mm and 20 mm.

The testing results of turning machining Ti 6Al-4V ELI with modular rotary tools (carbide tool RCMT) showed the lowest average surface roughness value of 0.38 μm and the highest surface roughness value of 1.67 μm . The lowest vibration value is 0.00 mm/sec and the highest vibration value is 9.5 mm/sec. Based on Taguchi analysis it's concluded that the cutting speed and inclination angle are the parameters that affect the surface roughness and vibration significantly. The higher the cutting speed and the inclination angle then resulting the higher vibration and causing the surface roughness to increase as well. The optimum conditions of machining to getting the best surface roughness value are 16 mm diameter, feeding 0.2 mm / rev, cutting speed 60 m / min, rotating tool speed of 100 rpm and inclination angle of 5°. Mathematical model of surface roughness is $R_a = -0.363 + (0.0360 * D) + (-1.54 * f) + (0.003412 * V_c) + (0.000063 * V_t) + (0.0292 * \theta)$ where it can be used to predict surface roughness

Keywords: Titanium Ti 6Al4V ELI, machining, rotary tools, surface roughness.

**ANALISIS KEKASARAN PERMUKAAN DAN GETARAN PADA
PEMESINAN BUBUT MENGGUNAKAN PAHAT PUTAR MODULAR
(*MODULAR ROTARY TOOLS*) UNTUK MATERIAL
TITANIUM 6AL-4V ELI**

Oleh

MUCHDY KURNIAWAN

Skripsi

**Sebagai satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA TEKNIK
Pada
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2018

Judul Skripsi : **ANALISIS KEKASARAN PERMUKAAN DAN
GETARAN PADA PEMESINAN BUBUT
MENGUNAKAN PAHAT PUTAR
MODULAR (MODULAR ROTARY TOOLS)
UNTUK MATERIAL TITANIUM 6AL-4V ELI**

Nama Mahasiswa : **Muchdy Kurniawan**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1215021052**

Program Studi : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



MENYETUJUI
1. Komisi Pembimbing

[Handwritten signatures of Dr. Eng. Suryadiwansa Harun and Achmad Yahya TP]

Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, M.T.
NIP. 19700501 200003 1 001

Achmad Yahya TP, S.T.,M.T.
NIP. 19800205 200501 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

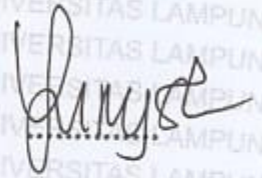
[Handwritten signature of Ahmad Suudi]

Ahmad Suudi, S.T.,M.T.
NIP. 19740816 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.



Anggota : Achmad Yahya TP, S.T., M.T.

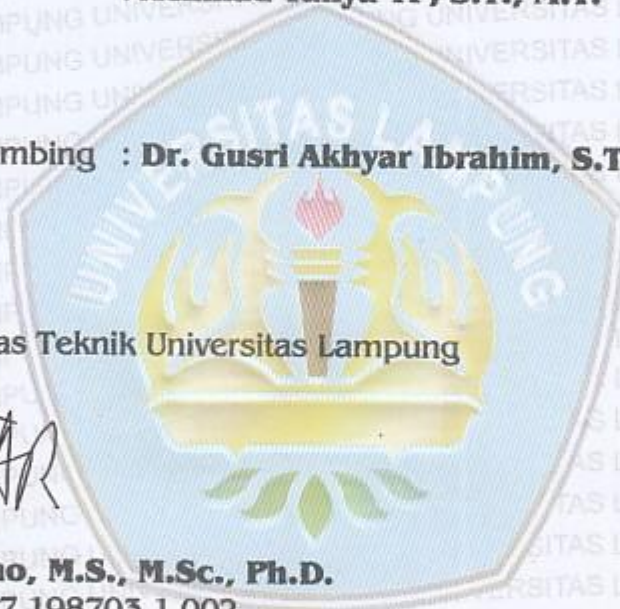


**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

**Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.
NIP. 19620717 198703 1 002**



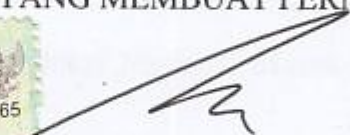
Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 26 Januari 2018

PERNYATAAN PENULIS

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN
REKTOR No. 3187/H26/DT/2010

YANG MEMBUAT PERNYATAAN




MUCHDY KURNIAWAN
NPM. 1215021052

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Pujo Asri 12 November 1992, sebagai anak tunggal dari pasangan Bapak Suharno dan Ibu Mesiyem penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 01 Pujo Asri Kecamatan Trimurjo Lampung Tengah pada tahun 2005, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 06 Metro pada tahun 2008, pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK KP Gajah Mada 1 Metro pada Tahun 2011, dan pada tahun 2012 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam organisasi internal kampus, yaitu sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Anggota Divisi Otomotif pada tahun 2013-2014, menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Kepala Divisi Otomotif pada tahun 2014-2015, menjadi pengurus UKMF BKT (Bidang Karya Tulis) Cremona Fakultas Teknik sebagai Kepala Divisi Kesekretarian pada tahun 2014-2015 dan sebagai Sekretaris Umum pada Tahun 2015-2016. Kemudian penulis pernah menjadi asisten laboratorium CNC, CAD/CAM tahun 2015-2018.

Pada bidang akademik, penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. Isuzu Astra Motor Indonesia (IAMI), yang berlokasi di kawasan industri Surya Cipta, Karawang, Jawa Barat pada tahun 2015. Pada tahun 2017 penulis melakukan penelitian pada bidang konsentrasi Produksi dengan judul tugas akhir “Analisis Kekasaran Permukaan dan Getaran Pada Pemesinan Bubut Menggunakan Pahat Putar Modular (*Modular Rotary Tools*) Untuk Material Titanium 6Al-4V ELI” dibawah bimbingan Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. dan Bapak Achmad Yahya T.P., S.T., M.T.

Bandar Lampung, 2018

Penulis

Muchdy Kurniawan

MOTTO

"Wani Perih"

"Kejujuran Modal Utama Dalam Kehidupan"

(Ibu)

KUPERSEMBAHKAN KARYA INI UNTUK

Kedua Orang Tua
Suharno dan Mesiyem

Saudara-Saudaraku
K.B. Kromo Wiryo dan K.B. Satim

Teman-Temanku
TM12, TMC dkk

Almamater Tercinta
Teknik Mesin - Universitas Lampung

NKRI

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah rabbilalamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir sebagai salah satu syarat dalam meraih gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dengan tugas akhir berjudul "*Analisis Kekasaran Permukaan dan Getaran Pada Pemesinan Bubut Menggunakan Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tools) Untuk Material Titanium 6Al-4V ELI*". Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepenuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibuku tercinta Mesiyem dan bapakku Suharno yang tak pernah henti-hentinya memberikan dukungan moril dan materilnya serta doa dan kasih sayang akan harapan kesuksesan penulis dapat menyelesaikan studi S1.
2. Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M. P, selaku Rektor Universitas Lampung.

3. Prof. Suharno MS, M.Sc., PhD. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
4. Bapak Ahmad Suudi, S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Harnowo Supriadi, S.T.,M.T selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing utama tugas akhir ini, yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi bagi penulis.
7. Bapak Achmad Yahya TP, S.T.,M.T. selaku pembimbing kedua tugas akhir ini, yang telah banyak memberikan waktu dan pemikiran bagi penulis.
8. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. selaku dosen pembahas yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
9. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
10. Staf Akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Rekan–rekan yang turut membantu dalam pelaksanaan tugas akhir. Muhammad Rifai S.T. selaku rekan satu tim Tugas Akhir yang telah banyak memberikan bantuan kepada penulis, Dwi Novriadi S.T., Opi Sumardi, Wahyu Adi Saputra, Kiki Eko Suwanto S.T., I Komang Suariandi, Abdul Aziz, Dedi Tiyadi S.T., Nur Wakhid, Muhammad Iqbal, Frans Simanjuntak,

Saiful Zuhri S.Ip., Hidayattus Solikhin terimakasih atas waktu dan tenaga yang diberikan untuk pelaksanaan tugas akhir.

12. Seluruh squad Traveler Mania Community (TMC) Agus Zainal SS A.md, Ahmad Affandi A.md, Rahmat Tarmiziansyah A.md, Afdol Tasyakur Diansyah A.md, Krisna Yonidha A.md, Akhmad Kurniawan A.md, Bagus Dwi Saputra A.md, Realis Prasetyawan A.md, Rudi Prayogi A.md, Dedy Harsono A.md, Adam Wahyudi A.md, Noki Ariwibowo A.md, Febrianto A.md, Reksi Nopiyanto terimakasih atas kebersamaannya sejak awal sampai sekarang. Semoga persahabatan ini akan tetap terjaga sampai kapanpun.
13. Seluruh rekan-rekan teknik mesin khususnya rekan seperjuangan angkatan 2012 untuk kebersamaan yang telah dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dari angkatan 2012. “Salam Solidarity Forever”.
14. Dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 26 Januari 2018
Penulis,

Muchdy Kurniawan
NPM. 1215021052

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN PENULIS	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
HALAMAN MOTTO	ix
HALAMAN PERSEMBAHAN	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxiv
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan	4
1.3. Batasan Masalah	4

1.4. Sistematika Penulisan	5
----------------------------------	---

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1.Pemesinan	7
2.2.Pemesinan Bubut.....	9
2.2.1. Parameter pada Proses Bubut	10
2.3.Pemesinan Sistem Pahat Putar (<i>Rotary Tool System</i>)	14
2.3.1 Suhu pemotongan dalam proses pemesinan dengan pahat berputar	15
2.4.Titanium	18
2.4.1. Titanium Paduan Ti 6Al-4V ELI	19
2.4.2. Pemesinan Titanium	20
2.5. Kekasaran Permukaan	24
2.5.1. Permukaan dan parameter-parameter permukaan	25
2.5.2. Toleransi Harga Ra	27
2.5.3. Alat Ukur Kekasaran Permukaan	28
2.6.Getaran Mesin Perkakas	29
2.7.Metode Taguchi	32
2.7.1. Rasio <i>Signal</i> terhadap <i>Noise</i> (<i>S/N Ratio</i>)	32
2.7.2. Faktor Terkendali dan Faktor <i>Noise</i>	34

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat penelitian	36
3.2. Alur Penelitian	36
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	38
3.4. Prosedur Penelitian	44
3.4.1. Setup Pemesinan Titanium 6Al-4V ELI	45
3.4.2. Perencanaan Data Percobaan	46
3.4.3. Proses Pengambilan Data	49
3.4.4. Pengolahan Data	53

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Kekasaran Permukaan	57
4.1.1. Analisis Taguchi	60
4.1.2. Analisis Varians	62
4.1.3. Kekasaran Permukaan Optimum	73
4.1.4. Model Matematika Kekasaran Permukaan	75
4.2. Getaran	76
4.2.1. Analisis Taguchi	77
4.2.2. Analisis Varians	79
4.3. Hubungan Kekasaran Permukaan dengan Getaran	85
4.4. Permukaan Hasil Pemotongan	86

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	92
5.2. Saran	93

DAFTAR PUSTAKA**LAMPIRAN**

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Ilustrasi proses pemesinan bubut dengan pahat putar	3
Gambar 2.1. Beberapa proses pemesinan : Bubut (<i>Lathe</i>), Frais (<i>Milling</i>), Sekrap (<i>Planer, Shaper</i>), Gurdi (<i>Drilling</i>), Gerinda (<i>Grinding</i>), Bor (<i>Boring</i>), Pelubang (<i>Punch Press</i>), Gerinda permukaan (<i>Surface Grinding</i>)	8
Gambar 2.2. Mesin Bubut dan bagian-bagiannya	9
Gambar 2.3. Kondisi Pemotongan	10
Gambar 2.4. Ilustrasi proses pemesinan bubut dengan pahat berputar	15
Gambar 2.5. Aliran panas selama proses pemesinan bubut dengan pahat berputar	16
Gambar 2.6. Struktur kristal titanium (a. Hexagonal Close Packed) dan (b. Body Centered Cubic)	19
Gambar 2.7. Profil Permukaan	25
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> Penelitian	38
Gambar 3.2. Titanium 6Al-4V ELI	38
Gambar 3.3. Mesin bubut konvensional	40
Gambar 3.4. Sistem pahat putar modular	41
Gambar 3.5. <i>Surface tester</i>	42
Gambar 3.6. Alat ukur getaran (Lutron VB-8213)	43
Gambar 3.7. USB Mikroskop	44

Gambar 3.8. Set-up pemesinan Titanium 6Al-4V ELI dengan sistem pahat putar	46
Gambar 3.9. Penentuan <i>Orthogonal Array</i>	47
Gambar 3.10. Pembacaan <i>surface tester</i> pada permukaan Ti6Al4V ELI ..	50
Gambar 3.11. Melihat Profil Permukaan	51
Gambar 3.12. Mengukur <i>feedmark</i> pada software <i>Dino Capture 20</i>	51
Gambar 3.13. Pengukuran getaran	52
Gambar 3.14. Analisis Taguchi pada Minitab 17	53
Gambar 3.15. Jendela Session	54
Gambar 3.16. Grafik respon S/N Rasio untuk Ra	54
Gambar 3.17. Analisis Varian pada Minitab 17	55
Gambar 3.18. Tabel hasil Analisis Varian	56
Gambar 4.1. Grafik S/N Rasio respon untuk nilai kekasaran permukaan ..	61
Gambar 4.2. <i>Normal Plot Residuals for SN ratios</i>	63
Gambar 4.3. Diagram persentase pengaruh kontribusi variabel terhadap kekasaran permukaan	67
Gambar 4.4. Grafik Pengaruh Vc dan terhadap Ra	68
Gambar 4.5. Proses pemotongan tampak samping	70
Gambar 4.6. Proses pemotongan tampak bawah	71
Gambar 4.7. Ilustrasi <i>feeding</i> pada pemesinan Ti6Al4V ELI menggunakan pahat putar modular	73
Gambar 4.8. Plot Titik Optimum	74
Gambar 4.9. Grafik S/N Rasio respon untuk nilai getaran	78

Gambar 4.10. <i>Normal Plot Residuals for SN ratios</i>	79
Gambar 4.11. Diagram persentase pengaruh kontribusi variabel terhadap getaran	83
Gambar 4.12. Grafik Pengaruh V_c dan f terhadap Getaran	84
Gambar 4.13. Grafik pengaruh kecepatan potong terhadap kekasaran permukaan dan getaran	86
Gambar 4.14. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan kecepatan potong pada diameter 20 mm, feeding 0.2 mm/rev, kecepatan putar pahat 100 rpm dan sudut inklinasi 15°	87
Gambar 4.15. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan kecepatan potong pada diameter 20 mm, feeding 0.2 mm/rev, kecepatan putar pahat 700 rpm dan sudut inklinasi 5°	87
Gambar 4.16. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan kecepatan potong pada diameter 16 mm, feeding 0.1 mm/rev, kecepatan putar pahat 1500 rpm dan sudut inklinasi 15°	87
Gambar 4.17. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan kecepatan putar pahat dan sudut inklinasi pada diameter 16 mm, feeding 0.2 mm/rev, kecepatan potong 210 m/min	88
Gambar 4.18. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan kecepatan putar pahat dan sudut inklinasi pada diameter 20 mm, feeding 0,1 mm/rev, kecepatan potong 210 m/min	88
Gambar 4.19. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan diameter pada kecepatan potong 210 m/min, kecepatan putar pahat 100 rpm dan sudut inklinasi 10°	89
Gambar 4.20. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan diameter pada kecepatan potong 210 m/min, kecepatan putar pahat 700 rpm dan sudut inklinasi 15°	90

