

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN TERHADAP KEAUSAN PAHAT
KARBIDA PADA PEMBUATAN ULIR KORTIKAL
BAHAN TI-6AL-4V ELI**

Tesis

Oleh

YULIUS RIANSA PRIYUSDITO



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN TERHADAP KEAUSAN PAHAT KARBIDA PADA PEMBUATAN ULIR KORTIKAL BAHAN TI-6AL-4V ELI

Oleh

Yulius Riansa Priyusdito

Titanium dan paduannya adalah material ringan yang umum dipakai karena memiliki rasio kekuatan dan berat yang bagus serta sifat ketahanan terhadap korosi yang tinggi. Selain itu, sifat biokompatibilitas yang baik menunjukkan bahwa titanium sangat cocok digunakan untuk aplikasi biomedis, khususnya dalam pembuatan implan untuk pembedahan tulang. Salah satu implant yang umum digunakan adalah ulir kortikal yang proses pembuatannya dilakukan dengan proses pemesinan bubut ulir dengan menggunakan pahat ulir kortikal. Penelitian ini bertujuan untuk mencari kondisi optimal pemotongan terhadap keausan pahat dengan metode permukaan respon *Box Behnken Design*.

Pemesinan bubut CNC merupakan jenis pemesinan yang dipilih dalam penelitian ini dan material yang digunakan adalah Ti-6Al-4v ELI. Parameter pemesinan yang digunakan adalah kecepatan spindle 100, 200, dan 300 rpm, sedangkan kedalaman potong sebesar 0,01, 0,02, dan 0,03 mm, dengan kondisi pemesinan kering, dengan pelumas minyak sawit, dan pelumas sintetik. Keausan pahat dapat dilihat melalui mikroskop USB dan progress keausan tepi diukur menggunakan *software Auto CAD* secara berkala setiap 5 menit sampai dengan batas keausan tepi maksimum (VB) tercapai sebesar 0,2 mm, sehingga diperoleh umur pahat maksimal.

Hasil analisis menggunakan *software Design Expert-13* menunjukkan bahwa jenis pelumas dan kuadrat kecepatan potong lebih mempengaruhi parameter respon. Diperoleh kondisi pemotongan optimal untuk variabel putaran spindle 202 rpm, kedalaman potong sebesar 0,015 mm dan pelumas jenis sintetik, menghasilkan umur pahat terbaik sebesar 218,59 menit dengan tingkat desirability 0,968.

Kata kunci : implan tulang, Ti-6Al-4V ELI, keausan pahat, optimasi

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS FOR CARBIDE TOOL WEAR IN THE MANUFACTURING OF TI-6AL-4V ELI CORTICAL THREAD

By

Yulius Riansa Priyusdito

Titanium and its alloys are lightweight materials that are commonly used due to their good strength-to-weight ratio and high corrosion resistance properties. In addition, its good biocompatibility properties indicate that titanium is very suitable for biomedical applications, especially in the manufacture of implants for orthopedic surgery. One of the commonly used implants is cortical thread, the manufacturing process of which is carried out by thread lathe machining using cortical thread tools. This study aims to find the optimal cutting conditions for tool wear using Response surface methodology Box Behnken Design (BBD).

CNC lathe machining is the machining type chosen in this study and the material used is Ti-6Al-4v ELI. The machining parameters used were spindle speeds of 100, 200 and 300 rpm, while the depth of cut was 0.01, 0.02 and 0.03 mm, with dry machining conditions, with palm oil lubricants and synthetic lubricants. Tool wear can be seen through a USB microscope and edge wear progress is measured using Auto CAD software periodically every 5 minutes until the maximum edge wear limit (VB) is reached at 0.2 mm, so that maximum tool life is obtained.

The results of the analysis using the Design Expert-13 software show that the type of lubricant and the square of the cutting speed have more influence on the response parameter. Optimal cutting conditions were obtained for variable spindle rotation of 202 rpm, depth of cut of 0.015 mm and synthetic type lubricant, resulting in the best tool life of 218.59 minutes with a desirability level of 0.968.

Keywords : bone implant, Ti-6Al-4V ELI, tool wear, optimization

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN TERHADAP KEAUSAN PAHAT
KARBIDA PADA PEMBUATAN ULIR KORTIKAL
BAHAN TI-6AL-4V ELI**

Oleh

YULIUS RIANSA PRIYUSDITO

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Tesis : **OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN
TERHADAP KEAUSAN PAHAT KARBIDA
PADA PEMBUATAN ULIR KORTIKAL
BAHAN TI-6AL-4V**

Nama Mahasiswa : **Yulius Riansa Priyusdito**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2125021013

Program Studi : Teknik Mesin

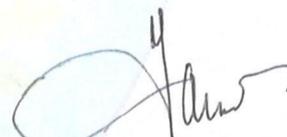
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota



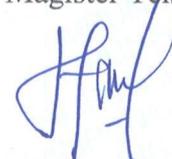
Dr. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.
NIP. 19710817 199802 1 003

Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.
NIP. 19640506 200003 1 001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



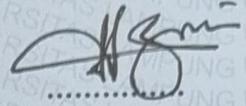
Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 1 003

Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 19690620 200003 1 001

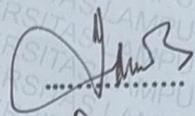
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

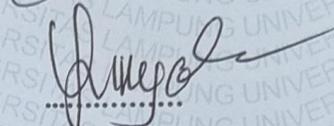
Ketua : **Dr. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.**



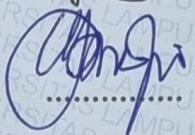
Anggota Penguji : **Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M. T.**



Penguji Utama I : **Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.**



Penguji Utama II : **Prof. M. Badarudin, S.T., M.T., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP.19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. J. Murhadi, M.Si.

NIP.19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: **21 Oktober 2023**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Bandar Lampung, 11 Oktober 2023

Penulis,



Yulius Riansa Priyusdito
NPM 2125021013

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan dari keluarga Bapak Tri Raharjo dan Ibu Yustina Haryani di Bandar Lampung pada tanggal 15 April 1991, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis dibesarkan di Bandar Lampung dengan melalui beberapa jenjang Pendidikan Dasar di SD Fransiskus Tanjungkarang pada tahun 1997 hingga lulus pada tahun 2003. Selanjutnya penulis melanjutkan Pendidikan di SMP Fransiskus Tanjung Karang dan lulus pada tahun 2006. Kemudian Penulis pindah ke Kota Solo, untuk melanjutkan Pendidikan di SMA Regina Pacis Surakarta dan berhasil lulus pada tahun 2009. Untuk Pendidikan Tinggi, Penulis melanjutkan Pendidikan Diploma di Politeknik ATMI Surakarta di jurusan Teknik Mesin Industri, berhasil lulus dan mendapatkan gelar Ahli Madya (A.Md) dengan predikat memuaskan pada tahun 2012.

