

ANALISA NILAI KEKASARAN PERMUKAAN PADA PEMESINAN

MICRO-MILLING Ti 6Al-4V ELI

(Skripsi)

Oleh

ARMULANI PATI HAWA



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2019

ABSTRAK

ANALISA NILAI KEKASARAN PERMUKAAN PADA PEMESINAN MIKRO MILLING Ti 6AL-4V ELI

Oleh

ARMULANI PATI HAWA

Titanium 6AL-4V ELI merupakan material yang banyak diaplikasikan dalam industri terutama pada material implan biomedis. Titanium 6AL-4V ELI memiliki sifat rasio kekakuan terhadap berat yang baik, tahan korosi dan sifat biokompatibel yang baik didalam tubuh. Namun karena konduktifitas termal yang rendah diperlukan pemilihan parameter pemesinan yang sesuai agar menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang baik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis nilai kekasaran permukaan, mengetahui pengaruh parameter dan mendapatkan model matematika nilai kekasaran permukaan pada pemesinan *micro-milling* material Ti 6AL-4V ELI. Dimana pada penelitian ini menggunakan metode *full factorial*, dengan 4 faktor dan 2 level sehingga jumlah 16 kali percobaan. Parameter pada pemesinan *micro-milling* adalah kecepatan putaran (n) 10000, 15000 rpm, gerak makan (f) 0.001, 0.005 mm/rev, kedalaman potong (t) 100, 150 μm dan diameter pahat 1 dan 2 mm. Hasil analisis menunjukkan nilai kekasaran permukaan terendah adalah sebesar 0.26 μm pada n : 15000 rpm, f : 0,005 mm/rev, t : 100 μm dan D : 2 mm. Sedangkan nilai kekasaran permukaan maksimum adalah sebesar 0,90 μm pada n : 15000 rpm, f : 0,005 mm/rev, t : 150 μm dan D : 1 mm. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan metode *Analyze Factorial Design*, parameter yang mempengaruhi nilai kekasaran permukaan secara signifikan adalah diameter pahat, dimana nilai signifikannya sebesar 0,000 dan nilai rasio sebesar 22,89% dari total R-sq sebesar 81,79%. Kekakuan pahat dengan diameter yang lebih kecil membuat defleksi pahat menjadi lebih signifikan dan getaran pahat juga lebih serius sehingga menghasilkan kualitas permukaan yang buruk. Model matematika yang diperoleh untuk nilai kekasaran permukaan adalah $R_a = 0.723 - 0.3050 D + 0.000014 n - 0.18.1 f + 0.001650 t$. Prediksi aktual dengan selisish statistik memiliki selisih 0,01 μm atau error yang terjadi hanya 2,1%.

Kata kunci : Kekasaran permukaan, *micro-milling*, Ti 6AL-4V ELI, *full factorial*

ABSTRACT

ANALYSIS THE SURFACE ROUGHNESS VALUE OF MICRO-MILLING MACHINING Ti 6AL-4V ELI

Oleh

ARMULANI PATI HAWA

Ti 6AL-4V ELI is applications in industry equipment, mostly in biomedic implant. Ti 6AL-4V ELI has well stiffness ratio over weight, corrosion resistance, and biocompatibility good in the body. However, due to low thermal conductivity it is necessary to choose the appropriate machining parameters to produce a good surface roughness value. Point of this study was to analyze the value of surface roughness, to determine the effect of parameter and configure mathematic model for surface roughness value in micromilling machining Ti 6AL-4V ELI. This study used full factorial method with 4 factors, 2 levels and 16 times attempt. Parameter in *micro-milling* machining was spindle speed (n) 10000, 15000 rpm, feed (f) 0.001, 0.005 mm/rev, depth of cut (t) 100, 150 μm and tool diameter was 1 and 2 mm. The result occurred that the lowest surface roughness value was 0.26 μm of n : 15000 rpm, f : 0,005 mm/rev, t : 100 μm dan D : 2 mm. While the highest surface roughness value was 0.90 μm of : 15000 rpm, f : 0,005 mm/rev, t : 150 μm dan D : 1 mm. *Analyze Factorial Design had choosen, parameter of tool diameter influenced* surface roughness value was significant, when significant value 0,000 and rasio value 22,89% of R-sq was 81,79%. Tool stiffness with a smaller diameter makes the tool deflection more significant and tool vibrations are also more serious resulting in poor surface quality. Mathematic model for surface roughness value was $R_a = 0.723 - 0.3050 D + 0.000014 n - 18.1 f + 0.001650 t$. Actual predictions with statistical differences have a difference of 0.01 μm or an error of only 2.1%.

Key words : Surface roughness, Micro milling, Ti 6AL-4V ELI, Full factorial.

ANALISA NILAI KEKASARAN PERMUKAAN PADA PEMESINAN MIKRO

MILLING Ti 6Al-4V ELI

**Oleh
ARMULANI PATI HAWA**

SKRIPSI

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2019

Judul Skripsi : **ANALISA NILAI KEKASARAN PERMUKAAN
PADA PEMESINAN MICRO MILLING
TI 6AL-4V ELI**

Nama Mahasiswa : **Armulani Pati Hawa**

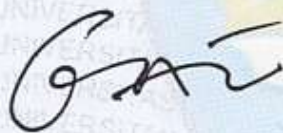
Nomor Pokok Mahasiswa : **1415021019**

Program Studi : **Teknik Mesin**

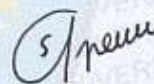
Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.
NIP 19710817 199802 1 003



Ir. Arinal Hamni, M.T.
NIP 19641228 199603 2 001

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin



Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.**

Anggota : **Ir. Arinal Hamni, M.T.**

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.**

2. Dekan Fakultas Teknik



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **07 Oktober 2019**

PERNYATAAN PENULIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

ANALISA NILAI KEKASARAN PERMUKAAN PADA

PEMESINAN *MICRO-MILLING* Ti 6Al-4V ELI

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



Armulani Pati Hawa
1415021019

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 01 Februari 1996, sebagai anak ke dua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Syarifuddin.B dan Ibu Muslina. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Sukabumi tahun 2008, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 24 Bandar Lampung

pada tahun 2011 dan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 12 Bandar Lampung pada tahun 2014. Dan pada tahun 2014 penulis terdaftar sebagai Mahasiswi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan. Sebagai Eksekutif Muda di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM FT) pada periode kepengurusan 2014-2015. Selain itu penulis juga pernah menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Wakil Bendahara Umum pada periode kepengurusan 2015-2016. Dan juga sebagai Sekretaris di Unit Kegiatan Mahasiswa Fakultas Kreatif Motivatif Inovatif (UKMF CREMONA) pada periode kepengurusan 2016-2018. Pada bidang akademik, pada tahun 2017 penulis melaksanakan kerja praktek di PT. Bukit Asam (Persero) Tbk. Penulis pernah menjadi asisten dosen Mata Kuliah

Matematika Teknik 1 pada tahun ajaran 2016/2017. Kemudian penulis pernah menjadi asisten laboratorium Metalurgi tahun ajaran 2019/2020. Pada tahun 2018 penulis melakukan penelitian pada bidang konsentrasi Produksi sebagai Tugas Akhir “Analisa Nilai Kekasaran Permukaan Pada Pemesinan *Micro-Milling* Ti 6AL-4V ELI” dibawah Bimbingan Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim S.T.,M.T. dan Ibu Ir. Arinal Hamni, M.T.

Bandar Lampung, 18 Oktober 2019

Penulis

Armulani Pati Hawa

MOTTO

“ BERANI JUJUR ”

Don't forget the people who helped you get to
where you are today.

*Believe, Allah will never give you a problem
which bigger than you ability.*

(Q.S. An-Nur : 26)

PERSEMBAHAN

Dengan Kerendahan Hati Meraih Ridho Illahi Robbi dan syafaat nabi Muhammad SAW Kupersembahkan
Karya Kecilku Untuk Orang-orang Yang Sangat Aku Sayangi

Orang Tuaku

Terimakasih kepada kedua orang tuaku, Bapak Drs Syarifuddin, B (ALM) dan Ibu Muslina. Segala pengorbananya yang tak terbalaskan, doa, kesabaran, keikhlasan, cinta dan kasih sayangnya yang tidak tergantikan selamanya. Mama single fight ku.

Kakak dan Adik

Terimakasih Kepada kakakku, Armulina Patihawa, S.T. dan Adikku, Armudian Maharani Patihawa yang telah menjadi motivasi dan inspirasi. Selalu ada dalam segala suasana duka dan suka serta kebersamaan tanpa batas selama ini.

Dosen Teknik Mesin Universitas Lampung

Terimakasih Kepada Dosenku, yang selalu membimbing, mengajarkan dan memberikan saran serta saran baik akademis maupun non akademis

Sahabat Teknik Mesin Unila 2014

Terimakasih Kepada sahabat Teknik Mesin 2014 yang selalu memberikan semangat dan berdiri tegap disampingku saat duka dan suka sebagai nasihat dan keceriaan.

Almamater Tercinta

Teknik Mesin- Universitas Lampung

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh.

Alhamdulillahilabbilamin, segala puji bagi Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis. Sehingga penulis selalu mendapat kelancaran dan kemudahan dalam penulisan skripsi ini. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada junjungan Nabi besar kita Muhammad SAW, serta para keluarga dan sahabat Nya hingga akhir zaman.

Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Skripsi dengan judul “**Analisa Nilai Kekasaran Permukaan Pada Pemesinan *Micro-Milling* Ti 6AL-4V ELI**” dapat diselesaikan dengan baik berkat partisipasi, bantuan, dukungan dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada :

1. Orangtua ku Bapak Syarifuddin. B (Alm) dan Ibu Muslina yang selalu memberikan kasih sayang, semangat motivasi, dukungan materi ataupun moril dan juga mendo'akan atas harapan dan kesuksesan penulis.
2. Kakakku Amulina Patihawa B dan adikku Armudian Maharani Patihawa tersayang yang selalu memberi dukungan dan perhatian kepada penulis.
3. Bapak Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.

4. Bapak Ahmad Suudi, S.T.,M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung atas segala arahan dan motivasinya selama ini.
5. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama tugas akhir ini, yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi nasehat selama proses penyelesaian skripsi bagi penulis.
6. Ibu Ir. Arinal Hamni, M.T. selaku dosen pembimbing kedua skripsi ini, yang telah banyak memberikan waktu dan pemikiran bagi penulis.
7. Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. Selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan sebagai penyempurnaan penulisan skripsi.
8. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing akademik yang telah membantu dan member masukan selama proses perkuliahan bagi penulis.
9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin atas ilmu yang diberikan selama penulis melaksanakan studi, baik materi akademik maupun teladan dan motivasi untuk masa yang akan datang.
10. Tak lupa juga terima kasih kepada staf dan karyawan Gedung H Teknik Mesin Universitas Lampung. Untuk Mas Marta selaku Administrasi Teknik Mesin yang selalu membantu dalam segala hal.
11. Rekan-rekan sahabat : Grup Pak Gusri Bersatu (Eko Agus S, M. Daud F, Bayu Frans W, Rofika Libiru, M. Putra Y, A. Aldino Rizki dan Bang Aufa). Parthner ngelab dan anak-anak kontrakan (Arisandi, Danar Sri

Wahyono, Carlos C. Turnip, Yandi H, Irfan M, Wareh W, Riyansah Putra P, Faktariopin Bilco S, Akbar Zakia, Hadi Ari W, Dwi Agus P dan Muktar H) semoga rasa kebersamaan dan kekeluargaan ini akan selalu ada untuk selamanya.

12. Sahabat seperjuangan Restu Anidia Mustika Dewi dan Neneng hariyati yang selalu memberi semangat dan masukan motivasi.
13. Rekan-rekan Teknik Mesin 2014 semua yang tidak bisa disebut namanya satu persatu. Semoga kebersamaan ini tetap terjaga hingga akhir hayat, “SOLIDARITY FOREVER”.
14. Sahabat, teman susah, teman senang dan teman ribut yang selalu ada dan telah banyak membantu penulis menyelesaikan studi ini Gunawan Efendi.
15. Semua pihak yang telah berjasa dan membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu. Terimakasih atas segala kontribusi terhadap penulis.

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, 18 Oktober 2019
Penulis,

Armulan Pati Hawa
NPM. 1415021019

DAFTAR ISI

Halaman

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Hipotesa	5
1.5 Sistematika Penulisan	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Titanium	7
2.2 Titanium dan Ti 6AL 4V ELI	8
2.3 Proses Pemesinan	10
2.3.1 Pemesinan Titanium.....	10
2.3.2 Pemesinan <i>micro-milling</i>	14
2.3.3 Parameter Proses <i>micro-milling</i>	16
2.3.3.1 Kedalaman potong	17
2.3.3.2 Kecepatan Potong.....	17
2.3.3.3 Putaran Spindel	17
2.3.3.4 Gerak Makan	18
2.4 Kekasaran Permukaan	18
2.5 Minitab	23
2.5.1 <i>Full Factorial</i>	23
2.5.2 <i>Analyze factor Design</i>	24
2.6 Teori	25

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian	27
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	27

3.3 Alur Penelitian	28
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.4.1 Alat	29
3.4.2 Bahan	34
3.5 Prosedur Penelitian	35
3.5.1 Menentukan Kondisi Pemesinan	35
3.5.2 Melakukan Pemesinan	37
3.5.3 Analisis Data	40

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Nilai Kekasaran Permukaan Pada proses Pemesinan micro-milling Ti 6AL 4V-ELI	42
4.2 Analisis Varian.....	44
4.2.1 Uji Koefisien Regresi.....	46
4.2.2 Uji Koefisien Determinasi (R^2)	47
4.2.3 Uji Normal Probability	49
4.3 Model Matematika Nilai Ra pada Pemesinan Ti 6AL-4V ELI.....	50
4.4 Analisis Model Teoritis.....	52
4.4.1 Pengaruh Diameter Pahat Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan	53
4.4.2 Pengaruh Kecepatan Putaran Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan	54
4.4.3 Pengaruh Kedalaman Potong Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan	56
4.4.4 Pengaruh Gerak Makan Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan	58
4.5 Profil Permukaan.....	60

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68

Daftar Pustaka

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Titanium 6AL-4V ELI	9
Gambar 2.2 Mesin CNC <i>Milling</i> 4060 Router	15
Gambar 2.3 Penjelasan Letak Parameter	16
Gambar 2.4 Bidang dan Profil Pada Penampng Permukaan	18
Gambar 2.5 Bentuk Kekasaran dan penggelombangan Pada Permukaan	19
Gambar 2.6. Profil Kekasaran Permukaan	20
Gambar 2.7 Normal Probability Plot Efek	24
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian	28
Gambar 3.2. Mesin CNC <i>Micro-milling</i>	30
Gambar 3.3 Dimensi Pahat Karbida	31
Gambar 3.4 <i>Surface Tester</i>	33
Gambar 3.5. Mesin Uji <i>Scanning Electro Magentic</i> (SEM)	34
Gambar 3.6 Titanium 6AL-4V ELI	35
Gambar 4.1 Data Pengaruh Diameter Pahat	43
Gambar 4.2 Grafik Pengujian Pengujian Terdistribusi Normal	49
Gambar 4.3 Pengaruh Diameter Pahat	53
Gambar 4.4 Pengaruh Kecepatan Putaran	55
Gambar 4.5 Pengaruh Kedalaman Potong	57
Gambar 4.6 Pengaruh Gerak Makan	58
Gambar 4.7 Kecepatan Putaran 10000 rpm	60
Gambar 4.8 Kecepatan Putaran 15000 rpm	61
Gambar 4.9 Kedalaman Potong 100 μm	62
Gambar 4.10 Kedalaman Potong 150 μm	63

Gambar 4.11 Diameter Pahat 1 mm	64
Gambar 4.12 Diameter Pahat 2 mm	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Daya pemotongan untuk beberapa jenis material	13
Tabel 2.2 Toleransi harga kekasaran rata-rata Ra	21
Tabel 2.3 Tingkat kekasaran rata-rata permukaan menurut proses pengerjaannya	22
Tabel 3.1 Spesifikasi mesin CNC <i>Milling Router</i>	31
Tabel 3.2 Spesifikasi pahat kerbida	32
Tabel 3.3 spesifikasi surface tester	33
Tabel 3.4 Spesifikasi mesin uji scanning electro magnetic	34
Tabel 3.5 Sifat fisik paduan Titanium 6AL-4V ELI	35
Tabel 3.6 Variasi parameter pemesinan	36
Tabel 3.7 Kondisi pemesinan	36
Tabel 3.8 Metode <i>full faktorial</i> Parameter pemotongan	36
Tabel 3.9 Data Kekasaran Permukaan	39
Tabel 4.1 Data hasil pengukuran nilai kekasaran permukaan Ra	42
Tabel 4.2 <i>Factorial Regression</i>	45
Tabel 4.3 Nilai rasio determinasi	48

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Titanium salah satu logam yang memiliki karakteristik kekuatan yang hampir sama dengan baja dan 2 kali lebih kuat dari aluminium tetapi beratnya jauh lebih ringan. Beberapa keunggulan dari titanium diantaranya adalah kombinasi rasio antara kekuatan dan berat yang baik pada temperatur tinggi, memiliki sifat tahan patah dan tahan korosi pada suhu tinggi. Dua sifat titanium yang paling berguna adalah sifat ketahanan korosi dan sifat rasio kekuatan terhadap densitasnya yang paling tinggi di antara semua logam lain (Ibrahim, 2014 ; Kurniawan, 2018).

Titanium merupakan material yang banyak digunakan dalam industri implant biomedis dan industri otomotif. Titanium juga dapat digunakan untuk komponen pesawat terbang, titanium yang dipadukan bersama vanadium dapat digunakan untuk luaran kulit pesawat terbang, peralatan pendaratan, dan saluran hidrolik. Integritas permukaan yang dimesin menjadi salah satu indikator penting terhadap kualitas komponen mesin yang diproduksi. Kekasaran permukaan merupakan karakteristik yang menunjukkan kualitas kritis permukaan pada proses pemesinan. Kekasaran permukaan memiliki peranan penting karena dapat mempengaruhi koefisien gesek dari suatu

komponen apabila komponen tersebut dipasangkan dengan komponen lainnya (Bai et al., 2018 ; Ibrahim et al., 2009).

Penelitian mengenai pemesinan titanium juga dilakukan oleh Ibrahim (2010) yang bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh model pemesinan kering terhadap integritas permukaan bahan Ti-6Al-4V ELI yang dimesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekasaran permukaan sangat ditentukan oleh gerak makan dan diameter ujung pahat. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi keadaan integritas permukaan material adalah temperatur yang dihasilkan selama proses pemesinan, transformasi fasa metalurgi yang berlaku, tegangan sisa yang terbentuk dan plastik deformasi pada mikrostrukturnya.