Gambar 4.21. Perbandingan profil permukaan dengan perubahan diameter
pada kecepatan potong 210 m/min, kecepatan putar pahat 1500
rpm dan sudut inklinasi 5° 90

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Daya pemotongan untuk beberapa jenis material	23
Tabel 2.2. Toleransi harga kekasaran rata-rata Ra	27
Tabel 2.3. Tingkat kekasaran rata-rata permukaan menurut proses pengerjaannya	28
Tabel 2.4. Klasifikasi getaran ijin	31
Tabel 3.1. Sifat Fisik Paduan Titanium 6Al-4V ELI	39
Tabel 3.2. Spesifikasi mesin bubut konvensional	40
Tabel 3.3. Spesifikasi laptop	41
Tabel 3.4. Spesifikasi <i>Surface Tester</i>	42
Tabel 3.5. Spesifikasi USB Mikroskop	43
Tabel 3.6. Spesifikasi Pahat	44
Tabel 3.7. Parameter Pemotongan	46
Tabel 3.8. <i>Orthonal Array</i> metode Taguchi L_{36}	48
Tabel 4.1. Parameter Pemotongan	57
Tabel 4.2. Hasil pengujian untuk kekasaran permukaan dan rasio S/N	59
Tabel 4.3. Respon S/N Rasio (<i>smaller is better</i>) nilai Ra.....	60
Tabel 4.4. Analisis varians SN rasio Ra metode taguchi	64

Tabel 4.5. Analisis varians ANOVA	65
Tabel 4.6. Struktur hipotesa nilai F-value	66
Tabel 4.7. Tabel Keputusan Penerimaan Hipotesis	66
Tabel 4.8. Model determinasi regresi	67
Tabel 4.9. Respons Optimasi Kekasaran Permukaan	74
Tabel 4.10. <i>Regression Equation</i> Kekasaran Permukaan	75
Tabel 4.11. Hasil pengujian untuk getaran dan rasio S/N	76
Tabel 4.12. Respon S/N Rasio (<i>smaller is better</i>) nilai getaran.....	77
Tabel 4.13. Analisis varian SN rasio getaran metode taguchi	80
Tabel 4.14. Analisis varians ANOVA	81
Tabel 4.15. Tabel Keputusan Penerimaan hipotesis	82
Tabel 4.16. Model determinasi regresi.....	83

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

LAMPIRAN A. Tabel Hasil Pengujian

LAMPIRAN B. Foto Proses Pengujian

LAMPIRAN C. Tabel Distribusi F

DAFTAR SIMBOL

α	Sudut tekan	°
β	Sudut inklinasi pahat	°
ε	Error	%
	Phi	3,14
a	Kedalaman pemotongan	mm
A	Penampang geram sebelum terpotong	mm ²
b	Lebar pemotongan	mm
D	Diameter	mm
d_0	Diameter awal	mm
d_m	Diameter akhir	mm
f	<i>Feeding</i>	mm/rev
h	Tebal geram sebelum dipotong	mm
κr	Sudut potong utama	N/mm
lt	Panjang pemesinan	mm
n	Putaran pahat	Rpm
Ra	Kekasaran aritmatik	μm
Rg	Kekasaran kuadratik	μm
Rp	Kekasaran peralatan	μm

R_t	Kekasaran total	μm
R_z	Kekasaran total rata-rata	μm
r_ε	Radius ujung pahat	mm
S	Panjang sisi pahat	mm
t_c	Waktu pemotongan	min
V	Kecepatan getar	mm/sec
V_C	Kecepatan potong	m/min
V_t	Kecepatan putar pahat	rpm
V_f	Kecepatan pemakanan	mm/min
χ_r	Sudut potong utama	$^\circ$
γ_o	Sudut geram	$^\circ$
Z	Besar laju pembuangan geram	cm^3/min

I. PENDAHULUAN

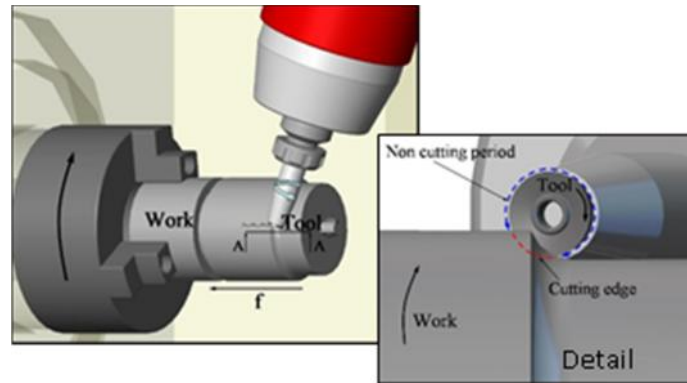
1.1 Latar Belakang

Titanium dan titanium paduan merupakan material yang banyak digunakan dalam industri terutama dalam implan biomedis, industri lepas pantai, tangki nuklir dan industri otomotif. Titanium memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah kombinasi rasio antara kekuatan dan berat yang baik pada temperatur tinggi, memiliki sifat tahan patah dan sifat tahan korosi serta memiliki ketangguhan yang relatif lebih baik dibandingkan dengan material lain seperti aluminium dan baja.

Titanium Ti6Al4V ELI merupakan salah satu jenis titanium paduan yang mengandung aluminium 6%, vanadium 4%. Titanium ini memiliki perbedaan dari titanium paduan lainnya yaitu pengurangan kadar oksigen sampai 0,13%. ELI adalah singkatan dari "Extra Low Interstitials" dan interstisial yang rendah ini memberikan peningkatan keuletan dan ketangguhan patah yang lebih baik. Titanium ini juga memiliki sifat biokompatibel atau kemampuan suatu material untuk dapat ditanam dalam tubuh manusia tanpa menimbulkan reaksi negatif. Oleh karena itu material ini banyak diaplikasikan pada produk implan kesehatan

Namun disamping memiliki beberapa kelebihan, dalam proses pemesinan titanium bukan hal yang mudah memotong paduan titanium karena sifat keternesinan paduan titanium yang rendah bila dibandingkan dengan logam lain. Titanium paduan juga memiliki konduktivitas termal yang rendah, reaktivitas kimia yang tinggi dan elastisitas rendah. Pada pemesinan titanium suhu pemotongan yang cukup tinggi dan terlokalisasi pada ujung pahat berperan terhadap pertumbuhan *Build Up Edge* (BUE) atau lelehan material benda kerja yang menempel dan mengeras pada ujung mata pahat potong. (Mathew & Donachie, 2000). Konduktivitas termal material yang rendah akan meningkatkan suhu pada ujung pahat potong dan berkontribusi terhadap kerusakan permukaan. Demikian juga dengan modulus elastisitas yang rendah menimbulkan getaran yang besar pada saat pemotong yang menyebabkan kerusakan mampu mesin serta kerusakan permukaan benda kerja.

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mencari metode yang efektif untuk menurunkan suhu pemotongan pada material yang sulit dipotong (*difficult to machine*) termasuk material titanium paduan. Salah satu metode penurunan suhu pemotongan yang baik serta untuk meningkatkan produktivitas pemesinan yaitu dengan menggunakan pahat potong berputar pada proses pemesinan bubut (Harun, 2009).



Gambar 1.1. Ilustrasi proses pemesinan bubut dengan pahat putar
(Sumber: Harun,2009).

Pada metode pemesinan ini, pahat putar berotasi dan suhu pahat akan menurun karena mata pisau (*cutting edge*) mengalami pendinginan selama periode tanpa pemotongan pada setiap putaran pahat potong. Dengan demikian suhu pemotongan pada pahat potong akan mengalami penurunan. Sebagaimana dinyatakan oleh penelitian sebelumnya bahwa suhu pemotongan sangat berpengaruh pada nilai kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan merupakan salah satu karakteristik kualitas yang kritis (*Critical to Quality Characteristics / CTQ*) yang penting untuk menunjukkan kualitas produk yang dihasilkan dari proses pemesinan. Kekasaran permukaan juga merupakan salah satu parameter yang penting untuk mengevaluasi hasil proses keakurasian pemesinan suatu komponen apabila komponen tersebut dipasangkan dengan komponen lainnya (Doni, 2015).

Berdasarkan latar belakang diatas, maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan mengambil judul **“ANALISIS KEKASARAN PERMUKAAN DAN GETARAN PADA PEMESINAN BUBUT MENGGUNAKAN PAHAT PUTAR MODULAR (MODULAR ROTARY TOOLS) UNTUK MATERIAL TITANIUM 6AL-4V ELI”**

1.2 Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis kekasaran permukaan titanium dan getaran pemesinan pada proses pemotongan titanium menggunakan pahat putar.
2. Mengetahui pengaruh parameter pemesinan titanium terhadap kekasaran permukaan dan getaran.
3. Mengetahui parameter kekasaran permukaan yang optimal.
4. Mencari model prediksi kekasaran permukaan.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah, maka penulis membatasi lingkup permasalahan pada:

1. Material yang diuji pada penelitian ini adalah titanium tipe Ti 6Al-4V ELI.
2. Sistem pahat putar yang dipakai pada pemesinan bubut adalah pahat putar modular dengan modul round cutter.
3. Mata Pahat yang digunakan yaitu insert jenis RCMT karbida dengan dimensi 16 dan 20 mm.
4. Mesin bubut yang digunakan adalah jenis mesin bubut konvensional.
5. Pengukuran kekasaran permukaan Titanium menggunakan surface tester Mitutoyo 81-210 dan pengukuran profil permukaan menggunakan mikroskop USB Merk Dino-Lite Mikroskop tipe AM31 I3T .
6. Pemesinan yang dilakukan adalah pemesinan kering (tanpa fluida pendingin)

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini yaitu terdiri dari :

Bab I. Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian titanium paduan khususnya Titanium Ti 6Al-4V ELI dengan proses pemesinannya menggunakan pahat *Active Driven Rotary Tool* (ADRT). Bab ini juga menjelaskan tentang tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab II. Tinjauan Pustaka

Bab ini berisikan teori yang berkaitan dengan penelitian ini seperti pengertian dan penjelasan titanium khususnya Ti 6Al-4V ELI, pemesinan titanium, pemesinan bubut, pemesinan dengan menggunakan pahat putar serta teori tentang kekasaran permukaan.

Bab III. Metode Penelitian

Bab ini membahas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian yaitu waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, dan prosedur pengujian beserta parameter yang digunakan.

Bab IV. Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisikan hasil dan pembahasan dari data-data yang diperoleh saat penelitian serta analisa data dari semua parameter yang diambil.

Bab V. Simpulan dan Saran

Bab ini berisi hal-hal yang dapat disimpulkan dari semua analisa dan percobaan yang dilakukan serta saran yang berisi informasi agar dilakukan pada penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

Memuat daftar referensi-referensi yang digunakan penulis dalam penulisan laporan penelitian.

Lampiran

Pada lampiran akan memuat data perlengkapan penelitian .

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemesinan

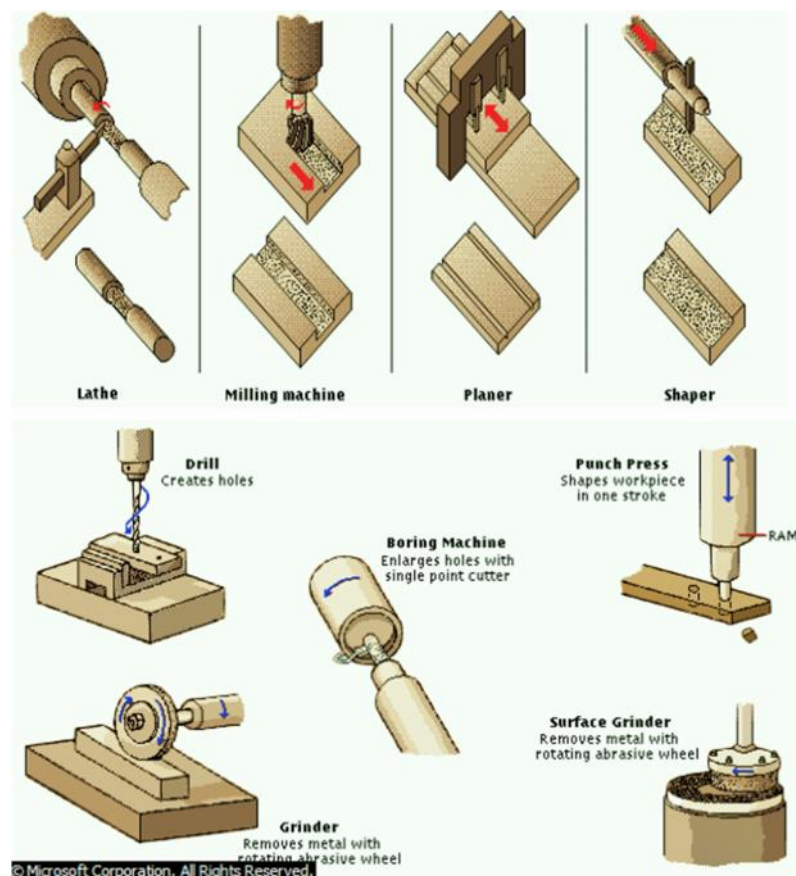
Pemesinan (*Machining*) merupakan suatu proses pembentukan suatu produk dengan pemotongan dan menggunakan mesin perkakas. Umumnya, benda kerja yang digunakan berasal dari proses sebelumnya, seperti proses penuangan (*Casting*) dan proses pembentukan (*Metal Forging*).

Proses pemesinan dibagi menjadi dua yaitu :

1. *Traditional Machining* : *turning, milling, grinding*, dll.
2. *Non-traditional machining* : *chemical machining, ECM, EDM, EBM, LBM, machining dari material non-metallic* (Bondan, 2015)

Proses pemesinan dilakukan dengan cara memotong bagian benda kerja yang tidak digunakan dengan menggunakan pahat (*cutting tool*), sehingga terbentuk permukaan benda kerja yang dikehendaki. Pahat yang digunakan dipasang pada satu jenis mesin perkakas dengan gerakan relatif tertentu (berputar atau bergeser) disesuaikan dengan bentuk benda kerja yang akan dibuat. Pahat yang digunakan dapat diklasifikasikan sebagai pahat bermata potong tunggal (*single point cutting tool*) dan pahat bermata potong jamak (*multiple point cutting tool*). Pahat dapat melakukan gerak potong (*cutting*) dan gerak makan (*feeding*).