Setelah itu, penulis memilih melanjutkan karier di dunia Pendidikan dengan menjadi pengajar dan instruktur di Politeknik Sugar Group Companies dan mendapatkan kesempatan melanjutkan Pendidikan ke jenjang S1 Program Ekstensi di Universitas Muhammadiyah Metro pada jurusan Teknik Mesin dan lulus tahun 2015. Pada Tahun 2021, penulis diberi kesempatan melanjutkan Pendidikan Magister Teknik Mesin di Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 11 Oktober 2023

Penulis,

Yulius Riansa Priyusdito
NPM 2125021013

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul “Optimasi Parameter Pemesinan Terhadap Keausan Pahat Karbida Pada Pembuatan Ulir Kortikal Bahan Ti-6al-4v ELI”. Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister di bidang Teknik Mesin. Saya menyadari bahwa tesis ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
3. Dr. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, dan kritik yang sangat berharga bagi penyelesaian tesis ini.
4. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T., selaku dosen pembimbing II yang juga telah memberikan masukan, motivasi, dan koreksi yang sangat membantu bagi penyempurnaan tesis ini.
5. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku ketua program studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan fasilitas dan kemudahan selama saya menempuh pendidikan di program studi ini.

6. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T., selaku dosen penguji I dan Prof. M Badarudin, ST., M.T., Ph.D., selaku dosen penguji II yang telah memberikan masukan dan saran yang konstruktif dalam ujian tesis ini.
7. Bapak AF. Purwadi Santoso, M.Pd. selaku Ketua Yayasan Keluarga Besar Tunas Garuda yang telah memberikan izin dan kesempatan kepada saya untuk menempuh Studi Magister Teknik Mesin di Universitas Lampung.
8. Ayahanda, Ibunda, Istri dan Anak-anak tercinta yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan moral dan materiil, serta pengorbanan yang tidak terhingga bagi keberhasilan pendidikan saya.
9. Teman-teman Program Magister Teknik Mesin Unila Angkatan 2021, dan semua pihak yang telah membantu dan mendukung saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, semoga Tesis ini dapat berguna dan memberikan manfaat dan keaikan bagi kita semua.

Bandar Lampung, 11 Oktober 2023

Penulis,

Yulius Riansa Priyusdito
NPM 2125021013

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan penelitian ini. Penelitian yang berjudul “Optimasi Parameter Pemesinan Terhadap Keausan Pahat Karbida Pada Pembuatan Ulir Kortikal Bahan Ti-6al-4v Eli” disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin dari Universitas Lampung.

Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak akan sulit bagi saya untuk menyelesaikan tugas akhir dari program magister ini. Oleh sebab itu, saya mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu saya dalam penulisan Tesis ini. Meskipun demikian, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi penyempurnaan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya di bidang teknik mesin.

Bandar Lampung, 11 Oktober 2023

Penulis,

Yulius Riansa Priyusdito
NPM 2125021013

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
MENYETUJUI	iv
MENGESAHKAN	v
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Sistematika Penulisan	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Optimasi.....	8
2.2 Pemesinan	8

2.3	Pemesinan Bubut	9
2.3.1	Parameter Proses Pemesinan Bubut.....	10
2.4	Pahat.....	11
2.5	Karbida (<i>Carbide</i>).....	13
2.6	Keausan Pahat	14
2.6.1	Keausan Tepi (<i>Flank Wear</i>)	16
2.6.2	Keausan kawah (<i>Crater Wear</i>).....	17
2.6.3	Mekanisme Keausan Pahat	17
2.7	Sekrup Ulir Kortikal	20
2.8	Proses Manufaktur Ulir.....	23
2.9	Titanium Paduan (Ti 6Al-4V ELI)	23
2.10	Metodologi Permukaan Respon.....	24
2.10.1	Model Orde Pertama	27
2.10.2	Model Orde Kedua.....	28
2.10.3	Box Behnken Design (BBD)	29
III.	METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1	Tempat Penelitian	31
3.2	Waktu Penelitian.....	31
3.3	Alat dan Bahan.....	32
3.3.1	Mesin Bubut CNC.....	32
3.3.2	Pahat Ulir Kortikal.....	33

3.3.3	Mikroskop Digital Dino Lite AM211	34
3.3.4	Stand Mikroskop.....	36
3.3.5	<i>Block Gauge</i>	36
3.3.6	<i>Software Auto CAD</i>	37
3.3.7	<i>Software Design Expert 13</i>	37
3.3.8	Changhua Chen Ying Oil Machine	37
3.3.9	Kompresor Udara.....	38
3.3.10	Material Ti 6AL 4V ELI	39
3.3.11	Pelumas/Cairan Pendingin	40
3.4	Desain Parameter Pemesinan.....	42
3.5	Diagram Alir Penelitian	43
3.6	Prosedur Penelitian	44
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1	Data Hasil Nilai Progres Keausan pada Proses Pemesinan Bubut Ulir Kortikal	51
4.2	Pembahasan.....	53
4.3	Analysis of Variance (ANOVA).....	54
4.4	Model Matematika	58
4.5	Plot Interaksi	59
4.5.1	Analisa Plot Kontur Respon Umur Pahat dengan Pemotongan Kering.....	59

4.5.2 Analisa Plot Kontur Respon Umur Pahat dengan Pelumas Minyak Sawit	61
4.5.3 Analisa Plot Kontur Respon Umur Pahat dengan Pelumas Sintetik	63
4.6 Optimasi Parameter Pemotongan.....	65
4.7 Progres Keausan Pahat.....	67
4.8 Hubungan Keausan Pahat Dengan Kehalusan Permukaan Ulir Kortikal	71
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pemesinan Bubut (Groover, 2010).....	10
Gambar 2. 2 Jenis-jenis keausan pahat (Stephenson and Agapiou, 2006).....	16
Gambar 2. 3 Keausan Tepi Pahat (Astakhov, 2006).....	16
Gambar 2. 4 Keausan Kawah (Astakhov, 2006).....	17
Gambar 2. 5 Evolusi Keausan tepi pada pahat (Astakhov, 2008).....	18
Gambar 2. 6 Sekrup Kortikal (a); Sekrup <i>Cancellous</i> (Patel, 2010).....	20
Gambar 2. 7 Geometri Sekrup Kortikal	21
Gambar 2. 8 Dimensi ulir HA (Rueda, 2018)	22
Gambar 2. 9 Kontur 3D Metode Permukaan Respon	26
Gambar 2. 10 Plot Kontur 3D	26
Gambar 2. 11 <i>Box-Behnken</i> untuk tiga faktor	30
Gambar 3. 1 Mesin Bubut CNC	32
Gambar 3. 2 Pahat Ulir Kortikal	33
Gambar 3. 3 <i>Tool Holder</i>	34
Gambar 3. 4 Mikroskop USB	35
Gambar 3. 5 <i>Stand</i> Mikroskop	36
Gambar 3. 6 <i>Block Gauge Set</i>	37
Gambar 3. 7 <i>Changhua Chen Ying Oil Machine</i>	38
Gambar 3. 8 Kompresor Udara	39
Gambar 3. 9 Paduan Ti-6Al-4V ELI.....	40