Dalam perkembangan kekinian pemesinan dalam komponen yang kecil sangat dibutuhkan, sehingga pemesinan mikro merupakan proses yang akan menghasilkan produk dengan presisi yang tinggi. Salah satu dari tujuan pemesinan mikro adalah untuk memungkinkan produksi bagian miniatur serta pemesinan permukaan fungsional yang presisi tinggi. Komponen dengan bagian yang kecil menjadi semakin penting untuk teknologi modern. Pemesinan mikro mekanis semakin penting dalam perkembangan industri karena kemampuan fabrikasi struktur tiga dimensi. Produk dengan permukaan yang berkualitas tinggi dapat diperoleh dengan memilih parameter pemotongan yang tepat, terutama untuk operasi pemotongan permukaan. Beberapa peneliti telah melakukan investigasi untuk memantau proses pemesinan, terutama di ranah mikro, menggunakan berbagai variabel

dan sensor (Kiswanto et al., 2014 ; Malekian et al., 2009 ; Uhlmann et al., 2017).

Mikro-milling membutuhkan kecepatan putaran tinggi dan akurasi posisi ekstrim. Dalam *mikro-milling* paduan Ti-6Al-4V kecepatan putaran adalah faktor yang paling pengaruh pada kekasaran permukaan. Pemesinan *mikro-milling* pada paduan Ti-6Al-4V dapat membentuk *Build Up Edge* (BUE) yang dapat memburuk permukaan. Mekanisme keausan pahat dan kualitas permukaan dapat ditinjau dari kondisi pemesinan. Parameter yang mempengaruhi adalah kecepatan putaran, kedalaman potong dan *feed-rate* (Carou et al, 2017).

Kekasaran permukaan dapat menunjukkan hasil yang berbeda dari nilai-nilai yang berhubungan dengan parameter pemotongan, karena untuk proses yang sama dapat terjadi perbedaan yang besar dari *finishing*. Dalam penelitian ini parameter yang digunakan antara lain kedalaman potong, *feed*, kecepatan potong, dan kondisi pahat (pahat baru dan usang). Peningkatan kecepatan potong menunjukkan penurunan yang signifikan dalam kekasaran permukaan, tetapi dalam situasi sebaliknya peningkatan *feed-rate* tidak menunjukkan efek yang sama (Baldo et al, 2014).

Hasil penelitian yang diuraikan diatas menyimpulkan bahwa ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai kekasaran permukaan titanium seperti kedalaman potong, kecepatan potong, *feed rate* dan diameter pahat (Uhlmann et al., 2017). Perkembangan dan kemajuan teknologi saat ini membuat paduan Ti 6Al-4V ELI banyak digunakan untuk keperluan biomedis. Dengan

demikian belum banyaknya penelitian yang menggunakan pemesinan *mikro-milling* dengan menguji kekasaran permukaan pada Ti 6Al-4V ELI dengan variasi parameter seperti gerak makan, kecepatan putar, kedalaman potong dan diameter pahat. Untuk itu penelitian ini akan dilakukan analisa nilai kekasaran permukaan pada proses permesinan *micro-milling* titanium 6Al-4V ELI. Sehingga penelitian diharapkan dapat menghasilkan nilai kekasaran yang lebih baik.

1.2 Tujuan

Berdasarkan latar belakang yang diuraikan, tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui nilai kekasaran permukaan pada proses pemesinan *micro-milling* dengan menggunakan material uji Ti 6Al-4V ELI.
2. Mengetahui pengaruh parameter pemesinan *micro-milling* Ti 6Al-4V ELI terhadap nilai kekasaran permukaan.
3. Mencari model prediksi kekasaran permukaan

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini diberikan agar pembahasan setelah hasil percobaan menjadi lebih fokus dan tertuju pada tujuan yang telah dipaparkan, adapun batasan masalahnya adalah sebagai berikut :

1. Material uji yang digunakan adalah Titanium 6Al-4V ELI.

2. Permesinan yang dilakukan menggunakan mesin *micro-milling* dengan diameter pahat 1 dan 2 millimeter.
3. Parameter yang digunakan dalam proses pemesinan *micro-milling* adalah kecepatan putar (n), gerak makan (f) dan kedalam potong (p).
4. Mesin yang digunakan adalah *micro-milling* CNC 4060 Router.

1.4 Hipotesis

Kecepatan putar dan kedalaman potong mempengaruhi terhadap tingkat kekasaran permukaan yang dihasilkan pada proses pemesinan *micro-milling* material Ti 6AL-4V ELI.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang terdapat pada laporan penelitian ini terdiri dari:

1. Bab I. Pendahuluan

Bab pertama pendahuluan terdiri dari, latar belakang, tujuan, batasan masalah, hipotesa dan sistematika penulisan.

2. Bab II. Tinjauan Pustaka

Bab kedua berisi landasan teori yang berkaitan dengan penelitian, yaitu: teori mengenai penjelasa titanium, proses pemesina, kekasaran permukaan, *full factorial* dan teori.

3. Bab III. Metodologi Penelitian

Bab ketiga berisikan menerangkan tentang pelaksanaan penelitian, yaitu waktu dan tempat penelitian dilaksanakan, alur penelitian, bahan dan alat penelitian yang digunakan dalam penelitian, dan prosedur penelitian mulai dari mempersiapkan bahan, proses micromilling, pengambilan data nilai kekasaran dan menganalisa nilai kekasaran.

4. Bab IV. Hasil Dan Pembahasan

Bab keempat berisikan hasil dan pembahasan dari data-data yang diperoleh saat melaksanakan proses penelitian dan analisis data.

5. Bab V. Penutup

Bab kelima berisikan hal-hal yang dapat disimpulkan pada penelitian dan saran-saran yang ingin disampaikan dari penelitian yang dilakukan.

6. Daftar Pustaka

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

7. Lampiran

Berisikan data-data tambahan laporan tugas akhir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Titanium (Ti)

Titanium ditemukan pertama kali pada tahun 1790 oleh William Gregor. Titanium merupakan logam transisi yang ringan, tahan korosi, kuat, dan termasuk tahan air laut. Titanium memiliki kuat dua kali lebih kuat dari aluminium, tetapi berat 60% lebih ringan. Titanium cukup aktif dan sangat tahan terhadap korosi dari unsur-unsur lain dan zat seperti asam dan oksigen. Memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah (Novriadi, 2016).

Titanium memiliki sifat elektropositif dan mudah bersenyawa dengan karbon sehingga mengakibatkan logam ini sulit untuk dimurnikan. Titanium lebih unggul dibandingkan logam lainnya seperti aluminium, baja, dan *superalloy*. Beberapa fakta yang dimiliki oleh titanium paduan 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 1100°F), tergantung pada komposisinya. Beberapa paduan titanium (titanium aluminide) mungkin memiliki kemampuan bertahan diatas suhu tersebut.

3. Lebih tahan korosi dibandingkan dengan *stainless steel*.
4. Titanium memiliki sifat biokompatibel, sehingga dapat digunakan didalam tubuh manusia.

Titanium memiliki sifat nonmagnetik dan transfer panas yang baik. Dengan koefisien dari ekspansi termal yang sedikit lebih rendah dari pada baja dan kurang dari setengah material aluminium. Titanium dan paduannya memiliki titik leleh yang 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 (Novriadi, 2016).

2.2 Titanium Paduan Ti 6Al-4V ELI

Titanium paduan 6Al-4V ELI merupakan titanium yang berada pada fase alpha beta yang berisi 6% aluminium dan 4% vanadium. Hal ini dapat mendorong peningkatan keuletan dan ketangguhan patah dengan beberapa pengurangan kekuatan. Titanium paduan 6Al-4V ELI jenis ini biasanya

digunakan pada implan biomedis. Titanium paduan 6Al-4V ELI juga memiliki kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik serta memiliki ketahanan terhadap korosi (Kurniawan, 2018 ; Leyens & Peters, 2003). Gambar 2.1 menunjukkan titanium 6AL 4V ELI (International Trade Winds)



Gambar 2.1 Titanium 6Al-4V ELI

Kelebihan dari Titanium paduan 6Al-4V ELI yaitu 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 (Kurniawan, 2018).

2.3 Proses Pemesinan

Proses pemesinan diklasifikasi dalam dua klasifikasi besar. Klasifikasi pertama proses pemesinan yang dilakukan dengan menggunakan mesin bubut, mesin gurdi (*drilling*), mesin frais (*milling*) dan mesin gerinda (*grinding*). Klasifikasi kedua proses pemesinan sekrap (*shaping, planning*), proses slot (*slotting*) dan proses menggergaji (*sawing*) (Kurniawan, 2018).

Proses pemotongan material biasanya dinamakan proses pemesinan, dilakukan dengan cara menyayat atau membuang bagian benda kerja yang tidak digunakan menjadi beram (*chips*) sehingga terbentuk benda kerja yang diinginkan. Proses pemesinan adalah proses yang paling banyak dilakukan untuk menghasilkan suatu produk jadi yang berbahan baku logam. Diperkirakan 60% sampai 80% dari seluruh proses pembuatan suatu komponen yang komplit dilakukan dengan cara proses pemesinan (Rahdiyanta, 2010).

2.3.1 Pemesinan Titanium

Titanium merupakan salah satu material yang dianggap sebagai material yang sangat sulit untuk dilakukan proses pemesinan (*difficut of cut material*). Untuk melakukan proses pemesinan pada titanium paduan dibutuhkan gaya pemotongan yang lebih besar dari pada yang digunakan untuk proses pemesinan baja.

Keberhasilan dalam pemesinan titanium tergantung sebagaimana cara mengatasi beberapa sifat yang dimiliki titanium. Sifat-sifat itu antara lain :

1. Konduksi panas

Titanium merupakan konduktor panas yang sangat 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* (BUE). Munculnya BUE pada tepi pahat menyebabkan perubahan yang mengakibatkan peningkatan temperatur pada sebagian area pahat. Sehingga tingkat kekasaran permukaan meningkat.