Proses pemesinan dapat diklasifikasikan dalam dua klasifikasi besar yaitu proses pemesinan untuk membentuk benda kerja silindris atau konis dengan benda kerja/pahat berputar, dan proses pemesinan untuk membentuk benda kerja permukaan datar tanpa memutar benda kerja. Klasifikasi yang pertama meliputi proses bubut dan variasi proses yang dilakukan dengan menggunakan mesin bubut, mesin gurdi (*drilling*), mesin frais (*milling*), mesin gerinda (*grinding*). Klasifikasi kedua meliputi proses sekrap (*shaping*, *planing*), proses slot (*slotting*), proses menggergaji (*sawing*), dan proses pemotongan roda gigi (*gear cutting*) (Radiyanta,2010).

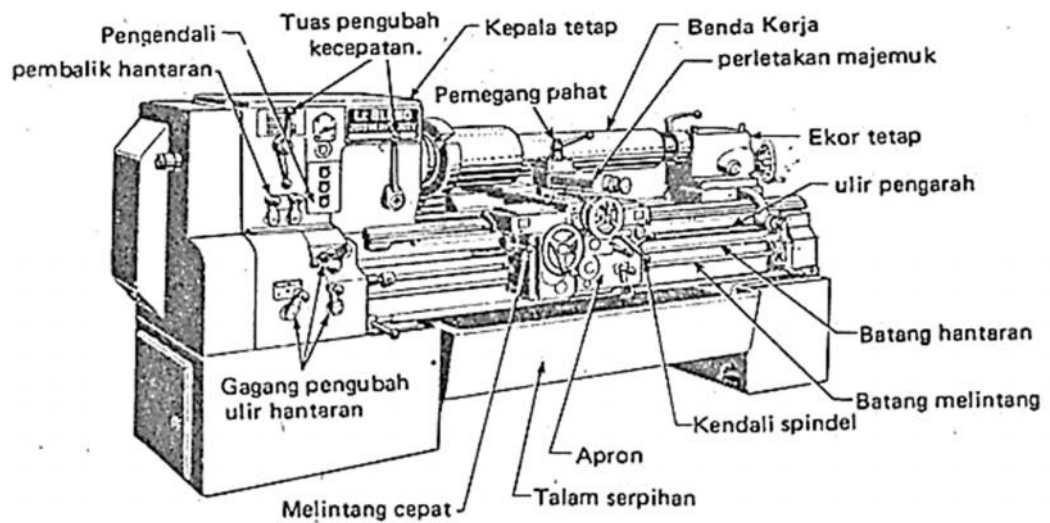


Gambar 2.1 Beberapa proses pemesinan : Bubut (*Lathe*), Frais (*Milling*), Sekrap (*Planer*, *Shaper*), Gurdi (*Drilling*), Gerinda (*Grinding*), Bor (*Boring*), Pelubang (*Punch Press*), Gerinda permukaan (*Surface Grinding*) (Sumber: Rahdiyanta,2010).

2.2 Pemesinan Bubut

Pemesinan Bubut (*Turning*) adalah proses pemesinan yang menggunakan perkakas mata tunggal (*single point cutting tool*) untuk memotong bagian dari benda kerja yang berputar. Prinsip kerjanya adalah mengurangi diameter dari benda kerja. Perkakas dihantarkan secara linear, sejajar dengan sumbu rotasi benda kerja sehingga akan menyayat benda kerja yang berputar.

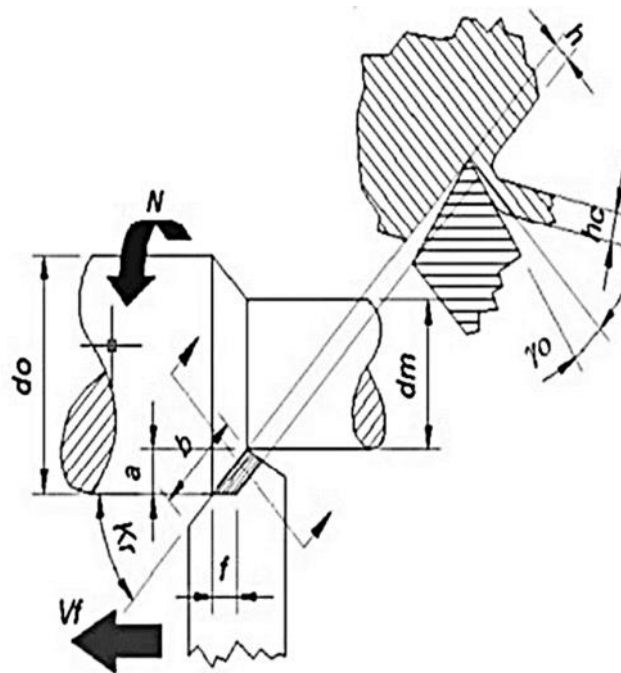
Dalam kecepatan putar tertentu, alat potong akan mudah memotong benda kerja sehingga benda kerja mudah dibentuk sesuai dengan geometri yang diinginkan. Gerakan putar dari benda kerja disebut gerak potong relatif dan gerakan translasi dari pahat disebut gerak umpan (*feeding*) (Wijayanto dan Estriyanto, 2005).



Gambar 2.2 Mesin Bubut dan bagian-bagiannya.
(Sumber: Saputera,2012)

2.2.1 Parameter pada Proses Bubut

Proses bubut merupakan suatu proses pembentukan benda kerja dengan mengerjakan permukaan luar yang silindris, permukaan konis, permukaan dalam silindris ataupun konis. Harga putaran poros utama (n) dan gerak makan (f) dapat dipilih dan umumnya dibuat bertingkat, dengan aturan yang telah distandarkan. Untuk mesin bubut dengan putaran motor variabel, ataupun dengan sistem transmisi variabel, kecepatan putaran poros utama tidak lagi bertingkat melainkan berkesinambungan dengan lainnya. Untuk itu perlu dipahami beberapa parameter pada proses bubut (Rochim, 2007), yaitu:



Gambar 2.3. Kondisi Pemotongan
(Sumber : Paridawati, 2015)

Keterangan :

Benda kerja : d_0 = diameter awal (mm)

d_m = diameter akhir (mm)

l_t = panjang pemesinan (mm)

Pahat ; r = sudut potong utama ($^\circ$)

= sudut geram ($^\circ$)

Mesin bubut : a = kedalaman potong (mm)

f = gerak makan (mm/r)

n = putaran poros utama (rpm)

Elemen dasar dapat dihitung dengan rumus-rumus berikut :

1. Kecepatan potong (*Cutting speed*)

Kecepatan potong adalah sebagai kerja rata-rata pada sebuah titik lingkaran pada pahat potong dalam satu menit. Kecepatan putar (*speed*) selalu dihubungkan dengan sumbu utama (*spindle*) dan benda kerja. Kecepatan putar secara sederhana diasumsikan sebagai keliling benda kerja dikali kecepatan putar dan dinyatakan dalam unit satuan m/menit (Widarto, 2008).

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} ; \text{ m/min} \dots\dots\dots$$

(2.1)

$$d = \frac{(d_0 - d_m)}{2} ; \text{ mm} \dots\dots\dots$$

(2.2)

Dimana: d = diameter rata-rata (mm)

V = kecepatan potong (m/menit)

2. Kedalaman potong

Kedalaman potong adalah adalah tebal bagian benda kerja yang dibuang dari benda kerja, atau jarak antara permukaan yang dipotong terhadap permukaan yang belum terpotong. Secara umum kedalaman potong ditulis dalam rumus sebagai berikut:

$$a = \frac{(d_0 - d_m)}{2} ; \text{ mm} \dots\dots\dots (2.3)$$

Kedalaman potong ditentukan oleh nilai minimum dan maksimum, yaitu :

$$a_{\min} = r ; \text{ mm} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$a_{\max} = 0.7 S \sin r ; \text{ mm} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana: a = kedalaman potong (mm)

r = radius ujung pahat (mm)

S = panjang sisi pahat (mm)

r = Sudut potong utama

3. Kecepatan makan

$$V_f = \frac{lt}{tc} ; \text{ atau } V_f = f.n \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana: V_f = kecepatan pemakanan (mm/min)

lt = panjang pemotongan (mm)

tc = waktu pemotongan (menit)

f = gerak makan (mm/rev)

$n = \text{putaran poros utama (rpm)}$

4. Waktu pemotongan

Waktu pemotongan adalah waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu produk.

$$t_c = \frac{lt}{V_f} ; \text{ min} \dots\dots\dots$$

(2.7)

Dimana: $t_c = \text{waktu pemotongan (min)}$

$lt = \text{panjang pemotongan (mm)}$

$V_f = \text{kecepatan makan (mm/min)}$

5. Kecepatan penghasilan geram

Selama proses pembubutan berlangsung, bahan dibuang akibat perputaran benda kerja sebagai suatu geram tunggal yang tergantung pada parameter kerja mesin. Geram yang dihasilkan berupa lembaran tali berkelanjutan atau berupa potongan-potongan (Widarto, 2008).

$$Z = A.V \dots\dots\dots (2.8)$$

$$= f.a.V$$

Dimana: $Z = \text{Besarnya laju pembuangan geram (cm³/min)}$

$A = \text{Penampang geram sebelum terpotong (mm²)}$

$a = \text{kedalaman potong (mm)}$

$f = \text{gerak makan (mm/r)}$

Sudut potong utama adalah sudut antara mata potong utama pahat dengan laju pemakanan, besarnya sudut tersebut ditentukan oleh

geometri pahat dan cara pemasangan padamesin bubut. Untuk nilai laju pemakanan dan kedalaman potong yang tetap maka sudut ini akan mempengaruhi lebar pemotongan dan tebal geram sebelum terpotong adalah sebagai berikut:

$$b = \frac{a}{\sin r} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$h = \frac{f}{\sin f} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana: b = lebar pemotongan (mm)

a = kedalaman potong (mm)

h = tebal geram sebelum terpotong

f = gerak makan (mm/r)

Hubungan antara kekasaran permukaan, radius ujung pahat, dan laju pemakanan secara empiris adalah :

$$Ra = \frac{0.0321 f^2}{r \epsilon} ; (\mu\text{m}) \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana: f = gerak makan (mm/r)

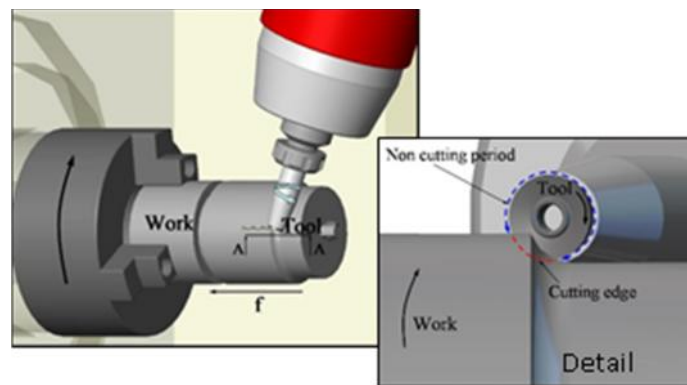
Ra = Kekasaran permukaan (um)

r = radius ujung pahat 0.2 (mm)

2.3 Pemesinan Sistem Pahat Putar (*Rotary Tool System*)

Metode untuk menurunkan suhu pemotongan serta untuk meningkatkan produktivitas pemesinan adalah dengan menggunakan pahat potong berputar, dimana dengan pahat potong yang berputar maka mata pisau (*cutting edge*) akan didinginkan selama periode tanpa pemotongan (*non cutting period*)

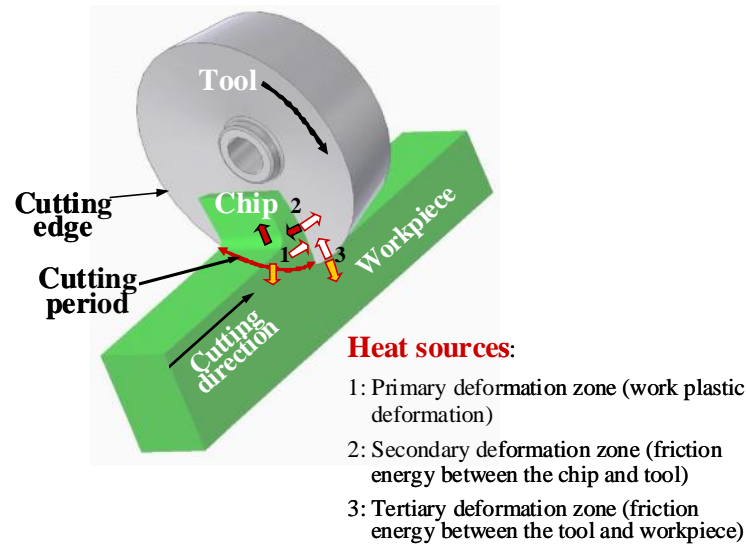
dalam satu putaran pahat potong. Hal ini diharapkan bahwa suhu pahat potong akan menurun dibandingkan dengan proses pemesian bubut konvensional (pahat potong diam). Selain itu proses pemesian dengan pahat berputar ini diharapkan dapat digunakan untuk pemotongan kecepatan tinggi (*high speed cutting*) untuk material Magnesium (*Magnesium Alloy*) dan material yang sulit dipotong (*difficult to-cut materials*) seperti paduan Nikel (*Nickel Alloy*), Titanium (*Titanium Alloy*).



Gambar 2.4. Ilustrasi proses pemesian bubut dengan pahat berputar
(Sumber : Harun, 2009)

2.3.1 Suhu pemotongan dalam proses pemesian dengan pahat berputar

Panas yang dihasilkan akibat deformasi geram selama proses pemesian bubut dengan pahat berputar berpotensi dihasilkan dari empat sumber panas (*heat source*). Sumber panas ini terdiri atas tiga zone deformasi yang dekat dengan mata pisau pahat (*tool cutting edge*) seperti terlihat pada Gambar 2.5, dimana biasanya disebut masing-masing dengan zone deformasi utama (*primary*), kedua (*secondary*), dan ketiga (*tertiary*). Selain itu, sumber panas yang lain adalah akibat akumulasi panas pada mata pisau pahat.



Gambar 2.5. Aliran panas selama proses pemesinan bubut dengan pahat berputar (Sumber: Harun, 2008)

Pada daerah deformasi plastik (*primary deformation zone*), mata pisau (*cutting edge*) pahat berbentuk lingkaran berputar dan secara kontinnyu memotong material benda kerja sehingga menyebabkan terjadinya deformasi plastik material benda kerja menjadi geram (*chip*). Usaha untuk mendeformasi material benda kerja menjadi geram membutuhkan deformasi yang besar dengan laju regangan yang tinggi sehingga menyebabkan timbulnya panas pada daerah deformasi geser. Harun pada penelitiannya melakukan eksperimen pengaruh kecepatan putar pahat terhadap gaya potong pada pemesinan bubut material baja S45C dengan pahat berputar. Dari eksperimen tersebut diperoleh hasil yaitu peningkatan kecepatan putar pahat menyebabkan suatu penurunan kecepatan potong sehingga diharapkan dapat memicu reduksi daya geser. Hal ini dapat menyebabkan penurunan energi geser spesifik dan selanjutnya penurunan panas yang dihasilkan selama deformasi geser.