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Dimensi <i>screw</i> tipe HA (Rueda, 2018)	21
Tabel 2. 2 Dimensi Ulir tipe HA (Rueda, 2018)	22
Tabel 2. 3 Komposisi Kimia Paduan Ti-6Al-4V (wt%)	24
Tabel 3. 1 Rencana Pelaksanaan Penelitian	32
Tabel 3. 2 Spesifikasi Mesin CNC Feeler FT 350	33
Tabel 3. 3 Mikroskop USB Dinolite AM2111	35
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>Changhua Chen Ying Oil Machine</i>	38
Tabel 3. 5 Desain Parameter Pemotongan	42
Tabel 3. 6 Parameter Penelitian	44
Tabel 3. 7 Parameter Penelitian Box Behnken Design	45
Tabel 3. 8 Tabel Pengukuran keausan tepi pahat	50
Tabel 4. 1 Variasi Parameter	51
Tabel 4. 2 Desain Percobaan Acak dengan bantuan <i>Software Design Expert 13</i> .	52
Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Keausan Pahat Ulir Kortikal	52
Tabel 4. 4 Data Umur Pahat pada VB 0,2 mm (menit)	53
Tabel 4. 5 <i>Fit Summary</i> Umur pahat	55
Tabel 4. 6 <i>Anova</i> Umur Pahat	56
Tabel 4. 7 Kriteria untuk Optimasi Numerik	66
Tabel 4. 8 Solusi Optimasi	66

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Titanium (Ti) dan paduannya merupakan material yang banyak digunakan dalam dunia industri khususnya di bidang industri pesawat dan industri medis. Ketahanan korosi yang baik, ringan dan kuat, modulus elastisitas rendah, biokompatibilitas tinggi serta berat jenis yang rendah, merupakan sifat dasar material titanium yang menjadikannya pilihan utama untuk mendapatkan komponen yang handal serta memiliki daya tahan yang baik (Festas et al., 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, keunggulan paduan titanium sebagai implan dalam bidang biomedis menjadi semakin terlihat karena memiliki sifat dasar yang mendukung biokompatibilitasnya dengan tubuh (Daga et al., 2007). Meskipun sudah banyak digunakan saat ini, namun proses produksi titanium masih sangat sulit. Hal ini tidak lepas dari sifat modulus elastisitasnya yang rendah, yang mengakibatkan torsi gesekan yang dihasilkan tujuh kali lebih besar dibandingkan dengan pemesinan baja karbon murni (Mezentsev et al., 2002).

Penggunaan titanium yang diaplikasikan untuk peralatan medis dapat dilihat dalam proses fiksasi interfragment pada tulang yang patah. Proses ini menggunakan beberapa peralatan ortopedi seperti sekrup, kawat dan pelat logam (Chao et al., 2007). Sekrup tulang merupakan komponen penting dan krusial untuk penyembuhan patah tulang karena ulir akan menopang besarnya beban antara tulang dan harus mengunci tulang agar tulang stabil (Paul & Gefen, 2003).

Jenis desain sekrup yang digunakan untuk implan ortopedi tulang kortikal dikenal sebagai sekrup tulang kortikal sesuai dengan spesifikasi ASTM F543 untuk sekrup medis logam (ASTM, 2002). Sekrup kortikal memiliki ulir halus di sepanjang poros dan dirancang untuk melekat pada tulang kortikal (Uthoff et al., 2006). Sekrup tulang kortikal juga digunakan untuk menempelkan pelat tulang dan perangkat ortopedi lainnya ke tulang. Ketika tulang patah akibat trauma dan benturan, sekrup ini dibutuhkan dan dipakai dua kali untuk menembus bagian luar yang keras, atau korteks, dari tulang panjang seperti femur, tibia, radius, humerus, ulna, dan fibula (Kincaid et al., 2007).

Ada dua metode utama dalam proses manufaktur ulir, yaitu metode pembentukan dan pemesinan. Proses pembentukan dapat memproduksi ulir dengan cepat dalam jumlah banyak, namun tingkat kepresisian yang kurang baik. Sebaliknya, proses pemesinan dapat memproduksi ulir dengan kepresisian yang baik, namun proses pengerjaannya membutuhkan waktu yang lebih lama. Pembuatan sekrup implan tulang dan gigi merupakan salah satu contoh ulir yang dibuat dengan metode pemesinan, karena membutuhkan tingkat kepresisian yang baik (Liao & Chen, 2013).

Dalam aplikasinya, pemanfaatan material untuk keperluan medis seperti penggunaan paduan titanium memerlukan proses manufaktur yang presisi. Beberapa cara untuk mengantisipasi kelemahan titanium pada saat proses pemesinan diantaranya yaitu dengan pemilihan parameter pemotongan yang tepat, pemilihan media pendingin, pemilihan mata pahat dan beberapa usaha lain.

Dogra et al., menegaskan bahwa proses pemesinan ulir adalah sebuah proses yang harus dipersiapkan secara hati-hati dengan memperhatikan parameter

alat yang digunakan. Kerusakan pahat, keausan, dan kerusakan benda kerja dapat menimbulkan kerugian secara materi akibat penggantian pahat secara terus menerus serta kerugian akibat hilangnya waktu produksi (Dogra et al., 2002).

Dalam penelitiannya (Bagherzadeh & Budak, 2018) menyatakan bahwa, umumnya beberapa mekanisme keausan pahat, baik abrasive, adhesif, flaking, maupun delaminasi terjadi secara bersama-sama dan saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga memperburuk kondisi retakan yang ada. Oleh karena itu, keausan pahat harus dikontrol karena dapat mempengaruhi parameter proses, seperti suhu, daya, dan gaya potong (Zawada-Tomkiewicz et al., 2021).

Zareidoost dkk, dalam penelitiannya menyampaikan bahwa kualitas permukaan komponen yang dibuat untuk digunakan dalam perangkat medis dan implan ortopedi, menentukan kompatibilitas dan osseointegrasinya dengan pemilikinya (Zareidoost et al., 2012), maka mengontrol parameter pemesinan, kondisi pahat potong dan kondisi pemesinan sangat penting untuk mencapai nilai kekasaran yang diinginkan dan dengan demikian akan menjamin kualitas komponen pemesinan yang dihasilkan (Mhamdi et al., 2012).

Banyak penelitian dikembangkan untuk mengoptimasi kemampuan pemesinan titanium. Beberapa faktor penting yang perlu dipertimbangkan antara lain parameter pemesinan, getaran, jenis pahat/sisipan pemotong yang digunakan dan juga mekanisme penyaluran cairan pendingin. Keausan pahat dianggap sebagai salah satu masalah utama saat pemesinan paduan titanium. Alat yang aus dapat berdampak buruk pada kualitas permukaan dan akurasi dimensi komponen mesin. Oleh karena itu, maka perlu dinilai secara ketat untuk keausan kritis dan penggantian, yang mengarah pada pengurangan waktu siklus pemesinan.

Ibrahim dkk (2022), melakukan studi eksperimental untuk menganalisa korelasi parameter pemesinan terhadap tingkat kesalahan pitch, sudut ulir, dan jarak puncak ulir. Dalam penelitiannya dilaporkan bahwa parameter pemesinan berpengaruh terhadap kepresisian jarak puncak dan sudut ulir. Kecepatan spindle dan jenis pelumas menjadi faktor yang paling berpengaruh terhadap kesalahan jarak puncak ulir (Ibrahim dkk., 2022).

Yahya (2022), dalam penelitiannya juga membahas tentang Optimasi parameter pemesinan terhadap kepresisian geometri baut ulir kortikal pada material Ti-6Al-4V ELI, menggunakan metode *Grey Relational Analysis*. Penelitian ini menggunakan pemesinan bubut CNC dengan parameter pemesinan yang digunakan adalah putaran spindle 100, 200, dan 300 rpm, *depth of cut* sebesar 0,01, 0,02, dan 0,03 mm, dan pelumas yang digunakan adalah minyak sintesis, virgin palm oil, dan virgin coconut oil. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kombinasi kondisi pemotongan optimal untuk memperoleh kepresisian geometri ulir yang baik diperoleh pada putaran spindle 100 rpm, *depth of cut* 0,01 mm, dan pelumas berjenis virgin coconut oil.