Teknologi pemesian konvensional titanium tidak jauh berbeda dengan teknologi pemesian 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 akan dibutuhkan untuk melakukan pemotongan. Bila gaya potong dikalikan dengan kecepatan potong, maka didapat besarnya daya yang akan 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 dengan mengurangnya dengan daya idle.

Pada gambar dibawah menunjukkan kebutuhan daya untuk pemesian 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 Kabrida
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 (Novriadi, 2016).

3. Material Pahat

Pahat potong digunakan untuk proses pemesian 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 pemesian 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.

2.3.2 Pemesinan *micro-milling*

Tujuan pemesinan mikro adalah untuk memungkinkan produksi bagian miniatur serta pemesinan permukaan fungsional yang presisi tinggi. Proses *micro-milling* berbeda dari pemotongan makro. Beberapa masalah penting dalam proses *micro-milling* mengenai kinerja pahat terkait dengan ukuran komponen, parameter pemesinana pemotongan, dan pahat itu sendiri.

Proses *micro-milling* menerapkan analisis dan teknik pemodelan yang berbeda karena efek skala dari pemesinana *micro-milling*. Pemantauan dan sistem pengukuran diterapkan dalam *milling* konvensional dalam banyak kasus tidak cocok untuk mengidentifikasi kondisi pemotongan yang optimal untuk proses *micro-milling*. Oleh karena itu, model analisis dan mekanistik telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir untuk memperhitungkan faktor-faktor dampak yang mendominasi kesalahan *micro-milling* (Uhlmann, 2017).

Ada beberapa masalah yang terkait dengan proses *micro-milling* yang muncul terutama dari material, alat dan proses. Pahat yang kecil lebih cenderung mengalami getaran yang relatif besar karena ukuran

kekakuan berkurang. Akibatnya, pemantauan proses *micro-milling* sangat penting untuk menghindari keausan alat yang berlebihan dan untuk menjaga toleransi bagian dan kualitas permukaan (Malekian, 2009).



Gambar 2.2 Mesin CNC *Milling* 4060 Router

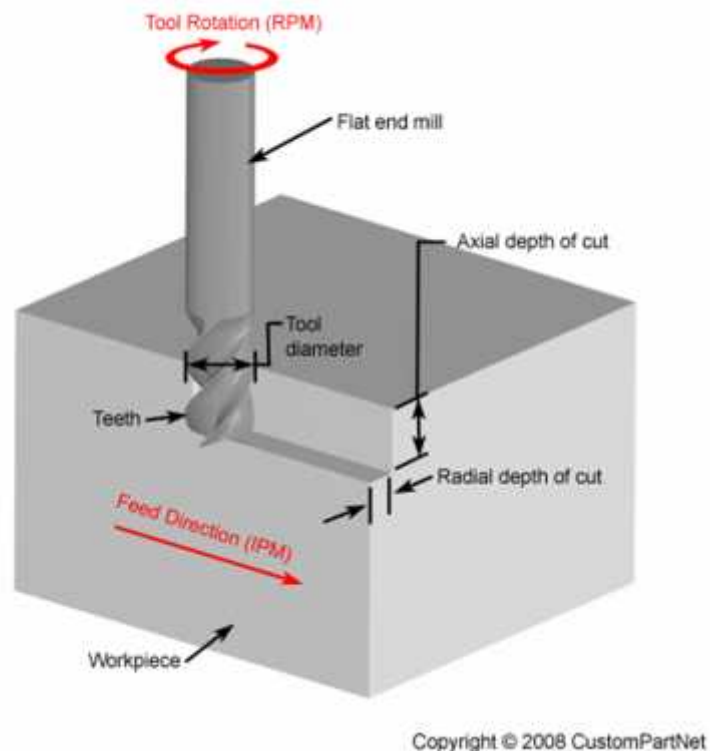
Berikut data spesifikasi mesin *milling* yang digunakan:

Merk	:	JETPRO
Buatan	:	Bandung
<i>RPM Spindle</i>	:	25000 Rpm
Akuransi / Toleransi	:	0,01 mm
Area Kerja	:	400 x 600 cm

Prinsip kerja dari proses *micro-milling* adalah pemotongan benda kerja dengan menggunakan pahat majemuk yang dapat menghasilkan sejumlah geram. Benda kerja diletakkan dimeja kerja kemudian dipasang pahat potong dan disetel sesuai parameter pemesinan.

2.3.3 Parameter proses *micro-milling*

Parameter proses *micro-milling* adalah dasar-dasar perhitungan yang digunakan untuk menentukan perhitungan-perhitungan dalam proses pemesinan *milling*. Parameter seperti kedalaman potong (a), kecepatan potong (V), putaran spindel (n) dan gerak makan (f).



Gambar 2.3 Penjelasan Letak Parameter

2.3.3.1 Kedalaman potong (t)

Kedalaman pemotongan adalah bagian benda kerja yang dibuang atau dipotong dari benda kerja atau jarak antara permukaan yang dipotong terhadap permukaan yang belum dipotong.

2.3.3.2 Kecepatan potong (V)

Kecepatan potong merupakan sebagian keliling yang ditempuh oleh satu titik (dalam satuan meter) pada selubung pahat dalam waktu satu menit. Pada proses milling besarnya diameter yang digunakan adalah diameter pahat sehingga rumus yang dapat digunakan pada kecepatan potong adalah sebagai berikut.

Rumus kecepatan potong :

$$V = \frac{\pi d n}{1000} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

V = kecepatan potong (m/menit)

d = diameter pahat (mm)

n = putaran spindel (putaran/menit)

2.3.3.3 Putaran spindel (n)

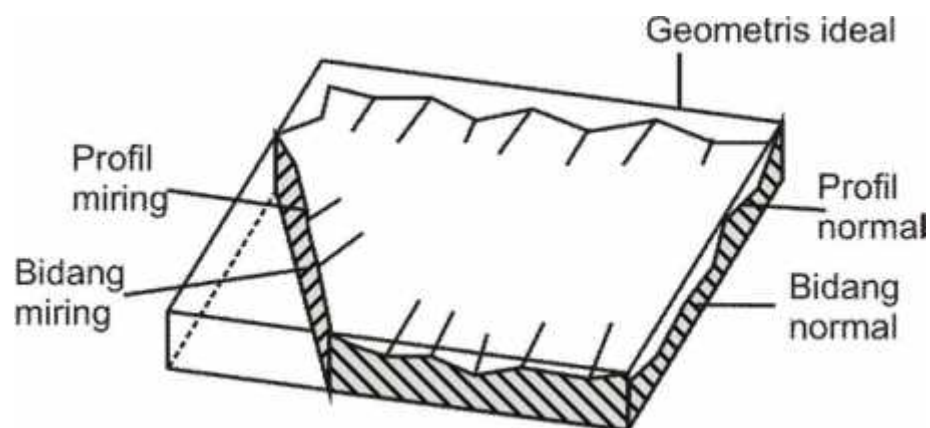
Kecepatan putaran mesin adalah kemampuan kecepatan mesin dalam satuan menit. Putaran spindel merupakan parameter pemesinan yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan (Sugiantoro dkk, 2015).

2.3.3.4 Gerak makan

Gerak makan bisa diatur dengan cara mengatur handel gerak makan sesuai dengan Tabel f yang ada di mesin. Gerak makan ini pada proses frais ada dua macam yaitu gerak makan pergigi (mm/gigi), dan gerak makan per putaran (mm/putaran).

2.4 Kekasaran Permukaan

Menurut istilah keteknikan, permukaan adalah suatu batas yang memisahkan benda padat dengan sekitarnya. Dalam prakteknya, bahan yang digunakan untuk benda kebanyakan dari logam. Kadang-kadang ada pula istilah lain yang berkaitan dengan permukaan yaitu profil. Istilah profil sering disebut dengan istilah bentuk. Profil atau bentuk yang dikaitkan dengan istilah permukaan mempunyai arti tersendiri yaitu garis hasil pemotongan secara normal atau serong dari suatu penampang permukaan (Pranjono dkk, 2013 ; Sugianto dkk, 2015).