Material yang digeser kemudian terdeformasi menjadi geram selanjutnya mengalir di atas permukaan geram pahat pada daerah deformasi kedua (*secondary deformation zone*). Panas yang timbul dari daerah deformasi kedua adalah dihasilkan akibat deformasi plastik material benda kerja dan energi gesek antara pahat potong dan geram. Oleh karena itu panas yang tinggi biasanya terjadi pada daerah deformasi kedua ini. Panas yang timbul pada daerah deformasi ini dialirkan menuju geram dan pahat potong.

Selanjutnya pada daerah deformasi ketiga (*tertiary deformation zone*), panas yang dihasilkan pada daerah antarmuka (*interfece*) antara pahat dan benda kerja, dimana tepi pahat (*flank tool*) berputar sambil bergerak sepanjang permukaan benda kerja dan menghasilkan panas melalui energi gesek antara pahat dan benda kerja. Suhu yang meningkat akibat panas yang timbul oleh pembentukan permukaan baru benda kerja pada daerah deformasi ketiga adalah dialirkan kedalam benda kerja.

Pada pemesinan bubut dengan pahat berputar, periode tanpa pemotongan (*non cutting period*) menjadi pendek dengan peningkatan kecepatan putar pahat, hal ini mengartikan bahwa periode pendinginan pahat menjadi pendek. Oleh karena itu pada batas kecepatan tertentu, suhu mata pisau pahat pada ujung periode pendinginan belum cukup dingin ketika masuk kembali kedalam daerah pemotongan sehingga suhu mata pisau pahat terus meningkat akibat akumulasi panas

2.4 Titanium

Titanium pertama kali ditemukan pada tahun 1970. Dalam tabel periodik, titanium memiliki simbol kimia Ti dengan nomor atom 22 dan merupakan logam transisi dengan densitas yang rendah. Selain itu titanium memiliki sifat elektropositif dan mudah bersenyawa dengan karbon sehingga mengakibatkan logam ini sulit untuk dimumikan. Pada saat ini titanium sudah banyak digunakan dalam industri karena keunikan dari sifat yang dimiliki oleh logam ini. Keunikan ini lebih unggul dibandingkan dengan logam lainnya seperti aluminium, baja, dan superalloy. Beberapa fakta yang dimiliki oleh titanium dan paduannya antara lain (Donachie, 2000):

1. Densitas yang dimiliki titanium hanya berkisar 60% dari baja, nikel, atau superalloy.
2. Titanium paduan dapat digunakan pada suhu sekitar 538°C sampai 595°C (1000°F hingga 11000F), tergantung pada komposisinya. Beberapa paduan titanium (titanium aluminide) mungkin memiliki kemampuan bertahan di atas suhu tersebut.
3. Lebih tahan korosi jika dibandingkan dengan stainless steel.
4. Titanium memiliki sifat biokompatibel yang baik, sehingga dapat digunakan didalam tubuh manusia.

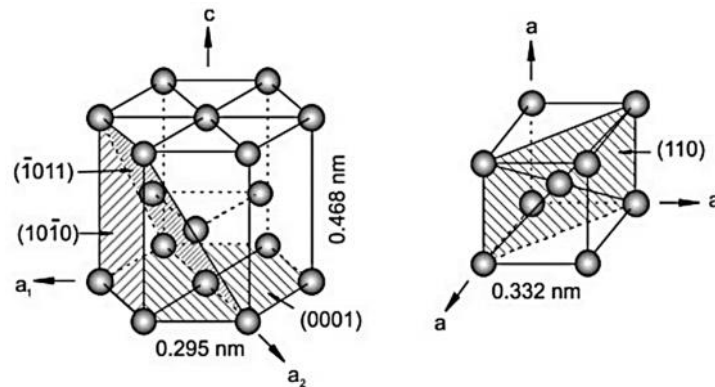
Titanium memiliki sifat nonmagnetik dan transfer panas yang baik. Dengan koefisien dari ekspansi termal yang lebih rendah daripada baja dan kurang dari setengah aluminium. Titanium dan paduannya memiliki titik leleh lebih

tinggi daripada baja, tetapi suhu maksimum yang digunakan untuk aplikasi struktural umumnya berkisar kurang dari 427°C (800°F), untuk temperatur 583°C hingga 595°C (1000°F -1100°F) bergantung pada komposisi.

Titanium memiliki kemampuan pasif dan dengan demikian menunjukkan tingkat kekebalan terhadap mineral, asam, dan klorida. Titanium murni nontoxic dan beberapa paduan titanium umumnya memiliki kompatibilitas dengan jaringan dan tulang manusia karena tahan terhadap korosi, ringan, dan memiliki kekuatan yang baik dibanding aluminium dan baja. Selain itu, titanium banyak digunakan dalam aplikasi kimia dan petrokimia, lingkungan laut, aplikasi biomaterial, dan struktur pesawat.

2.4.1 Titanium Paduan Ti 6Al-4V ELI

Titanium adalah elemen alotropi atau logam yang memiliki lebih dari satu bentuk kristal. Pada suhu yang rendah, titanium memiliki struktur kristal heksagonal (*Hexagonal closed Packed/HCP*) yang kemudian disebut fase alpha. Kemudian pada saat dipanaskan dengan suhu lebih dari 882°C (1620°F) struktur titanium akan berubah menjadi *body centered cubic* (BCC), struktur kemudian disebut fase beta. (Leyens & Peters, 2003).



Gambar 2.6 Struktur kristal titanium (a. Hexagonal Close Packed) dan (b. Body Centered Cubic) (Sumber : Leyens & Peters, 2003).

Titanium 6Al-4V ELI merupakan titanium yang berada pada fase alpha-beta yang berisi 6 wt% aluminium dan 4 wt% vanadium dan 0,13% (maksimum) Oksigen. Hal ini mendorong peningkatan keuletan dan ketangguhan patah, dengan beberapa pengurangan kekuatan. Titanium jenis ini biasanya digunakan pada pressure vassel, baling-baling turbin gas pesawat, badan pesawat yang patah dan implan biomedis. Titanium 6Al-4V juga memiliki kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik serta memiliki ketahanan terhadap korosi.

Kelebihan dari Titanium 6Al-4V ELI adalah memiliki massa yang lebih ringan jika dibandingkan dengan baja dengan tingkat kekerasan yang sama, memiliki kemampuan pasif dalam sistem biologi tubuh dan ketahanan terhadap mineral, asam, protein dan klorida. Titanium murni nontoxic dan beberapa paduan titanium lainnya umumnya memiliki kompatibilitas dengan jaringan dan tulang manusia, sifat biokompatibel titanium memungkinkan untuk dapat di tanamkan dalam tubuh manusia tanpa menimbulkan reaksi negatif terhadap sistem biologi tubuh makhluk

hidup. Meskipun demikian tetap terjadi korosi pada titanium yang ditanam pada tubuh manusia dengan tingkat yang sangat rendah hal ini dapat dipelajari dari material implan yang telah di ambil dari tubuh manusia.

2.4.2 Pemesinan Titanium

Titanium dianggap sebagai material yang sulit untuk dimesin (*difficut to cut material*). Untuk melakukan pemesinan titanium paduan dibutuhkan gaya pemotongan yang sedikit lebih besar daripada gaya pemotongan yang digunakan untuk pemesinan baja. Titanium paduan memiliki karakteristik metalurgi yang membuat mereka sulit untuk dilakukan pemesinan, sehingga untuk melakukan pemesinan dibutuhkan biaya tambahan yang cukup besar dibanding dengan melakukan pemesinan baja dengan tingkat kekerasan yang sama. Keberhasilan dalam pemesinan titanium tergantung sebagaimana cara mengatasi beberapa sifat yang dimilikinya. Sifat-sifat itu antara lain:

1. Konduksi panas

Titanium merupakan konduktor panas yang buruk. Panas yang dihasilkan oleh pemotongan tidak menghilang dengan cepat. Oleh karena itu, sebagian besar panas terkonsentrasi pada tepi pemotongan dan permukaan pahat. Hal ini menyebabkan tingkat kekasaran permukaan meningkat.

2. Sifat paduan

Titanium memiliki kecenderungan sifat paduan yang kuat, atau reaktivitas kimia dengan material pada temperatur pahat potong. Hal ini dapat menyebabkan tingkat kekasaran permukaan yang tinggi.

3. Modulus elastisitas

Titanium memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah daripada besi dan superalloy namun memiliki daya lenting yang lebih baik dibandingkan dengan logam-logam tersebut. Hasilnya adalah defleksi benda kerja yang lebih besar.

4. Rentan terhadap kerusakan permukaan.

5. Karakteristik pekerjaan pengerasan

Karakteristik pengerasan titanium dapat menunjukkan “*built-up edge*”. Munculnya *built-up edge* pada tepi alat potong menyebabkan perubahan yang mengakibatkan peningkatan temperatur pada sebagian area alat potong. Sehingga tingkat kekasaran permukaan meningkat.

Teknologi pemesinan konvensional titanium tidak jauh berbeda dengan teknologi pemesinan pada umumnya. Terdapat beberapa parameter pemotongan yang harus diperhatikan dalam melakukan proses pemotongan titanium, parameter-parameter tersebut antara lain:

1. Umur pahat

Data umur pahat telah dikembangkan melalui eksperimen dengan menggunakan berbagai jenis paduan titanium. Data tersebut

mewakili secara keseluruhan jenis titanium. Pada kecepatan pemotongan yang tinggi, umur pahat relatif lebih singkat dan begitu juga sebaliknya.

2. Gaya dan daya pemotongan

Gaya pemotongan merupakan hal yang sangat penting. Hal ini dikarenakan gaya potong dapat menentukan besarnya daya yang dibutuhkan untuk melakukan pemotongan. Bila gaya potong dikalikan dengan kecepatan potong, maka didapat besarnya daya yang dibutuhkan untuk melakukan pemotongan. Secara umum kebutuhan daya pada proses pembubutan dan milling dapat diperoleh dengan mengukur daya yang masuk ke motor penggerak selama proses pemotongan dan dengan menguranginya dengan daya idle. Pada tabel 3.2. menunjukkan kebutuhan daya untuk pemesinan titanium yang dibandingkan dengan beberapa paduan lainnya.

Tabel 2.1. Daya pemotongan untuk beberapa jenis material

Material	Kekerasan HB (3000 Kg)	Unit daya ketajaman pahat (a), hp/in ³ . Per min		
		Pahat bubut HSS dan Karbida	Pahat bor HSS	Pahat milling HSS dan Karbida
Baja	35 – 40 HRC	1.4	1.4	1.5
Titanium paduan	250 – 357	1.2	1.1	1.1
Nikel temperatur tinggi dan paduan	200 – 360	2.5	2.0	0.32
Cobalt Paduan Aluminium	30 – 150 (500 Kg)	0.25	0.16	0.32

Sumber: *Titanium: A user guide*

3. Material Pahat

Pahat potong yang digunakan untuk pemesinan titanium membutuhkan ketahanan dan kekerasan yang memadai. Meskipun penggunaan alat dengan material baru seperti special ceramics, coated carbides, polycrystalline diamonds, dan boron nitrid hanya untuk memotong material seperti baja, besi cor, dan paduan tahan panas, tidak terdapat perkembangan yang baru untuk meningkatkan produktivitas pemesinan komponen titanium.

4. Peralatan potong dan cairan pendingin

Meskipun sifat dasar pemesinan dari logam titanium tidak dapat dikurangi secara signifikan, efeknya dapat diminimalisir dengan menurunkan temperatur yang dihasilkan pada permukaan dan tepi pahat.

2.5 Kekasaran Permukaan

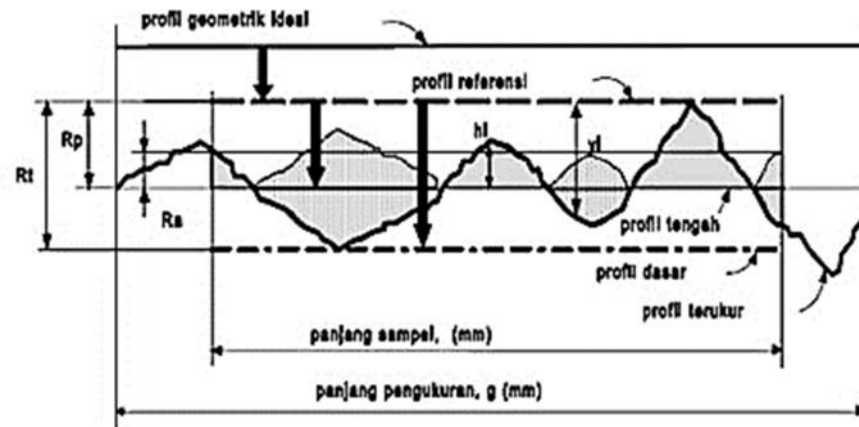
Setiap permukaan benda kerja yang mengalami proses pemesinan akan mengalami kekasaran permukaan. Yang dimaksud dengan kekasaran permukaan adalah ketidakraturan konfigurasi dan penyimpangan rata-rata aritmetik dari garis rata-rata permukaan yang nantinya akan terlihat pada profil permukaan. Kekasaran permukaan juga dapat dinyatakan dengan jarak rata-rata dari profil ke garis tengah antara puncak tertinggi dan lembah terdalam

dari suatu permukaan yang menyertai proses produksi yang disebabkan oleh pengerjaan mesin.

Permukaan suatu benda kerja akan memiliki nilai kekasaran permukaan yang berbeda, sesuai dengan kualitas suatu proses pemesinan dan parameternya. Nilai kekasaran permukaan memiliki nilai kualitas (N) yang berbeda, Nilai kualitas kekasaran permukaan telah diklasifikasikan oleh ISO dimana yang paling kecil adalah N1 yang memiliki nilai kekasaran permukaan (R_a) 0,025 μm dan yang paling tinggi N12 yang nilai kekasarannya 50 μm (Choirul, 2014).

2.5.1 Permukaan dan parameter-parameter permukaan

Untuk memproduksi profil suatu permukaan, sensor peraba (*stylus*) alat ukur harus digerakkan mengikuti lintasan yang berupa garis lurus dengan jarak yang telah ditentukan terlebih dahulu. Panjang lintasan ini disebut dengan panjang pengukuran (*traversing length*). Sesaat setelah jarum bergerak dan sesaat sebelum jarum berhenti secara elektronik alat ukur melakukan perhitungan berdasarkan data yang dideteksi oleh jarum peraba. Bagian panjang pengukuran yang dibaca oleh sensor alat ukur kekasaran permukaan disebut panjang sampel (Choirul,2014).



Gambar 2.7. Profil Permukaan
(Sumber : Rochim,2007)

Berdasarkan Gambar diatas dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan yang berhubungan dengan dimensi pada arah tegak dan melintang. Untuk arah tegak dikenal beberapa parameter antara lain:

1. Kekasaran total R_t (μm) adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.
2. Kekasaran peralatan R_p (μm) adalah jarak rata-rata profil referensi dengan profil tertukar.
3. Kekasaran rata-rata aritmatik R_a (μm) adalah harga rata-rata aritmatik dari harga absolut jarak antara profil terukur dengan profil tengah.
4. Kekasaran rata-rata kuadratik R_g (μm) adalah akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.
5. Kekasaran total rata-rata R_z (μm), merupakan jarak antara profil alas ke profil terukur pada lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil alas ke profil terukur pada lima lembah terendah

Pada Gambar juga ditunjukkan bentuk profil sesungguhnya dengan beberapa keterangan lain, seperti :

1. Profil Geometris Ideal (Geometrically Ideal Profile) adalah garis . permukaan sempurna berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung.
2. Profil Referensi / Puncak (Reference Profile) adalah garis puncak tertinggi dari profil terukur pada panjang sampel yang diambil dalam pengukuran. Profil ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis karakteristis ketidakteraturan bentuk dari suatu permukaan.
3. Profil Terukur (Measured Profile) adalah garis permukaan yang terukur. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan produk pemesinan.
4. Profile Dasar/ Alas (Root Profile) adalah profil referensi yang digeserkan kebawah hingga tepat pada titik terendah pada profil terukur.
5. Profile Tengah (Centre Profile) adalah profil yang berada ditengah tengah antara puncak tertinggi dan lembah terdalam.