Berdasarkan beberapa tinjauan literatur dan fakta penelitian di atas, maka penulis menyimpulkan bahwa titanium dapat digunakan dalam aplikasi implan medis khususnya implan tulang seperti baut ulir kortikal karena titanium memiliki sifat yang tidak reaktif terhadap jaringan tubuh manusia. Selain itu penelitian tentang pembuatan ulir kortikal dengan menggunakan metode pemesinan menunjukkan bahwa pemilihan parameter pemesinan berpengaruh terhadap kepresisian geometri dan kualitas ulir. Namun studi eksperimental tentang pengaruh parameter pemesinan pembuatan ulir kortikal terhadap keausan belum

banyak dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini akan mengkaji lebih dalam tentang pengaruh kecepatan spindle, kedalaman pemakanan dan jenis pelumas yang digunakan dalam pembuatan ulir kortikal terhadap keausan pahat untuk memperoleh parameter pemesinan yang optimal dengan metode permukaan respon Box Behnken Desain (BBD).

1.2 Tujuan

Dari latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penelitian ini akan memfokuskan kegiatan penelitian dengan tujuan:

1. Melakukan optimasi parameter pemesinan yang berpengaruh terhadap keausan dan umur pahat karbida menggunakan Metode Permukaan Respon *Box Behnken Design*
2. Melakukan analisa progress keausan pahat karbida selama pembuatan ulir kortikal

1.3 Batasan Masalah

Karena banyaknya permasalahan pada penelitian ini, maka penulis membuat batasan masalah agar mendapatkan hasil yang lebih terarah. Adapun batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada beberapa karakteristik spesifik pada ulir kortikal.
2. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah Titanium paduan tipe Ti 6Al-4V ELI.
3. Proses pemesinan dilakukan dengan menggunakan mesin bubut CNC.
4. Pahat yang digunakan yaitu insert karbida.
5. Geometri pahat sesudah diasah diasumsikan seragam.

6. Perancangan dan pengolahan data eksperimen menggunakan metode permukaan respon *Box Behnken Design* (BBD)

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematis penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memuat teori mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian dasar dasar pemesinan titanium, baut ulir kortikal, parameter pemesinan, keausan pahat, dan penelitian terbaru terkait optimasi parameter pemesinan dan keausan pada material paduan titanium.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini terdiri atas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan penelitian, prosedur pengujian, dan cara menganalisa data.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan hasil dan pembahasan dari data data yang diperoleh saat pengujian dilaksanakan.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi hal hal yang dapat disimpulkan dan saran saran yang ingin di sampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Optimasi

Optimasi adalah proses mencari solusi optimal yang memenuhi fungsi tujuan yang ditentukan, dengan mempertimbangkan batasan-batasan yang ada, dan dengan mengevaluasi dampak dan ketercapaian dari setiap pilihan keputusan (Zukhruf, 2021). Permasalahan optimasi yang dapat dimodelkan dengan persamaan matematika berkembang sangat cepat karena sangat berkaitan dengan permasalahan nyata manusia. Beberapa ciri utama dari permasalahan yang memerlukan optimasi adalah adanya banyak kombinasi pilihan keputusan, tujuan spesifik yang biasanya dirumuskan sebagai indikator kinerja, dan kemampuan untuk disederhanakan dan direpresentasikan dengan model matematika.

Permasalahan optimasi yang diformulasikan dengan model matematika biasa disebut sebagai optimasi matematika. Secara terminologi, optimasi matematika adalah proses yang menggabungkan seni dan sains untuk mencari dan menentukan solusi optimal dari suatu permasalahan optimasi matematika yang memiliki fungsi tujuan dan fungsi kendala yang sudah ditentukan sebelumnya (Snyman, J.A., 2006).

2.2 Pemesinan

Pemesinan merupakan serangkaian proses yang digunakan untuk mengubah bentuk dari benda kerja dengan cara memotong menggunakan alat potong yang dipasang pada suatu mesin perkakas. Dalam proses pemesinan, selalu melibatkan gerakan relatif antara benda kerja dengan pahat/alat potong. Gerakan

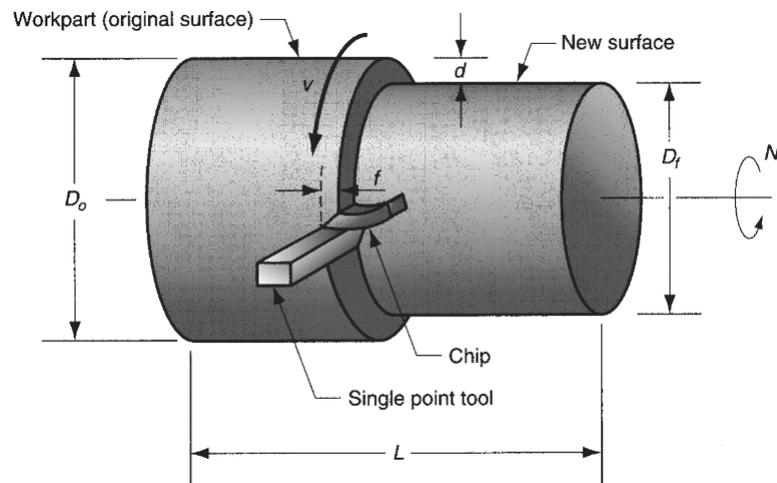
ini terdiri dari gerakan primer yang disebut kecepatan potong, dan gerakan sekunder yang disebut kecepatan pemakanan. Kombinasi antara bentuk pahat dan penetrasinya ke permukaan benda kerja, dengan gerakan-gerakan tersebut akan menghasilkan geometri yang diinginkan dari permukaan benda kerja yang dihasilkan. Benda kerja dipotong secara kontinu oleh pahat untuk menghasilkan produk sesuai spesifikasi yang ditetapkan. Selain itu, membentuk benda kerja dapat dilakukan dengan memutar benda kerja atau memutar pahat dan pada proses membentuk benda kerja yang datar dilakukan memutar pahat tanpa memutar benda kerja (Groover, 2010).

Selama ini proses pemesinan masih menjadi salah satu proses yang unggul dibandingkan dengan proses pembentukan dan pengecoran karena benda kerja yang dihasilkan lebih presisi. Pemesinan beserta prinsip kerjanya merupakan proses manufaktur dimana benda kerja dibentuk dengan cara membuang atau menghilangkan sebagian material dari benda kerja (Schmid, n.d.). Adapun jenis – jenis proses pemesinan yang banyak digunakan yaitu : proses bubut (*turning*), proses pembuatan lubang (*drilling*), proses menyekrap (*shaping* dan *planing*), proses mengefrais (*milling*), proses menggergaji (*sawing*), dan proses menggerinda (*grinding*) (Groover, 2010).