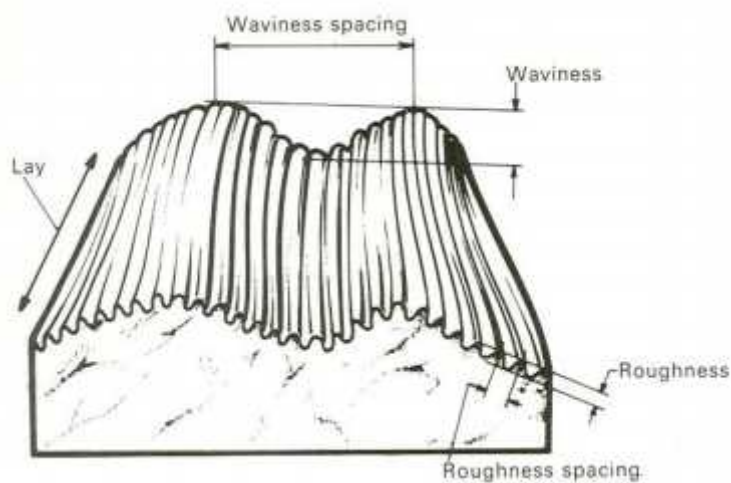


Gambar 2.4 Bidang dan Profil Pada Penampang Permukaan

Dengan melihat profil ini maka bentuk dari suatu permukaan pada dasarnya dapat dibedakan menjadi dua yaitu permukaan yang kasar (*roughness*) dan permukaan yang bergelombang (*waviness*). Permukaan yang kasar berbentuk gelombang pendek yang tidak teratur dan terjadi karena getaran pahat potong atau proporsi yang kurang tepat dari pemakanan (*feed*) pahat potong dalam proses pembuatannya. Setiap permukaan komponen dari suatu benda mempunyai beberapa bentuk yang bervariasi menurut strukturnya maupun

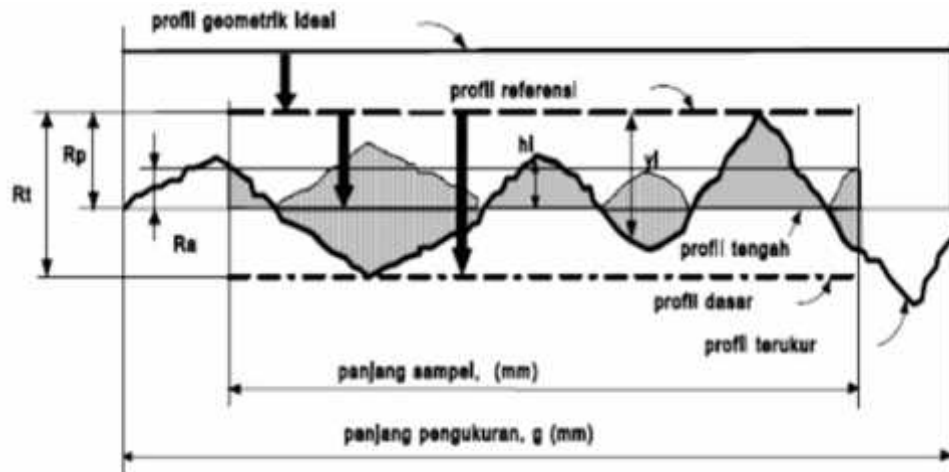
dari hasil proses produksinya. Karakteristik permukaan tersebut ada yang bentuknya halus, dapat juga dalam bentuk kekasaran (*roughness*) maupun membentuk gelombang (*waviness*) seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah.

Bentuk-bentuk kekasaran dan gelombang pada permukaan dapat ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.5 Bentuk Kekasaran dan Penggelombangan Pada Permukaan

Roughness/kekasaran idefinisikan sebagai ketidakhalusan bentuk yang menyertai proses produksi yang disebabkan oleh pengerjaan mesin, sedangkan penggelombangan adalah komponen tekstur dimana kekasaran saling menumpuk. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor seperti penyimpangan mesin, getaran, berbagai penyebab regangan pada bahan dan pengaruh-pengaruh lainnya. Nilai kekasaran dinyatakan dalam *Roughness Average (Ra)*. Ra didefinisikan sebagai rata-rata aritmatika dan penyimpangan mutlak profil kekasaran dari garis tengah rata-rata (Pranjono dkk, 2013).



Gambar 2.6 Profil Kekasaran Permukaan

Parameter kekasaran yang biasa dipakai dalam proses produksi untuk mengukur kekasaran permukaan benda adalah kekasaran rata-rata (R_a). Harga R_a lebih sensitif terhadap perubahan atau penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan. Toleransi harga R_a , seperti halnya toleransi ukuran (lubang dan poros) harga kekasaran rata-rata aritmetis R_a juga mempunyai harga toleransi kekasaran. Harga toleransi kekasaran R_a ditunjukkan pada table dibawah ini.

Tabel 2.2 Toleransi harga kekasaran rata-rata R_a

Kelas Kekasaran	Harga C.L.A (μm)	Harga R_a (μm)	Toleransi $+50\%$ -25%	P Panjang sampel (mm)
N1	1	0.0025	0.02 - 0.04	0.08
N2	2	0.05	0.04 - 0.08	
N3	4	0.1	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	0.0 - 1.2	0.8
N7	63	1.6	1.2 - 2.4	
N8	125	3.2	2.4 - 4.8	
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	37.5-50.0	8

Toleransi harga kekasaran rata-rata, R_a 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 2.3 berikut ini memberikan contoh harga kelas kekasaran rata-rata menurut proses pengerjaannya.

Tabel 2.3 Tingkat kekasaran rata-rata permukaan menurut proses pengerjaannya

Proses Pengerjaan	Selang (N)	Harga R_a
Flat and cylindrical lapping,	$N_1 - N_4$	0.025 - 0.2
Superfinishing Diamond turning	$N_1 - N_6$	0.025 - 0.8
Flat cylindrical grinding	$N_1 - N_8$	0.025 - 3.2
Finishing	$N_4 - N_8$	0.1 - 3.2
Face and cylindrical turning, milling and reaming	$N_5 - N_{12}$	0.4 - 50.0
Drilling	$N_7 - N_{10}$	1.6 - 12.5
Shapping, planning, horizontal milling	$N_6 - N_{12}$	0.8 - 50.0

Sanacasting and forging	$N_{10} - N_{11}$	12.5 - 25.0
Extruding, cold rolling, drawing	$N_6 - N_8$	0.8 - 3.2
Die casting	$N_6 - N_7$	0.8 - 1.8

Kekasaran (*roughness*) suatu produk permukaan permesinan dapat mempengaruhi beberapa fungsinya, antara lain gesekan permukaan (*surface friction*), perpindahan panas, kemampuan penyebaran pelumasan. Dimana semakin halus kekasaran permukaan semakin kecil gesekan yang terjadi dan juga semakin halus kekasaran permukaan semakin merata penyebaran perpindahan panasnya, begitu juga halnya dengan penyebaran pelumasan. Oleh karena itu, kekasaran permukaan menjadi tolak ukur mutu permukaan dari proses manufaktur. Parameter pemotongan dan geometri benda kerja akan mempengaruhi hasil dari proses pembubutan. Kekasaran permukaan sangat menentukan nilai dari kualitas suatu produk. Pemilihan parameter pemotongan yang tepat dan geometri benda kerja yang baik menjadi faktor penentu untuk mendapatkan kekasaran permukaan yang baik (Sabil dkk, 2017).

2.5 Minitab

Minitab adalah program computer yang dirancang untuk melakukan pengolahan statistic. Minitab mengkombinasikan kemudahan penggunaan layaknya Microsoft excel dengan kemampuannya melakukan analisis statistic yang kompleks. Minitab mempunyai dua layar primer, yaitu *worksheet*

(lembar kerja) untuk melihat dan mengedit lembar kerja serta sesi *command* yang merupakan layar untuk menampilkan hasil (minitab)

Minitab memiliki keunggulan dari pengolahan data statistic, misalnya analysis of variance, disain eksperimen dan lain-lain. Minitab dapat membuat grafik statistic secara mudah dan dalam bentuk lebih informative.

2.5.1 Full Factorial

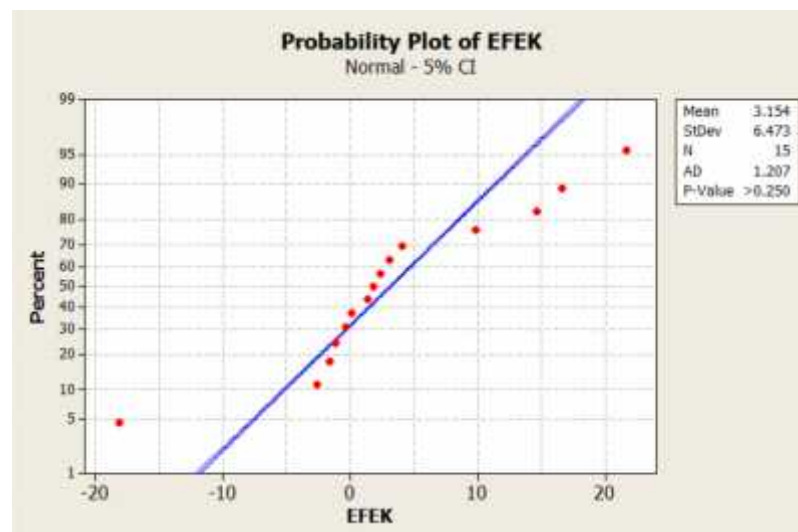
Percobaan full factorial merupakan metode perancangan setiap kombinasi factor percobaan yang diuji cobakan pada tingkat atau level yang berbeda-beda. Metode ini memiliki keuntungan karna hasil yang didapatkan akan lebih akurat karena setiap kombinasi faktor diuji cobakan. Akan tetapi, metode ini pun memiliki kelemahan seperti waktu yang diperlukan serta biaya yang dikeluarkan akan besar dengan menjalankan semua kombinasi faktor (Putra, 2010).

Percobaan terdiri atas k buah faktor, dimana faktornya terdiri dari 2 level sehingga dinamakan percobaan faktorial L^k atau 2^k . Rancangan percobaan yang terdiri atas 5 faktor seperti A, B, C, D dan E, dimana setiap faktor terdiri dari 2 level. Sehingga rancangan percobaan dapat ditulis dengan faktorial 2^5 dengan banyaknya kombinasi percobaan $2^5 = 32$. Untuk mengetahui informasi mengenai faktor dan interaksi mana yang berpengaruh dilakukan estimasi *analyze factorial design* dan menguji signifikansinya (Tantri, 2015).

2.5.2 Analyze Factorial Design

Analyze factorial design merupakan analisis yang dapat digunakan dengan *Design of Experiment* (DOE) menggunakan metode *full factorial*. Dimana analisis merupakan tindak untuk memperoleh hasil yang terbaik juga dapat didefinisikan sebagai proses untuk menentukan kondisi yang memberikan nilai minimum atau maksimum.