2.5.2 Toleransi Harga Ra

Seperti halnya toleransi ukuran (lubang dan poros), harga kekasaran rata-rata aritmetis Ra juga mempunyai harga toleransi kekasaran. Dengan demikian masing-masing harga kekasaran mempunyai kelas kekasaran yaitu dari N1 sampai N 12. Besarnya toleransi untuk Ra biasanya diambil antara 50% ke atas dan 25% ke bawah.

Tabel 2.2. Toleransi harga kekasaran rata-rata Ra

Kelas kekasaran	Harga C.L.A (μm)	Harga Ra (μm)	Toleransi	Panjang sampel (mm)
-----------------	-------------------------------	----------------------------	-----------	---------------------

N1	1	0.0025	0.02 - 0.04	0.08
N2	2	0.05	0.04 - 0.08	
N3	4	0.0	0.08 - 0.15	0.25
N4	8	0.2	0.15 - 0.3	
N5	16	0.4	0.3 - 0.6	
N6	32	0.8	0.6 - 1.2	
N7	63	1.6	1.2 - 2.4	
N8	125	3.2	2.4 - 4.8	0.8
N9	250	6.3	4.8 - 9.6	
N10	500	12.5	9.6 - 18.75	2.5
N11	1000	25.0	18.75 - 37.5	
N12	2000	50.0	37.5 - 75.0	8

Toleransi harga kekasaran rata-rata, Ra dari suatu permukaan tergantung pada proses pengerjaannya. Hasil penyelesaian permukaan dengan menggunakan mesin gerinda sudah tentu lebih halus dari pada dengan menggunakan mesin bubut. Tabel berikut ini memberikan contoh harga kelas kekasaran rata-rata menurut proses pengerjaannya (Paridawati, 2015).

Tabel 2.3. Tingkat kekasaran rata-rata permukaan menurut proses pengerjaannya.

Proses pengerjaan	Selang (N)	Harga Ra
<i>Flat and cylindrical lapping, Superfinishing Diamond turning</i>	$N_1 - N_4$ $N_1 - N_6$	0.025 - 0.2 0.025 - 0.8
<i>Flat cylindrical grinding Finishing</i>	$N_1 - N_8$ $N_4 - N_8$	0.025 - 3.2 0.1 - 3.2
<i>Face and cylindrical turning, milling and reaming Drilling</i>	$N_5 - N_{12}$ $N_7 - N_{10}$	0.4 - 50 1.6 - 12.5
<i>Shapping, planing, horizontal milling Sandcasting and forging</i>	$N_6 - N_{12}$ $N_{10} - N_{11}$	0.8 - 50 12.5 - 25
<i>Extruding, cold rolling, drawing Die casting</i>	$N_6 - N_8$ $N_6 - N_7$	0.8 - 3.2 0.8 - 1.6

2.5.3 Alat Ukur Kekasaran Permukaan

Alat ukur kekasaran permukaan yang digunakan adalah *Surface Roughness Tester*. Alat ini dapat digunakan untuk mengamati ataupun mengukur tingkat kekasaran dari suatu permukaan dengan standar ISO. Beberapa data yang dapat di tunjukkan oleh alat uji kekasaran permukaan ini adalah nilai parameter-parameter dari kekasaran permukaan dan grafik kekasaran permukaannya.

Kekasaran didefinisikan sebagai ketidakhalusan bentuk yang menyertai proses produksi yang disebabkan oleh pengerjaan mesin. Nilai kekasaran dinyatakan dalam *Roughness Average (Ra)*. Ra merupakan parameter kekasaran yang paling banyak dipakai secara internasional.

Pengukuran kekasaran permukaan diperoleh dari sinyal pergerakan stylus berbentuk diamond untuk bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan sebagai alat indicator pengukur kekasaran permukaan benda uji. Prinsip kerja dari *Surface Roughness Tester* adalah dengan menggunakan transducer dan diolah dengan mikroprocessor.

Langkah langkah pengerjaan dengan alat ini adalah :

1. Benda uji diletakkan pada bidang yang datar.
2. Sejajarkan alat ukur permukaan tersebut dengan bidang material yang akan di uji.
3. Ujung dari dial indicator di set pada posisi stabil untuk melakukan pembacaan skala tekanan terhadap permukaan benda uji.

4. Tentukan seberapa panjang dari bagian benda ukur yang akan di uji kekasaran permukaannya, nantinya panjang inilah yang akan di lewati oleh dial indicator.
5. Apabila dial indicator telah melakukan pengukuran sepanjang jarak yang kita tentukan, nilai kekasaran permukaan akan tercatat, dan dapat dilihat dalam bentuk print out.
6. Sebelum dilakukan pengukuran, benda uji dan alat ukur telah diatur sehingga sedapat mungkin tidak terdapat kesalahan dalam pengukuran.

2.6 Getaran Mesin Perkakas

Fenomena getaran yang umum terjadi pada suatu mesin perkakas antara lain sebagai berikut:

1. Getaran Paksa (*forced vibration*)

Frekuensi dari getaran paksa ini merupakan resultan dari masing-masing frekuensi dari komponen-komponen pengganggu (*disturbing component*). Pada mesin perkakas yang sedang berputar umumnya selalu ada getaran paksa dan faktor yang penting adalah besar/kecil *amplitudo* getaran paksa tersebut. Sumber-sumber getaran paksa pada mesin perkakas berasal dari:

- a. Gaya pemotongan yang berubah-ubah secara periodis seperti pada permesinan dengan menggunakan mesin frais.
- b. Gaya-gaya pengganggu yang berasal dari mesin itu sendiri. Misalnya :perputaran dari pada elemen-elemen mesin yang tidak seimbang, sistem transmisi roda gigi yang tidak seimbang, dll (Bagiansa, 2014).

2. *Chatter*

Jenis getaran ini biasa disebut dengan *self excited vibration*. Frekwensi getaran pada *catter* tergantung pada frekwensi pribadi sistem. Fenomena *chatter* hanya akan terjadi jika batas stabilitas dinamis dari sistem dilampaui. Kondisi seperti ini terjadi misalnya pada suatu proses pemotongan dimana harga parameter-parameter pemotongan diambil secara berlebihan (kedalaman pemotongan yang terlalu besar, kecepatan pemakanan dan kecepatan potong yang terlalu tinggi, dll).

Gejala *chatter* adalah gejala yang cukup kompleks dan penelitian dibidang ini menyimpulkan suatu batas yang dinamai "*dynamic cutting coeficien*" yang menentukan terjadi tidaknya *chatter* tersebut. Respon dari suatu sistem mesin perkakas terhadap komponen-komponen pengganggu yang bekerja tergantung pada sifat-sifat (karakteristik) dinamis mesin perkakas itu sendiri. Respon dari mesin perkakas terhadap suatu pembebanan (gaya) statis hanya tergantung pada kekakuan (*rigidity*) sistem. Tetapi dalam perbedaan dinamis, respon yang terjadi juga tergantung pada gaya inersia dan faktor damping daripada sistem tersebut (Bagiansa, 2014).

Berdasarkan standar ISO 2372 yang tertera pada manual *book vibration meter tipe VB-8213* getaran ijin untuk proses permesinan antara lain ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Klasifikasi getaran ijin

<i>Small machines, especially produktion elektrikal motors of up to 15 KW (Group K).</i>

<i>Good</i>	0 to 0.71 mm/s
<i>Acceptabel</i>	0.72 to 1.80 mm/s
<i>Still permissible</i>	1.81 to 4.5 mm/s
<i>Dangerous</i>	>4.5 mm/s
<i>Medium sized machines, especially electrical motors with 15 up to 75 KW output, without special foundation (Group M)</i>	
<i>Good</i>	0 to 1.12 mm/s
<i>Acceptable</i>	1.13 to 2.80 mm/s
<i>Still permissible</i>	2.81 to 7.1 mm/s
<i>Dangerous</i>	>7.1 mm/s
<i>Large machines on heavy foundation (Group G)</i>	
<i>Good</i>	0 to 1.80 mm/s
<i>Acceptable</i>	1.81 to 4.50 mm/s
<i>Still permissible</i>	4.51 to 11.2 mm/s
<i>Dangerous</i>	>11.2 mm/s
<i>Largest machines and turbo machines with a special foundations</i>	
<i>Good</i>	0 to 2.80 mm/s
<i>Acceptable</i>	2.81 to 7.10 mm/s
<i>Still permissible</i>	7.11 to 18 mm/s
<i>Dangerous</i>	>18 mm/s

(Sumber: ISO-2372. book vibration meter tipe VB-8213).

2.7 Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taghuci tahun 1940 yang merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan resources seminimal mungkin. Sasaran metode Taguchi adalah peningkatan kualitas produk, dengan mencari faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kualitas, lalu memisahkannya kedalam faktor kendali dan faktor tidak

terkendali (*noise*). Masing-masing faktor dibagi berdasarkan level, lalu dipilih matriks orthogonal sebagai alat bantu untuk pelaksanaan eksperimen berdasarkan jumlah faktor dan level faktor yang terpilih.

Hasil eksperimen dianalisis dengan *Signal to Noise Ratio* (S/N) dan ANOVA untuk menentukan faktor-faktor dan level faktor yang paling berpengaruh pada kualitas produk. Metode Taguchi menggunakan seperangkat matriks khusus yang disebut *Orthogonal Array Matriks* standar untuk menentukan jumlah percobaan minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter. Bagian terpenting dari metode Orthogonal Array terletak pada pemilihan kombinasi level variabel-variabel input untuk masing-masing percobaan (Zulhendri, 2008).

2.7.1 Rasio *Signal* terhadap *Noise* (S/N Ratio)

Taguchi memperkenalkan pendekatan S/N ratio untuk meneliti pengaruh faktor noise terhadap variasi yang timbul. Jenis dari S/N rasio tergantung pada karakteristik yang diinginkan, yaitu :

1. *Smaller-the-Better* (STB)

Karakteristik kualitas dimana semakin rendah nilainya, maka kualitas semakin baik. Contohnya adalah dalam mencari kekasaran permukaan optimum proses pemesinan, dimana semakin kecil kekasaran permukaan semakin baik permukaannya. Contoh lain adalah keausan, kebocoran dan lain-lain.

Nilai S/N untuk jenis karakteristik STB adalah :

$$S/N \text{ STB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum y^2 \right] \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana : n = jumlah tes di dalam percobaan

2. *Larger-the-Better* (LTB)

Karakteristik kualitas dimana semakin besar nilainya, maka kualitas semakin baik. Contohnya adalah kekuatan material, efisiensi bahan bakar dan lain-lain.

Nilai S/N untuk jenis karakteristik LTB adalah :

$$S/N \text{ LTB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right] \dots\dots\dots (2.13)$$

3. *Nominal-the-Better* (NTB)

Karakteristik kualitas dimana ditetapkan suatu nilai nominal tertentu, jika nilainya semakin mendekati nilai nominal tertentu tersebut maka kualitasnya semakin baik. Contohnya adalah ukuran produk dimana semakin mendekati ukuran nominal yang ditetapkan kualitasnya semakin baik, contoh lainnya adalah clearance, viskositas dan lain-lain.

Nilai S/N untuk jenis karakteristik NTB :

$$S/N \text{ NTB} = -10 \log V_e \text{ (untuk variansi saja)}$$

$$S/N \text{ NTB} = -10 \log \left[\frac{Vm - Ve}{Ve} \right] \text{ (rata}^2 \text{ dan variansi) ... (2.14)}$$

2.7.2 Faktor Terkendali dan Faktor *Noise*

Taguchi mengembangkan faktor perancangan dan pengembangan proses ke dalam dua kelompok yaitu faktor terkendali dan faktor noise. Faktor

terkendali adalah faktor yang ditetapkan (dapat dikendalikan) Oleh peneliti selama tahap perancangan proses dan tidak dapat diubah. Sedangkan faktor noise adalah faktor yang tidak dapat dikendalikan langsung oleh peneliti. Faktor *noise* dapat dibagi menjadi 3 (tiga), yaitu :

1. Faktor *noise eksternal*. Diartikan sebagai sumber-sumber variabilitas yang berasal dari luar produk.
2. Faktor *noise* dari unit ke unit. Merupakan hasil dari produksi dimana selalu ada perbedaan dari setiap item yang sejenis yang telah diproduksi. Disebut juga sebagai variasi toleransi
3. Faktor *noise deteriorasi*. Disebut juga *noise internal* karena faktor ini berasal dari sesuatu (*internal*) yang berubah dari proses atau degradasi dari komponen mesin yang masuk *over time*. Dalam perancangan eksperimen Taguchi, penanganan faktor *noise* melalui 3 (tiga) cara, yaitu :

- a. Dengan melakukan pengulangan terhadap masing-masing perobaan
- b. Dengan memasukkan faktor noise tersebut kedalam percobaan dengan menempatkannya diluar faktor terkendali
- c. Dengan menganggap faktor terkendali bervariasi