2.3 Pemesinan Bubut

Pembubutan adalah proses pengolahan material dengan menggunakan alat potong *single point* yang bergerak linier sejajar dengan sumbu putar benda kerja. Geometri silinder yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 2.1. Proses bubut biasanya dilakukan pada mesin perkakas yang disebut mesin bubut, yang

dapat mengatur kecepatan putar benda kerja dan gerakan alat potong sesuai dengan kecepatan dan kedalaman potong yang diinginkan (Groover, 2010).



Gambar 2. 1 Pemesinan Bubut (Groover, 2010)

2.3.1 Parameter Proses Pemesinan Bubut

Ada beberapa parameter utama yang harus diperhatikan pada proses pemesinan bubut, yaitu:

1. Kecepatan Potong

Kemampuan alat potong menyayat bahan dengan aman dalam satuan panjang per waktu (misalnya meter per menit atau feet per menit). Kecepatan potong dipengaruhi oleh material benda kerja, material alat potong, diameter alat potong, kehalusan permukaan yang diinginkan, kedalaman potong, dan rigiditas benda kerja dan mesin.

2. Kecepatan Pemakanan (f)

Rasio gerak benda kerja terhadap gerak putar alat potong dalam satuan panjang per putaran (misalnya milimeter per putaran atau inch per putaran). Kecepatan pemakanan dipengaruhi oleh kedalaman pemakanan, tipe alat potong, bentuk alat potong,

material benda kerja, kekuatan dan keseragaman benda kerja, dan kekasaran permukaan yang diharapkan.

3. Waktu Pemotongan

Lama waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses pemotongan pada benda kerja. Waktu pemotongan dipengaruhi oleh panjang pemotongan, kecepatan pemakanan, dan putaran spindle

4. Kedalaman Potong

Jarak antara permukaan benda kerja sebelum dan sesudah dipotong. Kedalaman potong dipengaruhi oleh material benda kerja, material alat potong, diameter alat potong, kehalusan permukaan yang diinginkan, kecepatan potong, dan rigiditas benda kerja dan mesin

5. Kecepatan menghasilkan chip

Laju pembentukan chip atau geram dari proses pemotongan. Kecepatan menghasilkan chip dipengaruhi oleh kecepatan potong, kecepatan pemakanan, kedalaman potong, dan jumlah gigi atau mata potong pada alat potong (Rahdiyanta).

2.4 Pahat

Pahat merupakan alat yang dipasang pada suatu mesin perkakas, berfungsi memotong benda kerja atau mengubah benda kerja menjadi bentuk geometri yang diinginkan. Pada proses pengerjaan logam (*metal working*) pahat digunakan untuk memotong material-material keras sehingga dalam aplikasi tersebut suatu pahat membutuhkan karakteristik sebagai berikut:

1. *Hot hardness* (keras pada temperatur tinggi) sehingga dengan sifat ini kekerasan, kekuatan dan ketahanan aus dapat dipertahankan pada suhu yang dihadapi saat proses pemesinan.
2. *Toughness and impact strength* (sifat tahan terhadap beban kejut) dengan sifat ini beban impak pada proses pemotongan yang tidak diperhitungkan atau gaya akibat getaran dan *chatter* pada proses pemesinan tidak akan merusak pahat.
3. *Thermal shock resistance* (tahan terhadap perubahan temperatur secara tiba-tiba) hal ini diperlukan untuk menahan siklus laju perubahan temperatur.
4. *Wear resistance* (tahan aus) dengan ketahanan aus yang baik kriteria umur pahat dapat diterima sebelum pergantian diperlukan.
5. *Chemical stability* (stabilitas kimia) berhubungan dengan material yang di mesin maka untuk meminimalisir efek samping, adhesi dan difusi geram yang memiliki kontribusi pada keausan pahat.

Untuk mencapai persyaratan diatas berbagai pahat potong dengan sifat mekanik, fisik dan kimia telah dikembangkan selama bertahun-tahun seperti terlihat pada Tabel 2.1 Sifat yang terdapat pada kolom pertama misalnya berguna untuk menentukan karakteristik pahat terhadap aplikasi tertentu (Schmid, n.d.). Sebagai contohnya yaitu:

1. Kekerasan dan kekuatan penting agar mampu menahan respon material yang akan diproses pemesinan.
2. Ketahanan impak penting biasanya terjadi pada pahat yang digunakan dalam penyayatan seperti pahat yang digunakan pada mesin milling.

3. Titik leleh perlu diketahui pada sebuah pahat dimana hal ini akan mempengaruhi pahat saat temperature naik pada zona pemotongan.
4. Sifat fisik seperti konduktivitas termal dan koefisien ekspansi perlu diketahui agar suatu pahat tahan terhadap kelelahan termal dan kejutan.

2.5 Karbida (*Carbide*)

Karbida ditemukan pada tahun 1923 merupakan material pahat yang dibuat dengan memadukan serbuk karbida (nitrida, oksida) dengan bahan pengikat Cobalt (Co). Melalui proses *carbolising* (Groover, 2010) material dasar penyusun pahat (serbuk) Tungsten/Wolfram (W), Titanium (Ti), Tantalum (Ta) dibuat menjadi karbida yang kemudian digiling dan disaring. Salah satu atau campuran serbuk karbida tersebut kemudian dicampur dengan bahan pengikat (Co) dan dicetak. Semakin besar persentase cobalt (Co) kekerasan pahat akan menurun dan keuletannya membaik. Ada tiga jenis utama dari pahat karbida yaitu:

1. Karbida Tungsten (WC+Co).

Karbida tungsten merupakan jenis pahat karbida yang digunakan untuk memotong besi cor (*cast iron cutting grade*).

2. Karbida Tungsten Paduan

Merupakan pahat karbida yang digunakan untuk memotong baja (*steel cutting grade*). Karbida tungsten paduan ini ada beberapa macam antara lain:

- a. Karbida Tungsten Murni

Merupakan jenis paling sederhana terdiri dari Karbida Tungsten (WC) dan pengikat (Co) Cobalt. Jenis pahat ini cocok untuk permesinan dimana mekanisme keausan pahat disebabkan oleh proses abrasi

seperti terjadi pada berbagai besi cor, apabila digunakan untuk memotong baja maka akan terjadi keausan kawah yang berlebihan. Untuk pemesinan baja digunakan jenis karbida tungsten paduan.

b. Karbida (WC-TiC+Co)

Pengaruh pemberian dari TiC adalah untuk mengurangi tendensi dari geram untuk melekat pada muka pahat (BUE: *Built Up Edge*) serta menaikkan daya keausan kawah (Rochim, 2007)

c. Karbida (WC-TiC-TaC-Co)

Penambahan material TaC akan menambah efek samping TiC yang menurunkan sifat *Transverse Rupture Strength*, *Hot Hardness* dan *Compressive Strength* yang dipertinggi sehingga ujung pahat tahan terhadap deformasi plastik (Rochim, 2007).

d. Karbida (WC-TaC+Co)

Pengaruh TaC hampir serupa dengan pengaruh TiC, akan tetapi TaC lebih lunak dibandingkan dengan TiC. Jenis ini lebih tahan terhadap *Thermal Shock* cocok digunakan untuk pembuatan alur (Rochim, 2007).