Analyze factorial design dapat menampilkan parameter mana yang berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon dan juga menampilkan apakah data terdistribusi secara normal dengan menggunakan grafik probality plot



Gambar 2.7 Normal Probability Plot Efek

Pada Gambar 1 terlihat terdapat titik-titik yang berada pada sekitar garis yang menunjukkan nilai efek perlakuan. Apabila nilai efek berada jauh dari garis normal atau nilai efek berada di luar limit konfidensi (*upper bound* dan *lower bound*) dari interval konfidensi yang ditentukan dan

bukan berada di sekitar rata-rata nol, maka efek tersebut berpengaruh. Untuk mengestimasi efek atau menghitung jumlah kuadrat dari efek.

2.6 Teori

Teori dalam kamus besar bahasa Indonesia (KBBI) adalah pendapat yang dikemukakan sebagai keterangan mengenai suatu peristiwa atau kejadian, azas dan hukum umum yang menjadi dasar suatu kesenian atau ilmu pengetahuan, dan pendapat/cara/aturan untuk melakukan sesuatu. Definisi teori dapat berbeda-beda menurut pandangan kalangan ahli teori berdasarkan pada bidang-bidang pengetahuan serta tergantung pada metodologi dan konteks diskusi. Teori dapat diuji, dirubah, atau digunakan sebagai pemandu riset atau sebagai dasar evaluasi, menguji suatu gagasan umum, kemudian melakukan tindakan khusus untuk menarik suatu kesimpulan khusus.

Pengertian teori secara umum adalah analisis hubungan antara fakta yang satu dengan fakta yang lain pada sekumpulan fakta-fakta yang disusun secara sistematis, logis (rasional), empiris (kenyataan), juga simbolis dalam menjelaskan suatu fenomena. Teori diperlukan agar peneliti mengerti dan memahami cara menjelaskan atau menganalisis fenomena yang terjadi berdasarkan sebuah alur pikir teori penelitian tertentu (Satria,2016).

Pengertian teori menurut beberapa ahli :

1. Teori adalah sebuah proses mengembangkan ide-ide membantu kita menjelaskan bagaimana dan mengapa suatu peristiwa terjadi –
Jonathab H. Turner
2. Teori merupakan sebuah system konsep yang abstrak dan hubungan-hubungan konsep tersebut yang membantu kita untuk memahami sebuah fenomena – Little John dan Karen Foss
3. Teori adalah konsep-konsep yang berhubungan satu sama lainnya yang mengandung suatu pandangan sistematis dari suatu fenomena –
Kerlinger
4. Teori adalah pendapat yang dikemukakan sebagai keterangan mengenai suatu peristiwa atau kejadian – Nazir
5. Teori adalah sekumpulan konsep yang ketika dijelaskan memiliki hubungan dan dapat diamati dalam dunia nyata – King
6. Teori adalah seperangkat asumsi dan kesimpulan logis yang mengaitkan seperangkat variabel satu sama lain. Teori akan menghasilkan ramalan-ramalan yang dapat dibandingkan dengan pola-pola yang diamati –
Manning.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

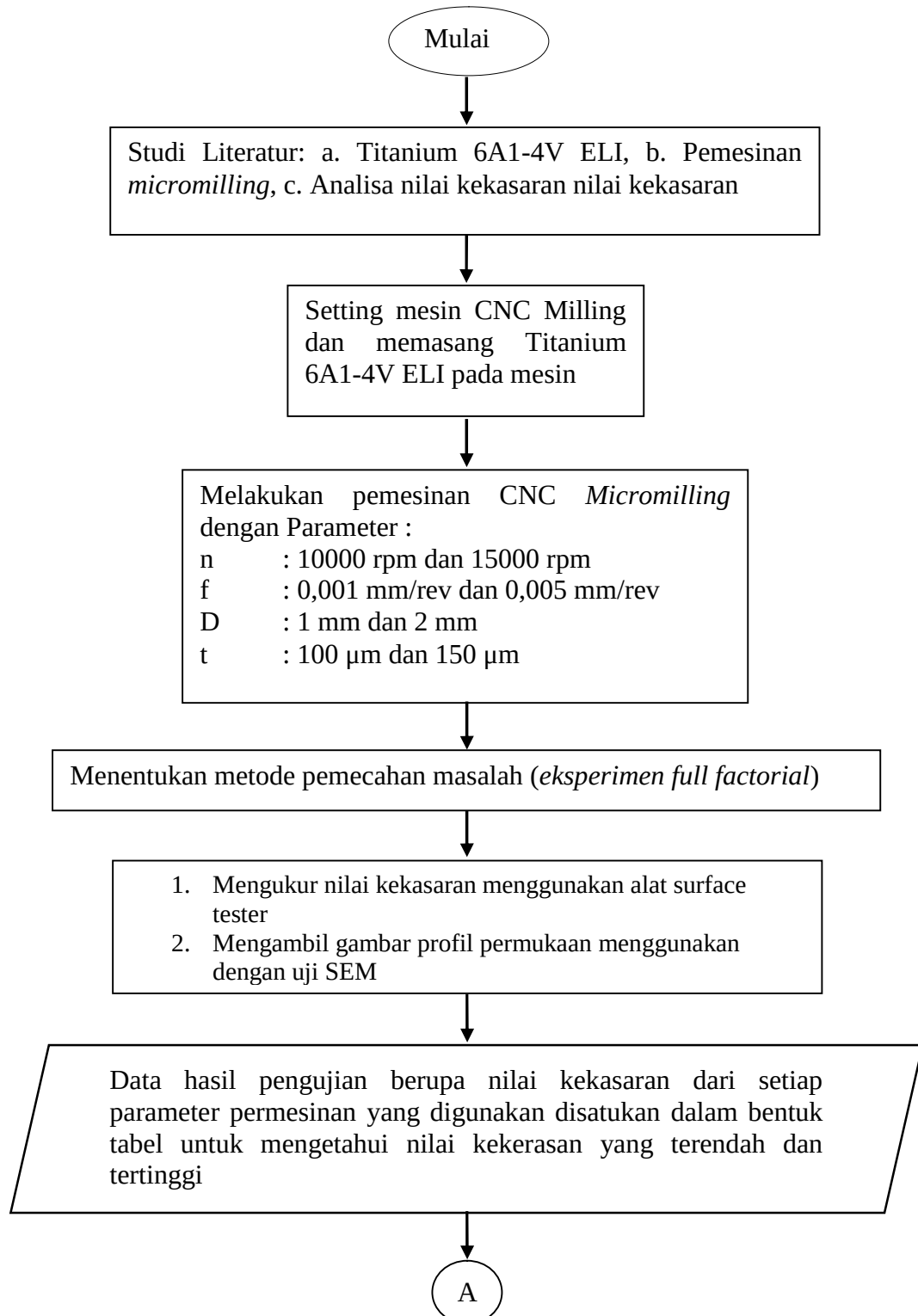
Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode *full factorial* untuk mengetahui parameter setiap kombinasi parameter yang diuji. Terlebih dahulu disiapkan 16 material yang termasuk didalam dua level dan empat faktor. Mengambil data dilakukan berdasarkan rancangan percobaan *full factorial* yang kemudian di analisis dengan menggunakan *Analyze factor design*.

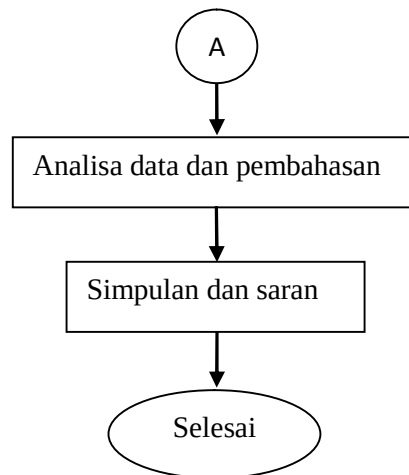
3.2 Waktu dan tempat penelitian

Penelitian dilakukan selama 6 bulan terhitung dari bulan Februari 2019 sampai dengan bulan Juli 2019. Proses pengujian dilakukan di Laboratorium Teknologi Mekanisasi Pertanian Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor (POLBANGTAN), pengambilan data dilakukan di Laboratorium Metrologi Fakultas Teknik Universitas Lampung dan UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung.

3.3 Alur Penelitian

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





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.4 Alat dan Baham Penelitian

3.4.1 Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Leptop

Leptop yang digunakan pada penelitian ini sebagai tempat pengolahan data dengan menggunakan *software* minitab 17.

2. Mesin CNC *Milling* 4060 Router

Mesin CNC *milling* 4060 router merupakan mesin yang mampu melakukan banyak pekerjaan bila dibandingkan mesin perkakas yang lain. Pahat Proses penyayatan benda kerja menggunakan pahat potong dengan mata potong yang berputar. Proses penyayatan dengan mata potong yang mengitari pahat ini bisa menghasilkan proses pemesinan lebih cepat. Permukaan yang

disayat bisa berbentuk datar, menyudut, atau melengkung sesuai dengan dimensi yang dikehendaki.

Mesin CNC *milling* router dimana mesin dikendalikan langsung oleh monitor yang telah di install dengan aplikasi yang mendukung pada alat tersebut. Rhinoceros merupakan salah satu aplikasi yang digunakan pada mesin *milling* 4060 router yang berfungsi untuk membuat atau menggambar alur yang diinginkan. Setelah alur atau gambar yang diinginkan selesai selanjutnya menggunakan aplikasi mach3 loader.

Mach3 Loader merupakan aplikasi langsung yang terhubung ke mesin cnc *milling* 4060 router. Dengan mach3 loader program dapat di *setting* sesuai dengan parameter yang diinginkan seperti kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong.