III. METODE PENELITIAN

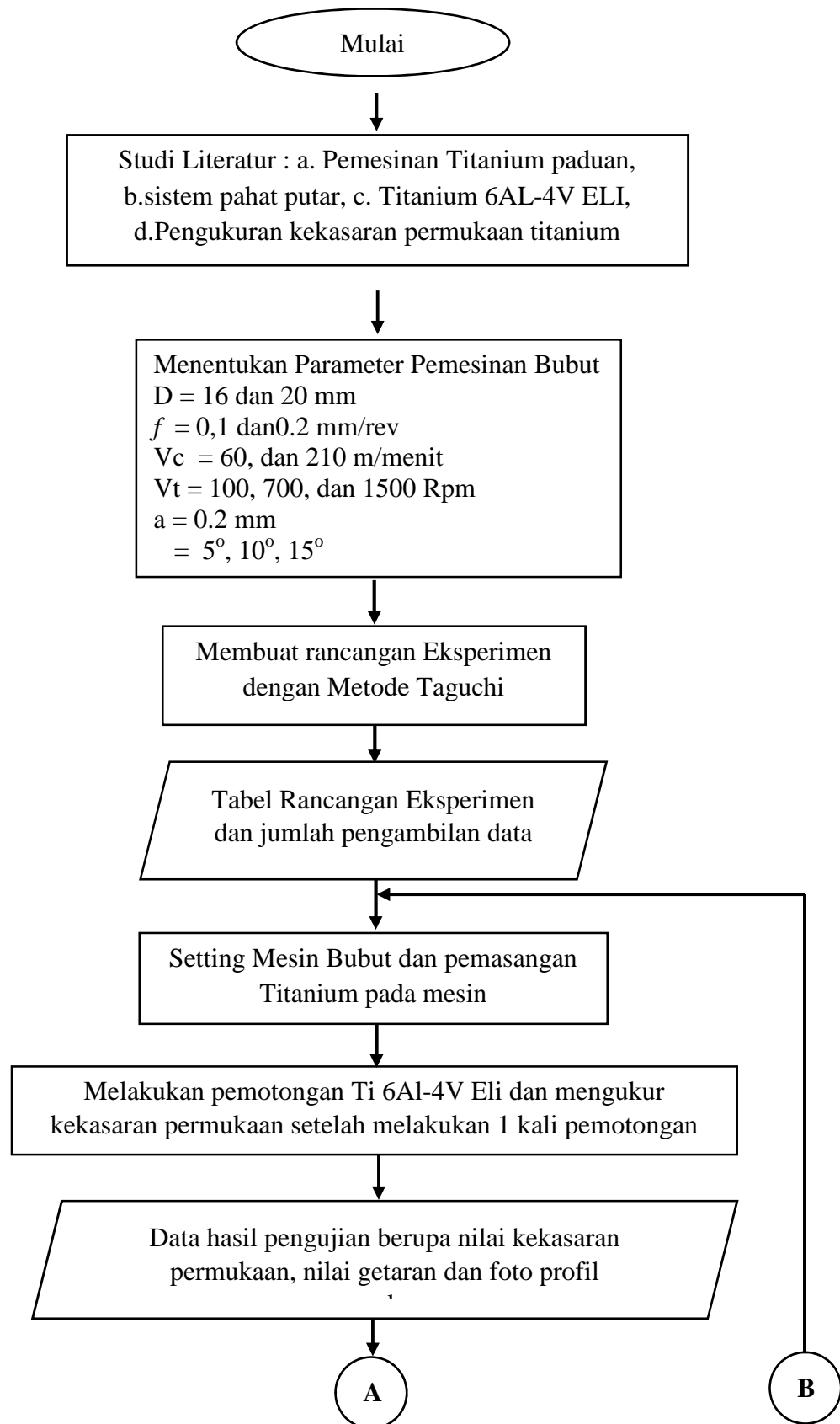
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode pengujian untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan sistem operasi pemesinan menggunakan material Titanium Ti 6Al4V ELI dengan menggunakan *modular rotary tool* yang dipasang pada mesin bubut manual. Secara rinci metode yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini dijelaskan dibawah ini.

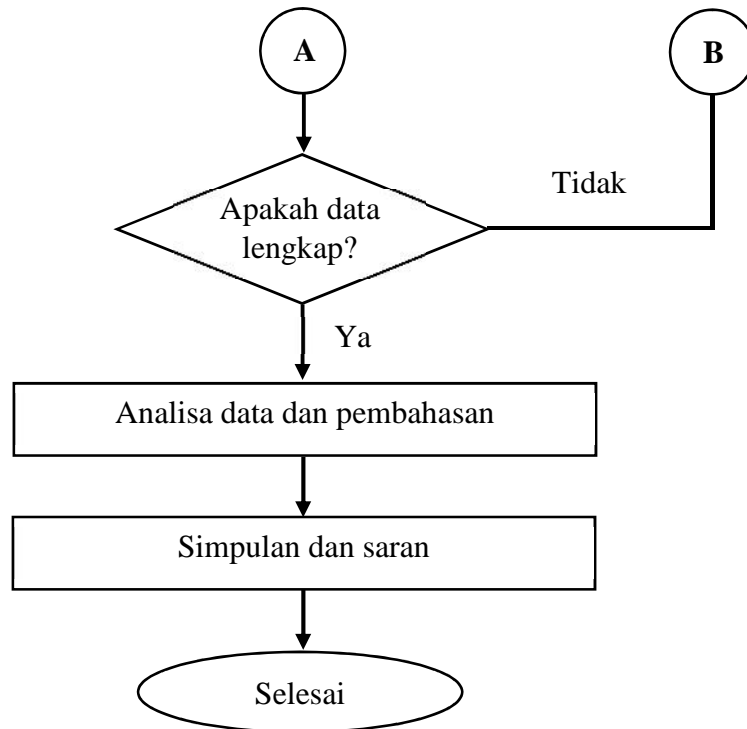
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan mulai dilaksanakan dalam 8 bulan yaitu dari bulan Maret sampai dengan November 2017. Proses pengujian Titanium Ti 6Al4V ELI dilakukan di Laboratorium Teknik Produksi dan proses pengolahan serta analisis data di laboratorium CNC/CAM Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3.2 Alur Penelitian

Secara garis besar, alur pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada *flowchart* di bawah ini :



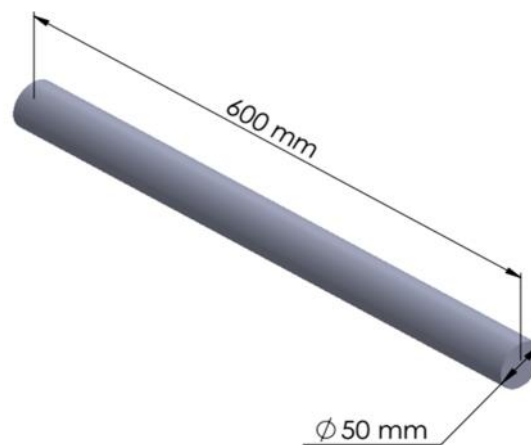


Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Titanium 6Al-4V ELI



Gambar 3.2 Titanium 6Al-4V ELI

Material Titanium 6Al-4V ELI memiliki karakteristik sifat sebagai berikut :

Tabel 3.1 Sifat Fisik Paduan Titanium 6Al-4V ELI

Sifat	Nilai
Modulus Elastisitas	104800.31 MPa/mm ²
Poissons Ratio	0.31 N/A
Shear Modulus	41023.81 MPa/mm ²
Mass Density	4428.78 kg/m ³
Tensile Strength	1050 MPa/m ²
Compressive Strength	Mpa/mm ²
Yield Strength	827.37 MPa/mm ²
Thermal Coeficient	9e-006 K
Thermal Conductivity	6.7 W/(m-K)
Specific Heat	586.04 J/(kg-K)
Damping Rasio	N/A

(Sumber : Matthew dan Donachie, 2000)

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Mesin bubut konvensional

Mesin bubut konvensional adalah mesin perkakas manual yang digunakan untuk memotong benda yang berputar. Proses pemotongan benda kerja dilakukan dengan cara menyayat benda kerja yang berputar dan gerakan pada pahat yang berpindah secara translasi sejajar dengan sumbu putar benda kerja. Gerak putaran benda kerja disebut gerak potong relatif dan gerak translasi pahat disebut gerak makan.

Pada penelitian ini menggunakan mesin bubut, system pahat berputar dan parameter-parameter pemesinan yang sudah ditentukan untuk melakukan pemesinan dengan benda kerja Titanium 6Al-4V ELI. Kemudian akan diukur nilai kekasaran permukaan titanium. Berikut tabel spesifikasi mesin bubut yang digunakan untuk penelitian:

Tabel 3.2 Spesifikasi mesin bubut konvensional

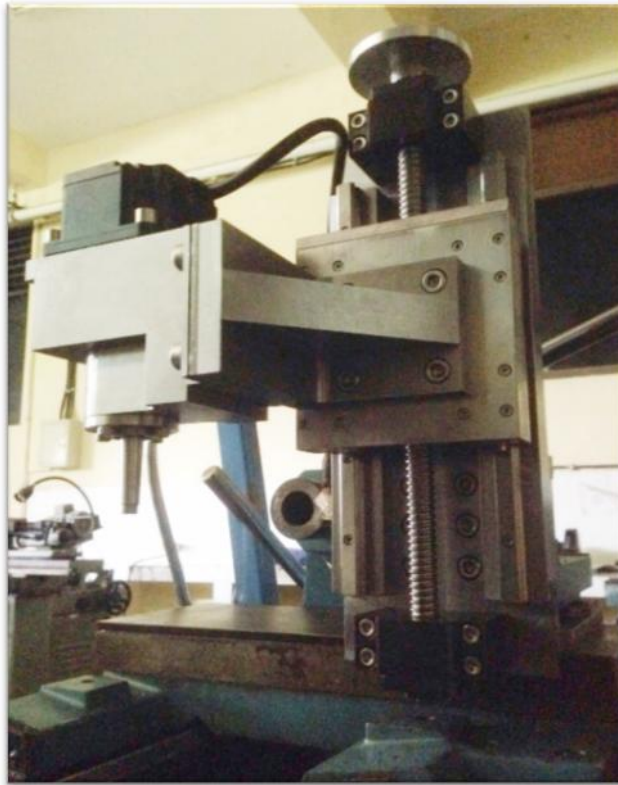
Merk	PHINACO
Type	S-90/200
Motor	Main motor power 4 kW
Central high	200 mm
Central distance	750-1150 mm
Swing over bed	400 mm
Swing over carriage	370 mm
Swing cross slide	210 mm



Gambar 3.3 Mesin bubut konvensional

2. Sistem Pahat Putar Modular (*Modular Rotary Tool System*)

Pahat putar modular merupakan sistem yang digunakan dalam penelitian ini. Metode pemotongan ini mata pisau akan didinginkan selama periode tanpa pemotongan dalam satu putaran pahat potong. Hal ini diharapkan akan menurunkan suhu pemotongan dan laju kekasaran permukaan dibandingkan menggunakan pahat yang diam. Sistem pahat putar modular ini akan ditempatkan didudukan pahat mesin bubut untuk menggantikan sistem pahat bubut konvensional (pahat diam).



Gambar 3.4 Sistem pahat putar modular

3. Laptop

Laptop merupakan *personal computer* (PC) yang dapat dipindah-pindah dan memiliki fungsi sama seperti komputer pada umumnya. Dalam penelitian ini laptop digunakan untuk menampilkan gambar kondisi profil permukaan dari mikroskop USB. Berikut ini tabel spesifikasi laptop yang digunakan :

Tabel 3.3 Spesifikasi laptop

Merk	Asus K45VD
Processor	Intel Corei3-3110M
Operating System	Windows 10 Ultimate
Display	14" LED (1366x768 Pixel)
VGA	NVIDIA GeForce 610M
Memory	4GB DDR3
Hardisk Drive	SATA 500 GB

4. *Surface Tester*

Alat ini berfungsi untuk mengukur kekasaran permukaan dengan standar propertis pengukuran R_a , R_z , R_y dan ketelitian alat $0,01 \mu\text{m}$. Berikut ini tabel spesifikasi *Surface Tester* yang digunakan :

Tabel 3.4 Spesifikasi *Surface Tester*.

Merk	Mitutoyo SJ-210
Pabrikasi	Japan
Ketelitian	$0,01 \mu\text{m}$



Gambar 3.5 *Surface Tester*

5. *Vibration Meter*

Vibration meter merupakan alat untuk mengukur getaran. Pada penelitian ini *vibration meter* digunakan sebagai alat untuk mengukur tingkat getaran struktur *Active driven rotary tool* saat dilakukan proses pemesinan. Alat ini memiliki ketelitian hingga $0,001 \text{ mm}$ untuk *displacement* dan $0,01 \text{ mm/s}$ untuk *velocity*.



Gambar 3.6 Alat ukur getaran (Lutron VB-8213).

6. USB Mikroskop

USB (*Universal Serial Bus*) Mikroskop merupakan perangkat optik yang dapat memperbesar objek pengamatan dengan skala tertentu sesuai dengan kebutuhan peneliti dan dapat dihubungkan dengan komputer. Pada penelitian ini akan menggunakan USB Mikroskop dengan ukuran berikut.

Tabel 3.5 Spesifikasi USB Mikroskop

Model	AM3113T Dino-Lite Premier
Operating system supported	Windows 8, 7, Vista, XP, MAC OS 10.4 or later
Magnification Rate	20x~50x, 200x
Resolution	640x480 pixels (VGA)
Interface	USB 2.0
Lighting	8 white LED lights switched on/off by software
Frame Rate	Up to 30fps
Sensor	Color CMOS
Measurement Function	Yes
Calibration	Yes

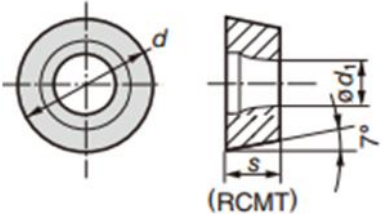


Gambar 3.7 USB mikroskop

7. Pahat Sisipan (*Insert Tool*)

Pahat sisipan yang akan dipasang pada sistem pahat putar ini yaitu jenis karbida terlapis merk Sumitomo dengan ukuran diameter 16 mm dan 20mm.

Tabel 3.6 Spesifikasi Pahat

	Jenis Pahat	Dimension (mm)		
		d	s	d ₁
	RCMT 1606 MO NRX	16	6.35	5.2
	RCMT 2006 MO NRX	20	6.35	6.5

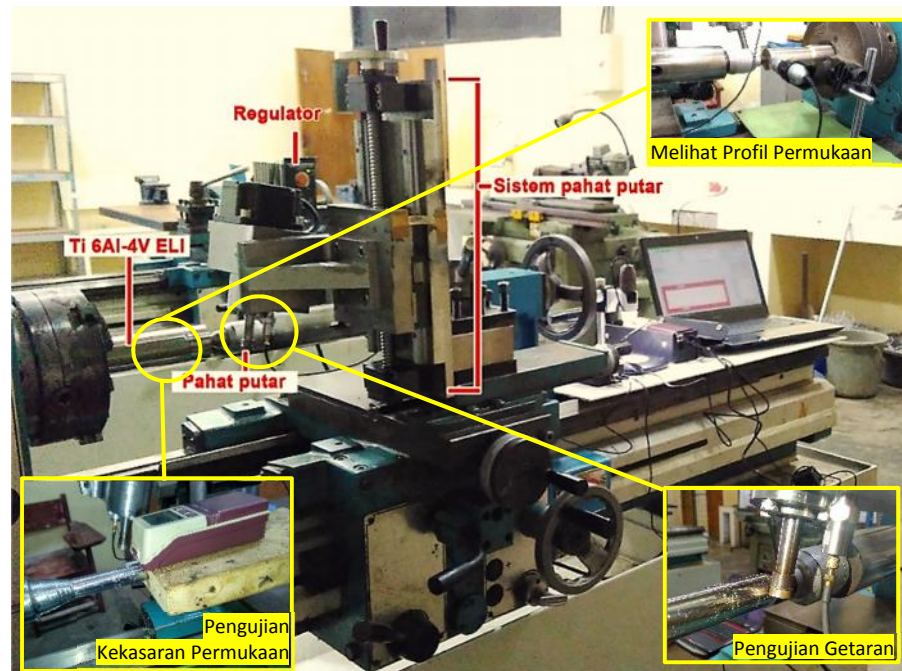
3.4 Prosedur Penelitian

Pada tahap ini akan dilakukan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan, set-up pemesinan dengan sistem pahat putar dan pengolahan data dengan data dengan metode yang digunakan.