2.6 Keausan Pahat

Keausan pahat adalah hal yang sangat penting dalam pemotongan logam, karena berdampak langsung pada kualitas permukaan dan efisiensi pemesinan. Selain itu keausan alat biasanya digunakan untuk mengevaluasi kinerja alat potong. Banyak penelitian yang dilakukan untuk memahami dan memprediksi keausan alat, namun sebagian besar penelitian ini dianggap sebagai pendekatan empiris terhadap keausan alat. Akibatnya, banyak masalah mendasar belum

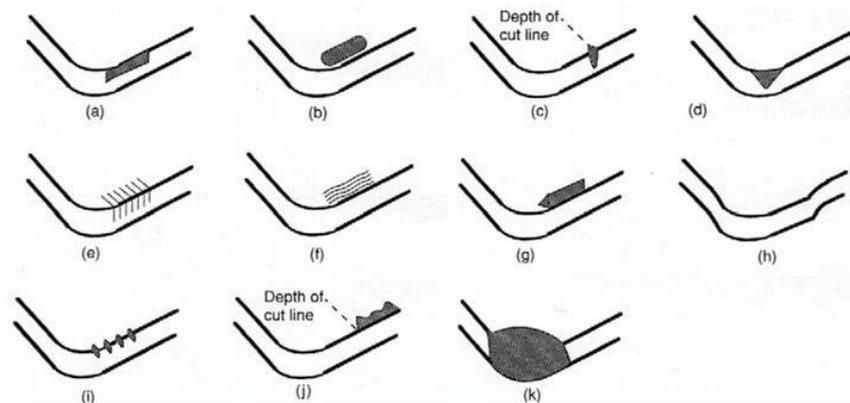
terselesaikan terutama karena kompleksitas berbagai macam faktor di balik keausan alat, antara lain bahan kerja, mesin perkakas, alat potong, pendingin dan kondisi pemotongan.

Oleh karena efek saling kait dari faktor-faktor ini, bentuk *chip*, alat potong, serta bahan kerja memiliki kondisi kontak yang hampir tidak dapat diidentifikasi dengan suhu dan bentuk traksi yang biasa. Selain itu, perilaku termomekanik yang sangat non-linier dari bahan kerja saling berkaitan selama proses pemesinan. Bahkan jika dua masalah ini telah terselesaikan, mekanisme keausan yang tepat tidak akan teridentifikasi dan dijelaskan secara kuantitatif (Olortegui-Yume & Kwon, 2007).

Keausan adalah proses di mana material atau rusak dari satu atau kedua permukaan akibat gerakan relatif yang melibatkan geseran, gulungan atau benturan (Bhushan, 2002). Keausan pahat adalah istilah yang harus dipahami dalam konteks umur pakai pahat dan kegagalan pahat. Umur pakai pahat adalah durasi di mana pahat masih layak untuk digunakan dalam pemotongan logam. Kegagalan pahat adalah kejadian yang menandai berakhirnya masa pakai pahat. Ada 3 indikator pahat dapat mengalami kegagalan, yaitu: retakan kasar, deformasi plastis atau keausan bertahap (Kramer, 1993).

Keausan pahat dapat diklasifikasikan berdasarkan daerah keausan yang terlihat pada pahat potong (Stephenson dan Agapiou, 2006). Dengan demikian, jenis keausan berikut dapat ditemukan pada pahat potong satu titik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2: (a) keausan tepi, (b) keausan cekungan, (c) keausan alur, (d) keausan ujung radius, (e) retak termal, (f) retak sejajar, (g) pembentukan tepi (BUE), (h) deformasi plastis kasar, (i) serpihan tepi, (j) pemukulan serpihan,

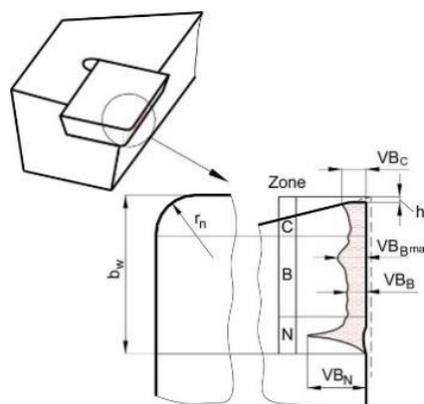
dan (k) patahan kasar. Bentuk dan posisi keausan yang spesifik akan berbeda tergantung pada proses pemesinan.



Gambar 2. 2 Jenis-jenis keausan pahat (Stephenson and Agapiou, 2006)

2.6.1 Keausan Tepi (*Flank Wear*)

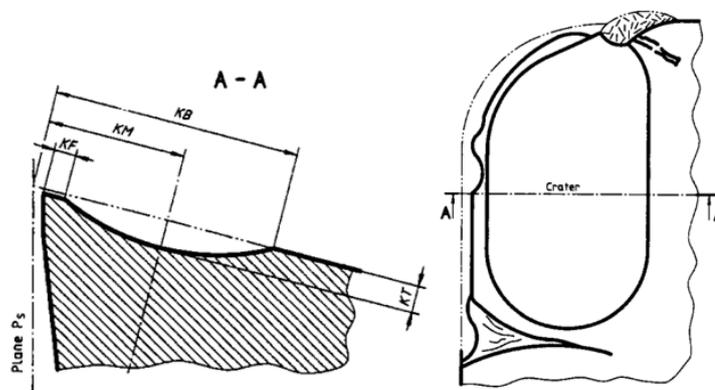
Keausan sisi (*flank wear*) yang dilambangkan dengan VB adalah salah satu bentuk kegagalan pahat. *Flank* adalah sisi muka pahat potong yang berada di tepi sisi potong primer. Keausan ini muncul pada bagian pahat yang bersentuhan langsung dengan material kerja dan menahan gaya pemotongan. Keausan ini dimulai dari tepi sisi potong dan akan terus meluas. Perluasan daerah kontak geram disebut dengan wear land. Keausan Sisi (Astakhov dan Davim, 2006) dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Keausan Tepi Pahat (Astakhov, 2006)

2.6.2 Keausan kawah (*Crater Wear*)

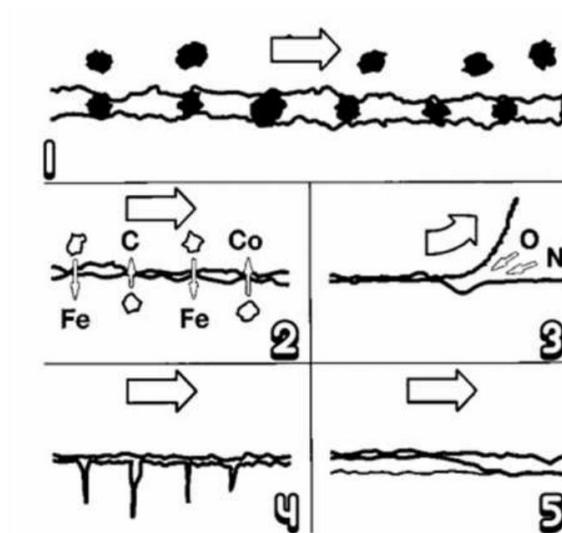
Crater merupakan keausan pahat yang berbentuk seperti lubang atau kawah, biasanya terjadi pada area kontak dengan geram. Jika keausan ini semakin bertambah, kawah menjadi makin lebar, panjang, dan dalam, bahkan bisa mencapai tepi pahat. Timbulnya kawah menyebabkan tepi potong pahat menjadi lemah dan mengalami kerusakan. Keausan kawah ini lebih cepat terjadi pada pahat dengan material ulet, Gambar 2.4 menunjukkan lokasi keausan tersebut (Astakhov dan Davim, 2008).