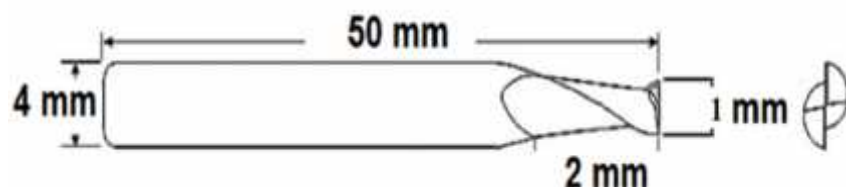
Gambar 3.2 Mesin CNC *Micro-milling*

Tabel 3.1 Spesifikasi mesin CNC *Milling Router*

Model	4 Axis CNC Router
Daerah kerja	400 x 600
Reposisi Akurasi	$\pm 0.01\text{mm}$
Kecepatan putaran Spindle	25000 rpm
Berat bersih	500

3. Pahat Frais Karbida

Pahat frais karbida memiliki sifat yang tahan terhadap pengikisan (abrasi). Karbida merupakan material yang kaku di mana pahat frais karbida dapat dipakai untuk menyayat benda kerja yang terbuat dari material yang keras. Pahat frais karbida bisa dipakai pada kecepatan tinggi dengan keausan lebih sedikit sehingga dalam jangka panjang pahat frais dari material karbida lebih ekonomis. Pada saat penelitian ini pahat frais karbida dipasangkan pada penjapit pahat yang terdapat pada mesin cnc 4060 router, gerak makan yang dihasilkan pada pahat ini terlebih dahulu telah disetting apa mach3 loader. Sehingga menghasilkan alur atau gambar yang telah ditentukan. *System* kerja pahat ini pun dibuat bolak balik pada prosesnya.



Gambar 3.3 Dimensi Pahat Karbida

Adapun spesifikasi pahat potong karbida yang digunakan pada proses penelitian adalah sebagai berikut :

Tabel 3.2 Spesifikasi pahat karbida

Spesifikasi Pahat	Keterangan
Jenis	<i>Karbida end mill</i>
Bahan	Karbida
Diameter	1 dan 2 mm
Jumlah <i>Flute</i>	4
Material	<i>Solid Karbida</i>
Diameter Batang	6 Mm

4. *Surface tester*

Alat ini berfungsi untuk mengukur kekasaran dari suatu permukaan dengan ketelitian alat 0.01 μm . Pengukuran kekasaran permukaan diperoleh dari sinyal pergerakan stylus berbentuk diamond yang bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan sebagai indikator pengukur kekasaran benda uji. Prinsip kerjanya adalah dengan menggunakan *transducer* dan diolah dengan mikroprosesor (alatuji.com).

Surface tester dapat digunakan dengan cara meletakkan benda uji (berupa metal blok) dial indicator (berupa jarum) diatur sehingga ujung dari dial indicator berada dalam posisi stabil (di tengah skala). Pembacaan tekanan terhadap permukaan objek pengukuran. Pada saat pengambilan data, posisi dial indicator bergerak dengan konstan sesuai dengan sumbu horizontal dan sejaja benda uji (berada pada garis lurus).

Gambar dan spesifikasi alat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan Tabel 3.3.



Gambar 3.4 *Surface tester*

Tabel 3.3 Spesifikasi *surface tester*

Merk	Mitutoyo SJ-210
Pabrikasi	Japan
Ketelitian	0,01 μm

5. Mesin uji *Scanning ElectroMagnetic* (SEM)

Mesin *Scanning ElectroMagnetic* (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang mencitrakan permukaan sampel oleh pemindaian dengan pancaran tinggi elektron. Mesin digunakan untuk mengetahui informasi-informasi mengenai Topografi, Morfologi, Komposisi, Informasi kristalografi. Prinsip kerja mesin ini yaitu sebuah pistol elektron memproduksi sinar elektron dan dipercepat dengan anoda. lalu lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel. Sinar elektron yang terfokus memindai (*scan*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan

elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (Agung,2017).



Gambar 3.5 Mesin uji *Scanning ElectroMagnetic* (SEM)

Tabel 3.4 Spesifikasi mesin uji *Scanning ElectroMagnetic* (SEM)

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Model	SEM JEOL JSM-6340 F
2	Pembesaran	10 - 3.000.000 kali
3	Depth of field	4 - 0.4 mm
4	Resolusi	1- 10 nm

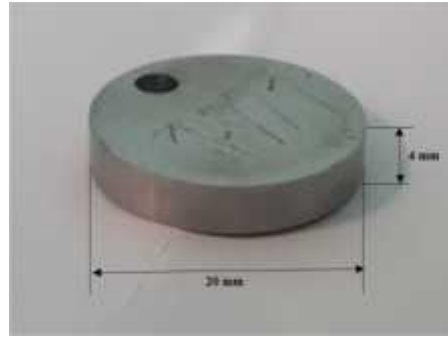
3.4.2 Bahan

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Titanium 6Al-4V ELI

Adapun bahan yang di gunakan dalam penelitian ini adalah

Titanium 6Al-4V ELI bentuk lingkaran. Titanium 6Al-4V ELI merupakan



Gambar 3.6 Titanium 6Al-4V ELI

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

Tabel 3.5. 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
Tensile strength	1050 Mpa/m ²
Compressive strength	Mpa/mm ²
Yield strenght	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
Mass density	4428.78 kg/m ³

(Sumber : Muhammad Rifai, 2018)

3.5 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahapan antara lain sebagai berikut :

3.5.1 Menentukan kondisi pemesinan

Sebelum melakukan penelitian terlebih dahulu menentukan parameter yang digunakan untuk proses *micro-milling*. Parameter yang

digunakan seperti *Feeding* (f), kedalaman potong (t), kecepatan putaran (n) dan diameter pahat. Adapun variasi parameter tersebut yang akan dijadikan penelitian adalah sebagai berikut :

Tabel 3.6 Variasi Parameter Pemesinan

No	Diameter Pisau frais (mm)	kecepatan putar (rpm)	Gerak makan (mm/rev)	Kedalaman potong (μm)
1	1	10000	0,001	100
2	2	15000	0,005	150

Untuk kondisi pemesinan pada proses micromilling adalah sebagai berikut :

Table 3.7 Kondisi Pemesinan

No	Kondisi Pemesinan	Keterangan
1	Pahat	<i>Carbida</i>
2	Benda Kerja	Ti 6Al-4V ELI
3	Kondisi	Tanpa cairan pendingin

Dengan menggunakan metode *full factorial* didapatkan proses pengambilan data dengan susunan sebagai berikut :

Table 3.8 Metode *Full Faktorial*

No	Diameter Pahat (d)	Kecepatan Putaran (n)	Gerak Makan (f)	Kedalaman Potong (p)
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2

3	1	1	2	1
4	1	1	2	2
5	1	2	1	1
6	1	2	1	2
7	1	2	2	1
8	1	2	2	2
9	2	1	1	1
10	2	1	1	2
11	2	1	2	1
12	2	1	2	2
13	2	2	1	1
14	2	2	1	2
15	2	2	2	1
16	2	2	2	2

3.5.2 Melakukan Pemesinan

Melakukan pemesinan dengan parameter pemesinan pada Tabel 3.9

3.5.2.1 Persiapan

Adapun persiapan yang dilakukan sebelum proses *micro-milling* adalah:

Menyiapkan mesin CNC *micro-milling*, benda kerja Ti 6Al-4V ELI, *surface taster* dan pahat *carbide*.

3.5.2.2 Pelaksanaan

Tahapan pelaksanaan proses *micro-milling* adalah sebagai berikut:

1. Melakukan *set up* mesin *micro-milling*

2. Melakukan kalibrasi mesin *micro-milling* pada kondisi parameter pemotongan paling rendah. Missal untuk percobaan pertama dengan *feeding* 0.001 mm/rev, kecepatan putaran 10000 rpm dan kedalaman potong 100 μm . Serta memasang pahat dengan diameter 1 mm (Tabel 3.9)
3. Melakukan proses *micro-milling* untuk percobaan pertama sesuai dengan table 3.9.
4. Melakukan langkah 1 dan 2 sebanyak 16 kali untuk percobaan seterusnya.
5. Setelah proses *micro-milling* selesai material yang digunakan dilakukan pengukuran kekasaran permukaan.
6. Nilai kekasaran permukaan menggunakan yang didapat dilihat ditabel dibawah ini

Table 3.9 Data kekasaran Permukaan

No	Diameter Pahat (mm)	Kecepatan Putaran (n)	Gerak makan (f)	Kedalaman Potong (p)	waktu (s)	Ra1	Ra Rata-Rata
						Ra2	
						Ra3	
1	1	10000	0.005	100			
2	1	10000	0.005	150			
3	1	10000	0.001	100			
4	1	10000	0.001	150			
5	1	15000	0.005	100			
6	1	15000	0.005	150			
7	1	15000	0.001	100			
8	1	15000	0.001	150			
9	2	10000	0.005	100			
10	2	10000	0.005	150			
11	2	10000	0.001	100			
12	2	10000	0.001	150			
13	2	15000	0.005	100			
14	2	15000	0.005	150			
15	2	15000	0.001	100			
16	2	15000	0.001	150			

Sistem kerja alat *Roughness Tester* dengan menggunakan *stylus*. *Stylus* merupakan peraba dari alat ukur kekasaran permukaan yang bentuknya konis atau piramida. Bila *stylus* bergeser maka setiap perubahan yang dialami oleh *stylus* karena permukaan yang tidak halus akan nampak pada peralatan ukurnya karena perubahan ini terekam secara otomatis. Hasil nilai kekasaran

permukaan juga akan tertampil pada tampilan layar yang ada pada alat. Hasil pengukuran akan ditampilkan pada tampilan yang ada pada *traverse unit*. Pengukuran dilakukan dengan 4 kali pada setiap sisi pemesinan. Setelah didapatkan nilai kekasaran permukaan R_1 , R_2 , R_3 dan R_4 dapat diketahui nilai R_a rata-rata dari setiap pengujian.