3.4.1 Setup Pemesinan Titanium 6Al-4V ELI

Pada tahapan ini dilakukan pemasangan pahat putar (*round cutter*) dan setup benda kerja Titanium 6Al-4V ELI. Adapun tahapannya adalah sebagai berikut :

1. Memasang sistem pahat putar *round cutter* pada *holder* bubut pahat diam.
2. Memosisikan sudut inklinasi pahat *round cutter* () sebesar 5° dengan cara memutar roda gigi internal dan eksternal dan memasang *lock cover* kemudian mengencangkan baut. Dimana setiap antar gigi memiliki jarak 5° .
3. Memasang sensor getaran pada *cover* bantalan bagian bawah *round cutter* dan dihubungkan pada komputer
4. Memasang material Titanium 6Al-4V ELI pada pencekam (*chuck*) mesin bubut kemudian melakukan pengukuran diameter material (50 mm). Memasang senter dan penentuan titik nol pemotongan.
5. Memulai melakukan pemesinan pada material Titanium 6Al-4V ELI dengan ketentuan setelah satu kali pemotongan dengan parameter pemesinan yang telah ditentukan kemudian mengukur kekasaran permukaan sebanyak 3 titik pada permukaan titanium.
6. Melakukan penggantian parameter seperti diameter pahat, *feeding*, kecepatan potong, kecepatan putar pahat dan sudut inklinasi sesuai dengan parameter yang ditentukan pada Tabel 3.8. Pemesinan dilakukan tanpa fluida pendingin.



Gambar 3.8 Set-up pemesinan Titanium 6Al-4V ELI dengan sistem pahat putar

3.4.2 Perencanaan Data Percobaan

Pada tahap ini melakukan perencanaan pengolahan data penelitian.

Adapun tahapan sebagai berikut :

1. Menentukan parameter pemotongan.

Tabel 3.7 Parameter Pemotongan

Parameter	Simbol	Satuan	Level		
			1	2	3
Diameter Pahat	D	mm	16	20	
<i>Feeding</i>	f	mm/rev	0,1	0,2	
Kecepatan Potong	Vc	m/min	60	210	
Kecepatan Putar Pahat	Vt	rpm	100	700	1500
Sudut Inklinasi		derajat	5	10	15
<i>Deep of Cut</i>	a	mm	0,2		

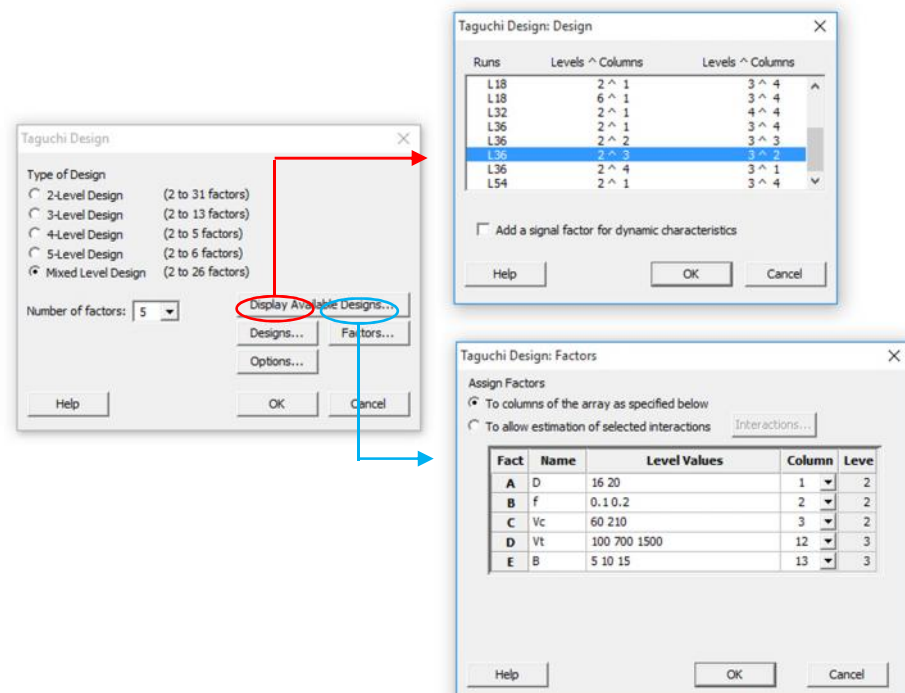
Parameter tersebut diambil dari penelitian sebelumnya Fariza (2017).

Fariza meneliti Titanium 6Al-4V ELI dengan menggunakan pahat putar modular dengan pahat diameter 16 mm dan sudut inklinasi 10°,

hasil optimum diperoleh pada kecepatan potong (V_c) 180 m/menit, dengan *feeding* (f) 0.2 mm/rev dan *Deep of Cut* (a) 0.2 mm. Dengan hasil yang baik ini maka perlu dikaji pengaruh variasi beberapa parameter untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan.

2. Membuat *Orthogonal Array* (OA).

Orthogonal Array atau variasi percobaan dibuat dengan metode Taguchi L_{36} menggunakan software Minitab 17 dengan parameter pada Tabel 3.8. Dalam penelitian ini *Orthogonal Array* yang dipilih adalah $L_{36} 2^3 \times 3^2$ yaitu ada 36 variasi percobaan untuk 2 faktor 3 level dan 3 faktor 2 level. Cara untuk membuat *Orthogonal Array* pada Minitab 17 adalah Klik **Stat** **DOE** **Taguchi** **Create** **Taguchi Design**.



Gambar 3.9 Penentuan *Orthogonal Array*

Berikut adalah hasil dari *Orthogonal Array* metode Taguchi L_{36} .

Tabel 3.8 *Orthogonal Array* metode Taguchi L_{36}

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C
	D	f	Vc	Vt	β	Ra	
1	16	0.1	60	100	5		
2	16	0.1	60	700	10		
3	16	0.1	60	1500	15		
4	16	0.1	60	100	5		
5	16	0.1	60	700	10		
6	16	0.1	60	1500	15		
7	16	0.1	210	100	5		
8	16	0.1	210	700	10		
9	16	0.1	210	1500	15		
10	16	0.2	60	100	5		
11	16	0.2	60	700	10		
12	16	0.2	60	1500	15		
13	16	0.2	210	100	10		
14	16	0.2	210	700	15		
15	16	0.2	210	1500	5		
16	16	0.2	210	100	10		
17	16	0.2	210	700	15		
18	16	0.2	210	1500	5		
19	20	0.1	210	100	10		
20	20	0.1	210	700	15		
21	20	0.1	210	1500	5		
22	20	0.1	210	100	10		
23	20	0.1	210	700	15		
24	20	0.1	210	1500	5		
25	20	0.1	60	100	15		
26	20	0.1	60	700	5		
27	20	0.1	60	1500	10		
28	20	0.2	210	100	15		
29	20	0.2	210	700	5		
30	20	0.2	210	1500	10		
31	20	0.2	60	100	15		
32	20	0.2	60	700	5		
33	20	0.2	60	1500	10		
34	20	0.2	60	100	15		
35	20	0.2	60	700	5		
36	20	0.2	60	1500	10		
37							

Pada rancangan percobaan ini *deep of cut* tidak dimasukkan karena tidak dilakukan variasi *deep of cut* pada saat pemotongan.

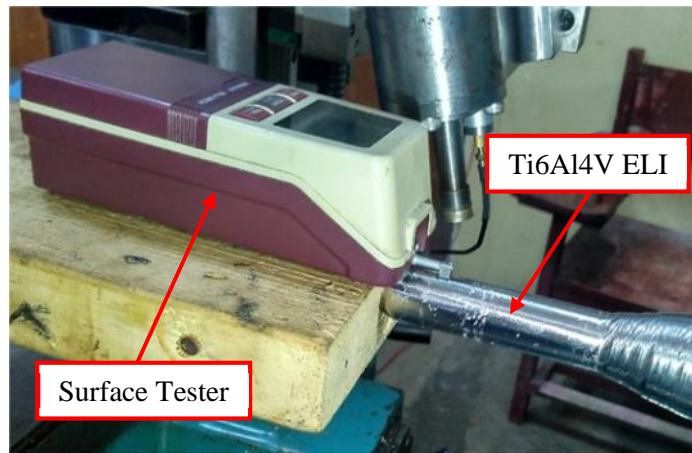
3.4.3 Proses Pengambilan Data

Pada penelitian ini, dilakukan tiga pengambilan data yaitu kekasaran permukaan dan *feedmark* yang dilakukan setelah pemotongan selesai dan pengambilan data getaran yang dilakukan saat berlangsungnya proses pemesinan. Adapun langkah-langkah proses pengambilan datanya adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan setelah dilakukan proses pemesinan (mesin diam), dimana tiap parameter pemesinan dilakukan tiga kali pengukuran dengan *surface tester*. Adapun langkah langkah yang dilakukan sebagai berikut:

- a. Meletakkanudukan *surface tester* antara benda kerja dan center pada mesin bubut, hal ini dilakukan sebagai tumpuan *surface tester* pada saat melakukan pengukuran kekasaran permukaan.
- b. Setelah posisi *surface tester* benar, pengukuran dilakukan dengan cara menekan tombol *start* kemudian mencatat data kekasaran (Ra) yang tertera pada layar *surface tester*, pada tiap parameter pemesinan dilakukan tiga kali pengukuran.

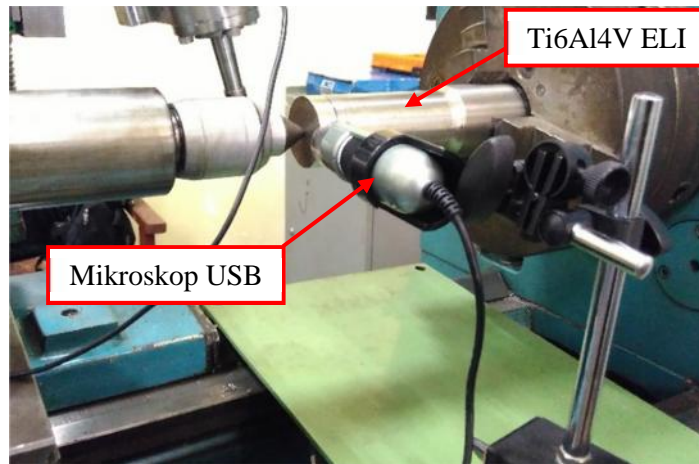


Gambar 3.10 Pembacaan *surface tester* pada permukaan Ti6Al4V ELI

2. Pengukuran *Feedmark*

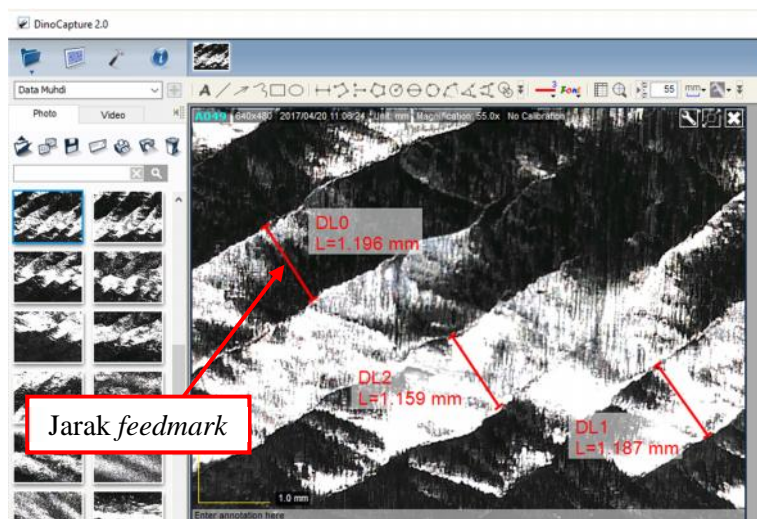
Pengukuran *Feedmark* dilanjutkan dengan cara melihat profil permukaan dengan menggunakan mikroskop USB. Adapun langkah langkah yang dilakukan sebagai berikut:

- a. Meletakkan mikroskop USB pada stand magnetik hingga posisi yang diinginkan sesuai.
- b. Memfokuskan gambar dengan cara melakukan pembesaran gambar pada mikroskop USB hingga permukaan benda kerja terlihat dan gambar fokus, kemudian mengambil gambar dengan menu *Snap* pada aplikasi yang terpasang di komputer.



Gambar 3.11 Melihat Profil Permukaan

- c. Melakukan pengukuran *feedmark* pada gambar profil permukaan menggunakan software *Dino Capture 20* dengan terlebih dahulu memasukan nilai pembesaran yang dilakukan dan melakukan kalibrasi pengukuran pada nilai pembesaran yang sama.
- d. Kemudian mengukur jarak *pitch* yang terlihat pada gambar sebanyak 3 kali secara acak kemudian dirata-ratakan

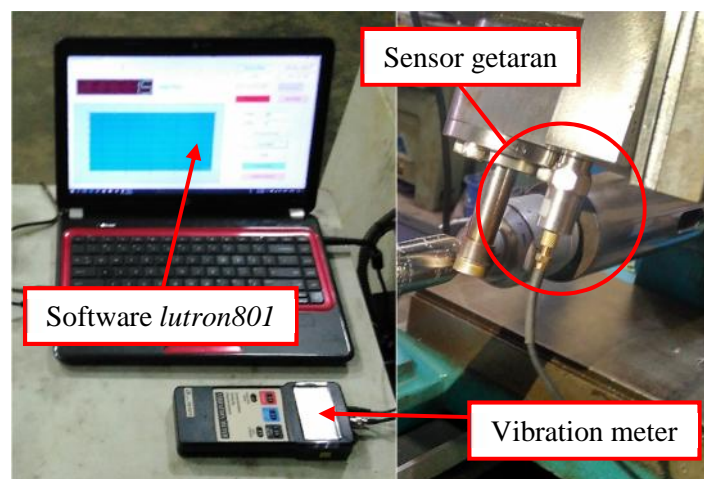


Gambar 3.12 Mengukur *feedmark* pada software *Dino Capture*

3. Pengukuran Getaran

Pengukuran getaran dilakukan untuk melihat besar getaran yang terjadi pada pemesinan Ti 6A-14V ELI. Pengukuran dilakukan pada saat proses pemesinan berlangsung. Adapun langkah langkah yang dilakukan sebagai berikut:

- a. Menghubungkan alat ukur vibration meter dengan komputer dan membuka software *lutron801*. Sensor getaran di letakan pada cover bantalan bagian bawah.
- b. Mengubah nama data pengujian lalu *create new data file* dilanjutkan dengan *create* dan *exit*.
- c. Pengambilan data getaran *velocity* dilakukan dengan chart display selanjutnya klik run untuk memulai pengukuran getaran, setelah selesai kemudian save data.



Gambar 3.13. Pengukuran getaran.