Gambar 2. 4 Keausan Kawah (Astakhov, 2006)

2.6.3 Mekanisme Keausan Pahat

Secara umum mekanisme keausan pahat dapat dilihat pada Gambar 2.5 yaitu: (1) Abrasi, (2) Difusi, (3) Oksidasi, (4) Lelah, and (5) Adesi. Sebagian penulis menjelaskan bahwa mekanisme keausan pahat akan meningkat dengan bertambahnya kecepatan pemotongan yang lebih tinggi dan naiknya temperatur pemotongan (Trent, 2000).



Gambar 2. 5 Evolusi Keausan tepi pada pahat (Astakhov, 2008)

1. Adesif

Keausan adesif adalah fenomena keausan yang terjadi ketika sebagian dari satu permukaan terlepas dan menempel pada permukaan lain yang saling bergesekan, karena adanya gaya perekat yang besar antara atom-atom yang berdekatan (Rabinowicz, 1995). Berdasarkan berbagai eksperimen, Rabinowicz (1995) menyusun hukum-hukum keausan adesif yang menyatakan bahwa keausan berbanding lurus dengan beban antara permukaan yang berinteraksi dan jarak luncur, namun berbanding terbalik dengan kekerasan material yang mengalami keausan. Keausan adesif menyebabkan perubahan pada bentuk awal daerah pemotongan dan mengurangi umur alat. Hal ini membutuhkan penelitian lebih lanjut tentang pembentukan lapisan yang direkatkan dan dampaknya terhadap sifat permukaan awal. Material yang melekat pada sisi flank dan rake alat selama proses pemesinan menunjukkan keterkaitan langsung dengan kondisi

pemotongan, yang ditentukan oleh parameter laju pemakanan, kecepatan potong, dan kedalaman potong (Ponce, 2019).

2. Abrasif

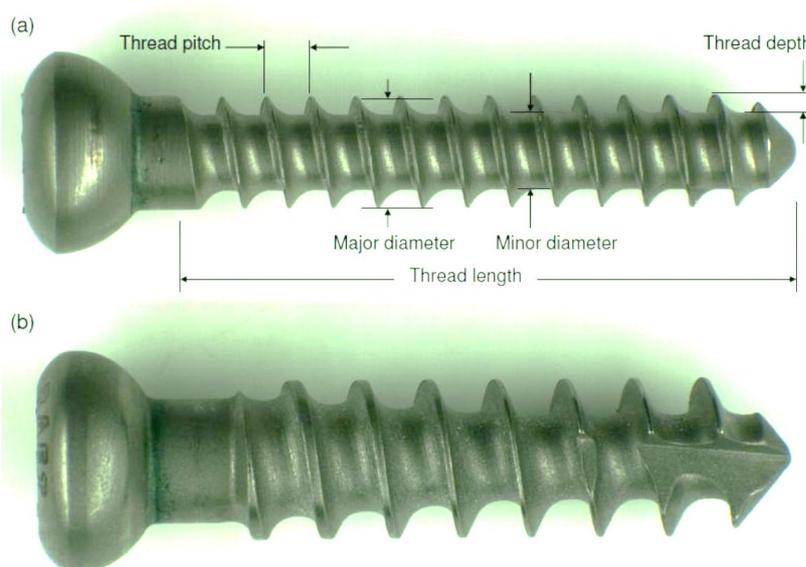
Keausan abrasif terjadi ketika permukaan kasar yang keras dan/atau permukaan yang mengandung partikel keras meluncur di atas permukaan yang lebih lunak (Rabinowicz, 1995). Pada awalnya, keausan abrasif oleh partikel keras dianggap serupa dengan pemotongan oleh serangkaian proses pemesian atau kikir. Namun, pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa proses pemotongan hanya terjadi pada partikel yang sangat tajam dan ada banyak mekanisme lain yang berperan secara tidak langsung. Partikel atau butiran bisa menghapus material dengan *microcutting*, *microfracture*, penarikan butiran individu dan kelelahan yang dipercepat dengan deformasi secara terus-menerus. (Kovarikova, 2009)

3. Difusi

Difusi pada kondisi padat adalah perpindahan atom dari daerah dengan konsentrasi atom tinggi ke daerah dengan konsentrasi atom rendah. Laju difusi naik secara eksponensial akibat pengaruh suhu. Difusi bisa terjadi pada pemesian logam karena adanya kontak erat pada suhu tinggi di zona reaksi yang sangat sempit antara alat dan chip (Cook dan Nayak, 1969; Naerheim dan Trent, 1977). Pengaruh terbesar akibat keausan difusi adalah penurunan kekuatan struktur permukaan perkakas (Boothroyd dan Knight, 1989).

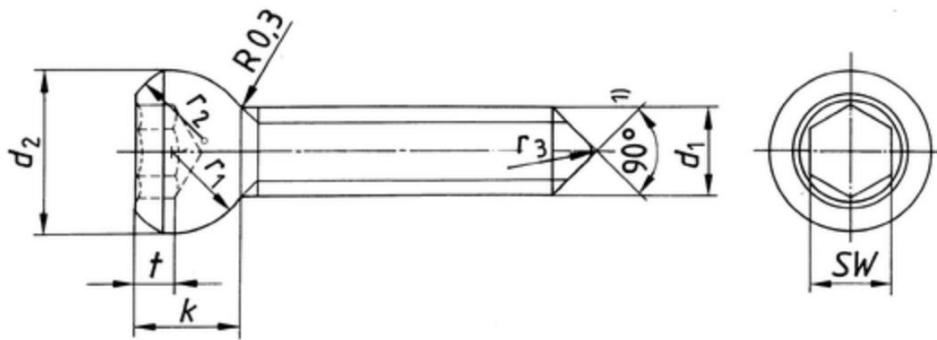
2.7 Sekrup Ulir Kortikal

Sekrup Kortikal dirancang memiliki ulir sepanjang poros yang digunakan pada tulang kortikal yang keras. Sekrup kortikal memiliki rasio perbandingan inti poros terhadap ulir yang lebih besar daripada sekrup *cancellous*. Sekrup Kortikal memiliki diameter dasar yang cukup besar, jarak antara puncak ulir yang kecil dan lebih pendek daripada sekrup *cancellous*. Sementara itu, sekrup *cancellous* memiliki jarak antara puncak ulir yang lebih besar dan ulir yang dalam untuk memperkuat sekrup pada tulang trabekular atau tulang *cancellous* (berlubang) dari bagian epifisis (Patel, 2010).