3.5.3 Analisa Data

Setelah mendapatkan data pada hasil penelitian maka selanjutnya akan dilakukan analisa. Penggunaan *software* Minitab menggunakan metode *full factorial* sehingga didapat parameter pemesinana yang signifikan. Adapun langkah-langkah *analyze factor design* pada *software* Minitab adalah sebagai berikut :

1. Memasukkan data dari variabel yang telah ditentukan pada table 3.9
2. Mendesain model eksperimen *full factorial*
3. Menganalisa hasil output table pada Minitab
4. Mndapatkan grafik normalitas
5. Mendapatkan persamaan model matematika

Setelah data yang didapat diinput kedalam minitab dan diperoleh hasil maka hasil dari penelitian ini dilakukan analisis teoritis dimana analisis teoritis ini bertujuan dimana teori-teori yang telah ada dapat menjadi acuan pada penelitian ini, teori-teori yang ada atau penelitian-penelitian

sebelumnya dapat dibandingkan oleh penelitian ini agar menjadi pandangan dalam penelitian lainnya. Selanjutnya hasil dari proses pengujian SEM dianalisis, dimana hasil dengan parameter yang sama dibandingkan dengan parameter kecepatan putaran sesuai dengan hipotesa dari penelitian ini.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dipaparkan dapat diambil simpulan sebagai berikut :

1. Nilai kekasaran permukaan minimum pada proses pemesinan *micromilling* Ti 6AL-4V ELI adalah sebesar 0,26 μm pada kecepatan putaran (n) 15000 rpm, gerak makan (f) 0,005 mm/rev, kedalaman potong (t) 100 μm dan diameter pahat 2 mm. Sedangkan nilai kekasaran permukaan maksimum adalah sebesar 0,90 μm pada kecepatan putaran (n) 15000 rpm, gerak makan (f) 0,005 mm/rev, kedalaman potong (t) 150 μm dan diameter pahat 1 mm.
2. Pada Analisis dengan menggunakan metode *Analyze Factorial Design*, parameter yang mempengaruhi nilai kekasaran permukaan secara signifikan adalah diameter pahat, dimana nilai signifikannya sebesar 0,000 dan nilai rasio sebesar 22,89% dari total R-sq sebesar 81,79%
3. Model matematika untuk nilai kekasaran permukaan pada pemesinan *micromilling* Ti 6AL-4V ELI adalah :

$$Ra = 0.723 - 0.3050 D + 0.000014 n - 18.1 f + 0.001650 t$$

Prediksi aktual dengan selisish statistik memiliki selisih 0,01 μm atau error yang terjadi hanya 2,1%

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya agar mendapatkan hasil yang lebih baik :

1. Pada penelitian selanjutnya diharapkan untuk mengamati nilai kekasaran permukaan sepanjang pemotongan sehingga agar melakukan pemesinan sampai akhir umur pahat.
2. Pada penelitian ini mesin CNC *milling* yang digunakan memiliki kecepatan putaran maksimal 25000 rpm, dimana kecepatan putaran yang digunakan pada penelitian ini masih terbilang rendah. Diharapkan pada penelitian selanjutnya menggunakan mesin CNC *milling* dengan kapasitas kecepatan putaran yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, J. Bai, Q. Tong, Z. 2018. *Experimental and Multiscale Numerical Investigation of Wearmechanism and Cutting Performance of Polycrystalline Diamond Tools in Micro-End Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.
- Bajpai, V. Kushwaha, A K. Singh, R K. 2013. *Burr Formation and Surface Quality In High Speed Micromilling Alloy (Ti6Al4V)*. Indian Institute of Technology Bombay.
- Baldo, D. Filho, S L M R. Lauro, C H. Delfino, A C S. Brandao, L C. 2014. *Analysis of Surface Roughness in Micro Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy*. Trans Tech Vols 1079-1080 pp 3-6.
- Carou, D. Rubio, E M. Herrera, J. Lauro, C H. Davim, J P. 2017. *Latest Advances in The micromilling of titanium alloys : A Review*. Manufacturing Engineering Society International Conference.
- Filiz, S. Xie, Luke. et al. 2008. *Micromilling of Microbarbs For Medical Implants*. International Jurnal of Machine Tools and Manufacture.
- Donachie, M J. 2000. *Titanium A Technical Guide*. ASM International. Amerika.
- Ibrahim, G A. Che Haron C H. Ghani, J A. 2009. *Surface Integrity of Ti-6AL-4V ELI When Machined Using Coated Carbide Tools Under Dry Cutting Condition*. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. Vol. 4 No. 2, 191-196
- Ibrahim, G A. et al. 2010. *Cutting Force Analysis when Milling Ti-6Al-4V under Dry and Near Dry Conditions using Coated Tungsten Carbides*. Materials Research Vols. 129-131 pp 993-998.

- Ibrahim, Gusri Akhyar. 2014. *Pengaruh Pemesinan Kering Terhadap Kekasaran dan Kekerasan Permukaan Paduan Titanium*. Universitas Lampung. Lampung.
- Ibrahim, G A. Hamni, A. Tarkono. Mutaqqin, M. Su'udi, A. 2018. *Pengaruh Gerak Makan dan Kedalaman Potong Terhadap Kekasaran Permukaan Magnesium pada Pemesinan Freis dengan Teknik MQL*. Prosiding SNTTM XVII
- Ibrahim, G A. Hamni, A. Burhanudin, Y. Nadhira, W. 2019. *Optimization of Cutting Parameters on Tool Wear Using Box Behnken Design*. International Journal of Engineering Technology and Sciences.
- Jing, X. Li, H. Wang, J. et al. 2016. *An Investigation of surface roughness in micro-end-milling of metals*. Australian Journal of Mechanical Engineering.
- Kiswanto, G. Zariatn, D I. Ko, T J. 2014. *The Effect of Spindle Speed, Feed-Rate and Machining Time to The Surface Roughness and Burr Formation of Aluminum Alloy 1100 in Micro-Milling Operation*. Journal of Manufacturing Processes.
- Kurniawan, Muchdy. 2018. *Analisis Kekasaran Permukaan Ddan Getaran Pada Pemesinan Bubut Menggunakan Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tools) Untuk Material Titanium 6Al-4V ELI*. Universitas Lampung. Lampung.
- Leyens, C. dan Peters M. 2003. *Titanium and Titanium Alloys*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- Malekian, M. Park, S S. Jun, M B G. 2009. *Tool Wear Monitoring of Micro-Milling Operations*. Journal of Materials Processing Technologi.
- Montgomery, D.C. 1997. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley and sons. New York
- Rifai, Muhammad. 2018. *Analisis Keausan Pahat Pada Pemesinan Bubut Menggunakan Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tools) Untuk Material Titanium 6AL-4V ELI*. Universitas Lampung. Lampung.

Novriadi, Dwi. 2016. *Rancang Bangun Sistem Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tool System) Untuk Pemesinan Alat Kesehatan Ortopedi*. Universitas Lampung. Lampung.

Pranjono. Kisworo, D. Galuh, B S. Setiawan, I. 2013. *Pengukuran Kekasaran Permukaan Tutup Kelongsong dari Zirkaloi Menggunakan Alat Roughness Tester Surtronic-25*. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir. Batan.

Rahdiyanta, Dwi. 2010. *Materi Kuliah Proses Pemesinan*. Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta.

Siswanto, B. Sunyoto. 2018. *Pengaruh Kecepatan dan Kedalaman Potong pada Proses Pembubutan Konvensional Terhadap Kekasaran Permukaan Lubang*. Universitas Negeri Semarang. Semarang.

Sugiantoro B dan Setiawan K. 2015. *Pengaruh Parameter Permesinan Pada Proses Milling Dengan Pendinginan Fluida Alami (Cold Natural Fluid) Terhadap Kekasaran Permukaan Baja St 42*. STT Wiworotomo Purwokerto. Purwokerto.

Sugiantoro, B. Adialfian, R. Setiawan, K. 2015. *Optimasi Parameter Proses Mesin 3 Axis (Milling) dengan Aplikasi (dry dan MQL Cold Fluid Cooling) Terhadap Kualitas Pemesinan Baja ST 60*. STT Wiworotomo. Purwokerto.

Tantri, Gian Kusuma Diah. 2015. *Analisis Desain Faktorial Fraksional 2^{k-p} dengan Metode Lenth*. Jurnal Gaussian Volume 4 Nomor 3.

Tschatsch, H. (2009). *Applied machining technology*. Dresden: Springer.

Syaifullah, Herry. 2015. *Analisis Tingkat Kekasaran Permukaan Hasil Proses Milling Pada Baja Karbon S45c Dengan Metode 3^3 Desain Faktorial*. Politeknik Manufaktur Astra. Volume 6 Nomer 2.

Uhlmann, E. Mewis, J. Baldo, C. Tamborlin, M. et al. 2017. *Virtual Machining of Micro-Milling Processes For Prediction of Cutting Forces and Surface Quality*. International Conference on Virtual Machining Process Technology.

Wang, W. Kweon, S H. Yang, S H. 2005. *A Study on Roughness of The Micro-End-Milled Surface Produced By A Miniature Machine Tool*. Journal of Materials Processing Technology.