3.4.4 Pengolahan Data

Setelah didapatkan data dari hasil proses pemesinan Ti6Al4V ELI dengan rancangan eksperimen diatas maka akan dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh parameter terhadap kekasaran permukaan. Pada penelitian ini dilakukan Analisis Taguchi dan Analisis varian ANOVA

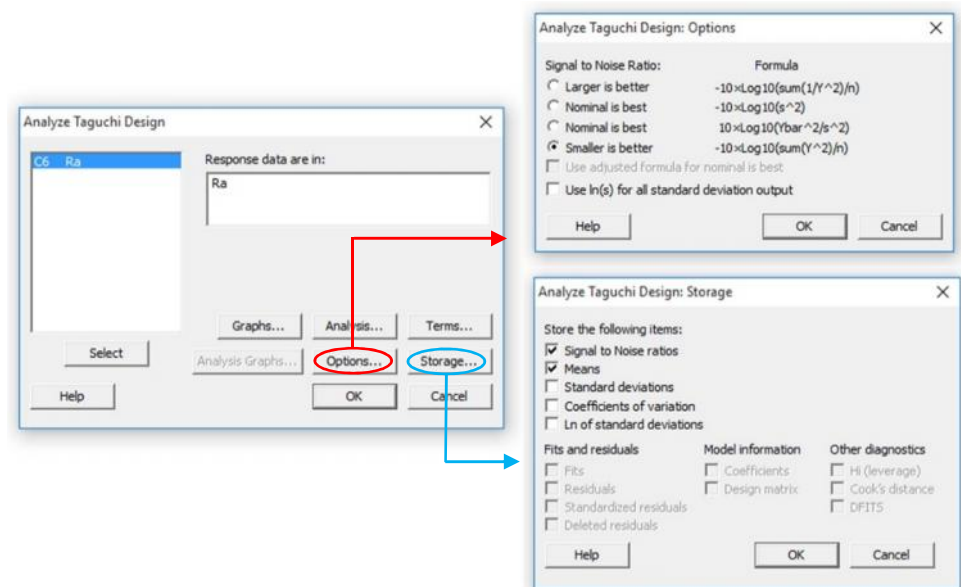
1. Analisis Taguchi

Pada analisis taguchi dilakukan perhitungan *Signal-to-Noise Ratio* (S/N *ratio*) dengan karakteristik kualitas *Smaller-the-Better*.

Pengolahan data menggunakan software Minitab 17 berdasarkan *orthogonal-array* $L_{36} 2^3 \times 3^2$. Adapun cara untuk melakukan analisis

taguchi pada Minitab 17 adalah Klik **Stat DOE Taguchi**

Analyze Taguchi Design.



Gambar 3.14 Analisis Taguchi pada Minitab 17

Karakteristik kualitas metode Taguchi yang sesuai pada penelitian ini adalah *Smaller-the-Better* (STB), karena hasil yang diinginkan

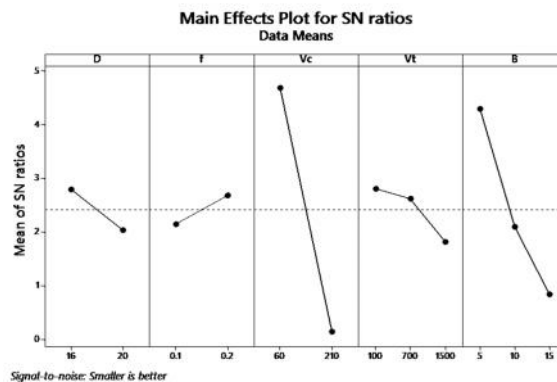
pada penelitian ini adalah kekasaran permukaan yang paling kecil dari proses bubut dengan parameter pemotongan yang dilakukan. Data yang telah dianalisa akan di sajikan dalam bentuk tabel dan grafik dari S/N Rasio untuk masing-masing level seperti yang ditunjukkan sebagai berikut:

Taguchi Analysis: Ra versus D, f, Vc, Vt, B

Response Table for Signal to Noise Ratios
Smaller is better

Level	D	f	Vc	Vt	B
1	2.7987	2.1461	4.6864	2.8109	4.2984
2	2.0315	2.6841	0.1438	2.6184	2.1035
3				1.8160	0.8434
Delta	0.7672	0.5379	4.5426	0.9948	3.4550
Rank	4	5	1	3	2

Gambar 3.15 Jendela Session



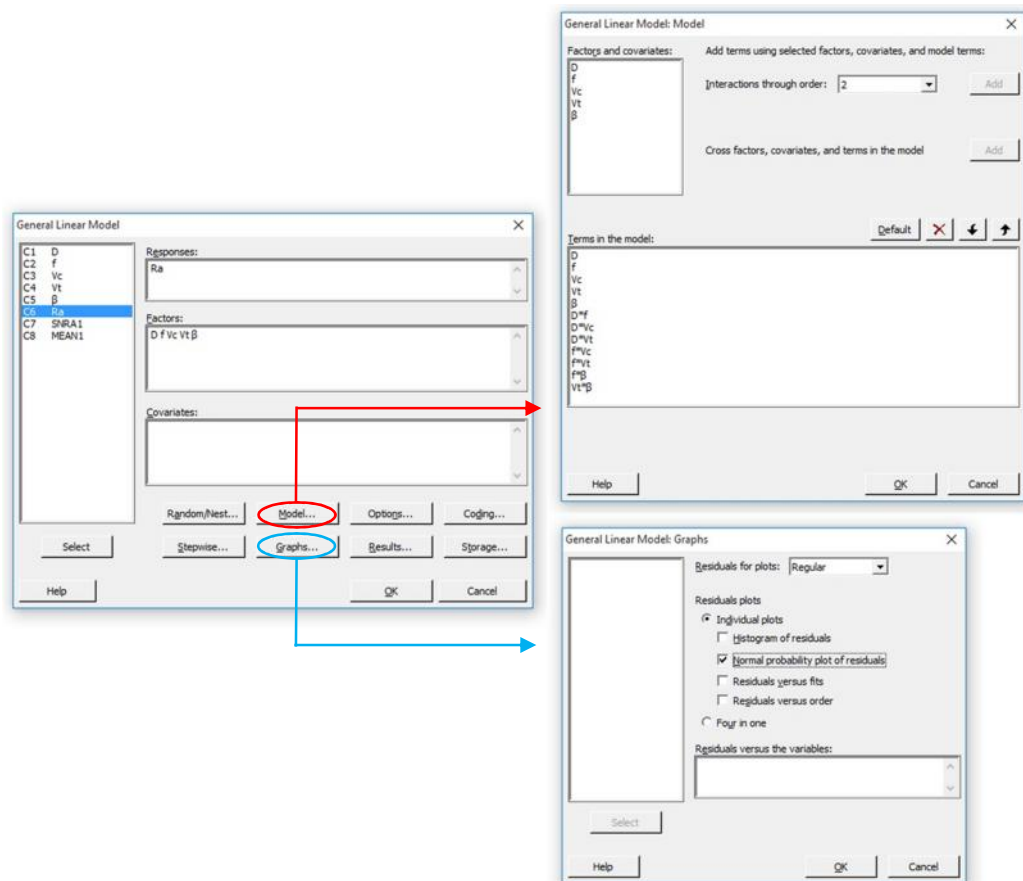
Gambar 3.16 Grafik respon S/N Rasio untuk Ra

Setelah diketahui S/N rasio kemudian dilakukan Analisis Varian (ANOVA) menggunakan software Minitab 17 untuk didapatkan faktor-faktor yang signifikan mempengaruhi kekasaran permukaan.

2. Analisis Varian ANOVA

Analisis varian digunakan untuk melihat faktor-faktor yang signifikan pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan. Analisis varian dilakukan menggunakan software Minitab 17. Adapun cara

untuk melakukan analisis varian ANOVA pada Minitab 17 adalah
 Klik **Stat** → **ANOVA** → **General Linear Model** → **Fit General Linear Model**.



Gambar 3.17 Analisis Varian pada Minitab 17

Pada menu “*Model*” dimasukkan faktor interaksi, dimana interaksi didapatkan berdasarkan grafik interaksi. Untuk menampilkan grafik pada menu “*Graphs*” ditandai pada *Normal Probability plot of residual*. Setelah itu klik **Ok** maka akan didapatkan tabel Analisis Varian pada jendela session seperti gambar 3.21 berikut.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
D	1	0.18682	3.02%	0.08224	0.08224	1.32	0.265
f	1	0.21365	3.45%	0.07094	0.07094	1.14	0.300
Vc	1	2.35793	38.06%	1.90125	1.90125	30.46	0.000
Vt	2	0.07902	1.28%	0.10596	0.05298	0.85	0.444
β	2	0.56634	9.14%	0.67870	0.33935	5.44	0.014
D*f	1	0.04270	0.69%	0.04270	0.04270	0.68	0.418
D*Vc	1	0.25840	4.17%	0.25840	0.25840	4.14	0.056
D*Vt	2	1.06433	17.18%	0.38577	0.19289	3.09	0.069
f*Vc	1	0.13119	2.12%	0.13119	0.13119	2.10	0.163
f*Vt	2	0.07894	1.27%	0.09311	0.04655	0.75	0.488
f* β	2	0.03023	0.49%	0.03023	0.01511	0.24	0.787
Error	19	1.18587	19.14%	1.18587	0.06241		
Lack-of-Fit	7	1.18587	19.14%	1.18587	0.16941	*	*
Pure Error	12	0.00000	0.00%	0.00000	0.00000		
Total	35	6.19541	100.00%				

Gambar 3.18 Tabel hasil Analisis Varian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melaksanakan seluruh tahapan dalam penelitian, terdapat kesimpulan yang dihasilkan antara lain :

1. Pada proses pemotongan Ti6Al4V ELI menghasilkan nilai kekasaran permukaan terendah sebesar $0,38 \mu\text{m}$ dan nilai kekasaran permukaan tertinggi sebesar $1,67 \mu\text{m}$. Serta menghasilkan nilai getaran terendah 0.00 mm/sec dan nilai getaran tertinggi 9.5 mm/sec .
2. Pada Analisis Taguchi S/N Rasio, parameter yang mempengaruhi kekasaran permukaan secara berurut adalah Kecepatan Potong (V_c), Sudut Inklinasi (α), Kecepatan Putar Pahat (V_t), Diameter Pahat (D) dan *feeding* (f)
3. Pada Analisis Varians parameter yang mempengaruhi kekasaran permukaan secara signifikan adalah Kecepatan Potong (V_c) dan Sudut Inklinasi (α)
4. Pada Analisis Taguchi S/N Rasio, parameter yang mempengaruhi getaran secara berurut adalah Kecepatan Potong (V_c), Diameter Pahat (D), Sudut Inklinasi (α), Kecepatan Putar Pahat (V_t), dan *feeding* (f)

5. Pada Analisis Varians parameter yang mempengaruhi getaran secara signifikan adalah Kecepatan Potong (V_c) dan Sudut Inklinasi (α)

6. Kondisi optimum pemesinan untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang terbaik adalah pada diameter 16 mm, *feeding* 0.2 mm/rev, kecepatan potong 60 m/min, kecepatan putar pahat 100 rpm dan sudut inklinasi 5°
7. Model matematik untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan prediksi adalah: $Ra = -0.363 + (0.0360 \cdot D) + (-1.54 \cdot f) + (0.003412 \cdot Vc) + (0.000063 \cdot Vt) + (0.0292 \cdot \theta)$

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain :

1. Pada pengujian selanjutnya diharapkan dilakukan proses pengujian optimum sebagai pembanding antara nilai Ra optimum prediksi yang dihitung berdasarkan metode taguchi dengan Ra optimum yang didapatkan dari pengukuran percobaan.
2. Melakukan pengujian dengan level parameter yang lebih bervariasi baik diameter, *feeding*, kecepatan potong, kecepatan putaran pahat maupun sudut inklinasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggoro, Paulus. 2012. *Aplikasi DOE Untuk Menentukan Setting Parameter Optimum Pada Proses Pembuatan Produk Roll*. Universitas Atma Jaya Yogyakarta. D.I. Yogyakarta
- Asilturk, Ilhan dan Harun Akkus. 2011. *Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method*. Selcuk University, Konya, Turkey
- Choirul, Muhammad Azhar. 2014. *Analisis Kekasaran Permukaan Benda Kerja Dengan Variasi Jenis Material dan Pahat Potong*. Universitas Bengkulu. Bengkulu.
- Doni, A.R. 2015. *Analisa Nilai Kekasaran Permukaan Paduan Magnesium AZ31 Yang Dibubut Menggunakan Pahat Potong Berputar*. Universitas Lampung. Lampung
- Fariza, Feri. 2017. *Evaluasi Dan Analisa Kinerja Sistem Pahat Putar Modular Untuk Pemesinan Peralatan Kesehatan Ortopedi Berbasis Material Titanium 6al-4v ELI*. Universitas Lampung. Lampung
- Gao,L.F. 2005. *Introdution to Manufacturing Process*. Mc/Graw-Hill
- Harun, Suryadiwansa. 2009. *Study on Turning with Actively Driven Rotary Tool*. Dissertation. Kobe University.
- Ibrahim, Gusri Akhyar. 2010. *Aplikasi Metoda Taguchi Untuk Mengidentifikasi Kekasaran Permukaan Dalam Pembubutan Paduan Titanium*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9. Palembang
- Kuroda, Mutofumi. 2000. *Improvement of Cutting Efficiency by Rotary Tools*. Mitsubisihi Heavy Industries.ltd

- Leyens, C. dan Peters M. 2003. *Titanium and Titanium Alloys*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KG&A
- Matthew,J. & Donachie, Jr. 2000. *Titanium A Technical Guide Second Edition*. United States of America: ASM International.
- Palanikumar, K. 2006. *Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling* Springer-Verlag London Limited 2006
- Paridawati. 2015. *Pengaruh Kecepatan Dan Sudut Potong Terhadap Kekasaran Benda Kerja Pada Mesin Bubut*. Universitas Islam 45 Bekasi. Jawa Barat
- Purnomo, Bagus. 2017. *Analisa Nilai Kekasaran Permukaan Magnesium Az3 Yang Dibubut Menggunakan Pahat Putar Dan Udara Dingin*. Universitas Lampung. Lampung
- Rahdiyana, Dwi. 2010. *Materi Kuliah Proses Pemesinan*. Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta.
- Rochim Taufiq. 1993. *Perkakas dan Sistem Perkakas (Umur Pahat, Cairan Pendinginan Pemesinan)*. ITB. Bandung.
- Sahooa, Ashok kumar dan Bidyadhar Sahoob. 2011. *Surface roughness model and parametric optimization in finish turning using coated carbide insert: Response surface methodology and Taguchi approach*. KIIT University dan IGIT. Orissa. India.
- Saputra, Erwin Dedi dan Diah Wulandari . 2017. *Perbandingan Tingkat Kekasaran Dan Getaran Pahat Pada Pemotongan Orthogonal Dan Oblique Akibat Sudut Potong Pahat*. Universitas Negeri Surabaya. Surabaya
- Widarto. 2008. *Teknik Pemesinan jilid 1*. Direktorat Pembinaan SMK. Departemen Pendidikan Nasional. Jakarta

Wijayanto, D.S., dan Estriyanto, Y. 2005 *Teknologi Mekanik Mesin Perkakas*.
UNS Press. Surakarta.

Zulhendri dan Yusri. 2008. *Penggunaan Metode Parameter Taguchi Dalam Mengidentifikasi Kekasaran Permukaan Optimum Proses Bubut*. Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Padang. Sumatra Barat