Gambar 2. 6 Sekrup Kortikal (a); Sekrup *Cancellous* (Patel, 2010)

Menurut ISO 5835:1991, tentang implant untuk pembedahan menjelaskan tentang Standar Internasional geometri *shallow thread* untuk ulir kortikal diberikan kode HA yang dapat dilihat pada Gambar 2.7. dan Tabel 2.1



Gambar 2. 7 Geometri Sekrup Kortikal

Keterangan;

d_1 = diameter mayor

d_2 = diameter kepala baut

r_1 = jari-jari fillet leher baut

r_2 = jari-jari fillet kepala atas baut

r_3 = jari-jari fillet ujung baut

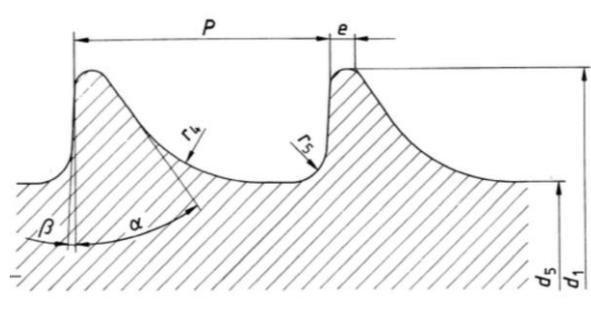
k = panjang kepala baut

t = kedalaman lubang hexagon

SW = Jenis lubang hexagon

Tabel 2. 1 Dimensi *screw* tipe HA (Rueda, 2018)

Kode dan Diameter Ulir	Nominal diameter d_1	d_2	Tol	K \approx	r_1	r_2 \approx	r_3 \approx	SW F10 ¹	t mm
HA 1,5	1,5	3	0-0,10	1,6	1,5	1,5	0,3	1,5	0,8
HA 2,0	2	4		1,9	2	2	0,4	1,5	1,0
HA 2,7	3	5	0-0,15	2,3	2,5	2,5	0,4	2,5	1,2
HA 3,5	3,5	6		2,6	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4	4	6		2,4	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4,5	4,5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8
HA 5	5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8



Gambar 2. 8 Dimensi ulir HA (Rueda, 2018)

Keterangan :

d_1 = diameter mayor

d_5 = diameter minor

r_4 = radius r_4 pahat

r_5 = radius r_5 pahat

α = sudut kemiringan ulir bagian dalam

β = sudut kemiringan ulir bagian luar

P = jarak *pitch*

e = lebar *pitch*

Tabel 2. 2 Dimensi Ulir tipe HA (Rueda, 2018)

Kode dan Diameter Ulir	d_1	d_5	e \approx	P	r_4 \approx	r_5 \approx	α	β	
HA 1,5	1,5	1,1	0-0,10	0,1	0,5	0,3	0,1	35°	3°
HA 2,0	2	1,3		0,1	0,6	0,4	0,1	35°	3°
HA 2,7	2,7	1,9	0-0,15	0,1	1	0,6	0,2	35°	3°
HA 3,5	3,5	2,4		0,1	1,25	0,8	0,2	35°	3°
HA 4	4	2,9		0,1	1,5	0,8	0,2	35°	3°
HA 4,5	4,5	3		0,1	1,75	1	0,3	35°	3°
HA 5	5	3,5		0,1	1,75	1	0,3	35°	3°

2.8 Proses Manufaktur Ulir

Proses manufaktur ulir adalah keseluruhan proses pembuatan ulir internal atau eksternal, dengan bentuk dan dimensi yang standar, pada permukaan benda silindris atau kerucut. Ulir dapat diproduksi dengan pengecoran, injeksi, pembentukan secara mekanis dan pemesinan. Ketika diproduksi dengan proses pembentukan, ulir memiliki ketahanan yang lebih tinggi karena pengerasan regangan. Selain itu, tidak adanya pembentukan chip dan alat yang Panjang merupakan keuntungan lain dari proses pembentukan (Bretas et al., 2009). Sebaliknya, kepresisian yang dicapai dengan teknik pembentukan tidak mampu mengalahkan hasil yang dicapai dengan operasi pemesinan. Ada berbagai macam proses pemesinan berbeda yang dapat digunakan untuk membuat ulir: pemesinan bubut, pemesinan tap dan die, *thread whirling*, penggerindaan dan pemesinan milling. Pemilihan proses yang tepat mempertimbangkan beberapa faktor, seperti: toleransi dimensi ulir, geometri benda kerja dan, terutama, diameter ulir (Bretas et al., 2009).

2.9 Titanium Paduan (Ti 6Al-4V ELI)

Salah satu paduan titanium yang paling banyak digunakan adalah paduan titanium *grade-5* atau lebih dikenal dengan Ti6Al-4V ELI, yang mencakup lebih dari 45% dari total produksi titanium. Ti 6Al-4V ELI merupakan titanium yang berada pada fase alfa-beta yang berisi 6 wt% aluminium dan 4 wt% vanadium.

Paduan Ti-6Al-4V memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang sangat baik, sehingga mencakup 50% penggunaan di dunia pada berbagai bidang antara lain: Industri Dirgantara, dipakai dalam aplikasi pembuatan struktur kerangka pesawat, sayap, roda pendaratan, struktur penopang rantai, mesin

cakram dan bilah kipas, cakram kompresor, dan bilah kompresor. Industri Otomotif dalam hal ini pembuatan struktur kerangka, pegas suspensi, pelindung, bodi, katup buang mesin, dan batang penghubung. Industri medis mencakup pembuatan implan pinggul, sendi lutut, dan gigi. Dan Industri Petrokimia: untuk membuat penukar panas dan reaktor, karena tingkat ketahanan korosi dan toleransi panas yang tinggi (Abdulgadir et al., 2019).

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia Paduan Ti-6Al-4V (wt%)

Content	Composition
C	0.05
Fe	0.09
N	0.01
O	-
Al	6.15
V	4.4
H	0.005
Ti	Balance

2.10 Cairan Pemotongan

Cairan pemotongan adalah zat yang digunakan dalam berbagai proses pemesinan untuk mencapai tujuan berikut:

1. Mengurangi gesekan dan keausan antara pahat dan benda kerja, sehingga memperpanjang umur pahat dan meningkatkan kualitas permukaan benda kerja.
2. Menyebarkan panas dari zona pemotongan, sehingga memperpanjang umur pahat dan mengurangi suhu serta distorsi termal benda kerja.
3. Mengurangi kebutuhan tenaga dan energi.
4. Membersihkan serpihan dari zona pemotongan, sehingga mencegah serpihan menghalangi proses pemotongan

5. Melindungi mesin dari korosi akibat lingkungan.

Jenis cairan pemotongan yang dibutuhkan bergantung pada jenis proses pemesinan, bahan pahat dan benda kerja, kecepatan potong, dan cara penerapannya. Air adalah pendingin yang sangat baik dan dapat menurunkan suhu tinggi yang terjadi di zona pemotongan. Namun, air tidak dapat melumasi dengan baik; oleh karena itu, ini tidak mengurangi friksi. Selain itu dapat menyebabkan oksidasi yang mengakibatkan karat pada benda kerja dan komponen mesin (Groover, 2010).

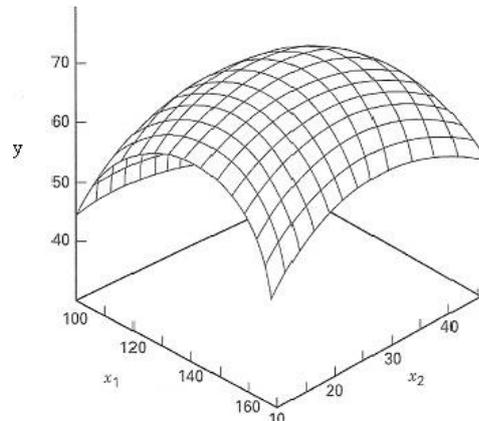
2.11 Metodologi Permukaan Respon

Metodologi Permukaan Respon adalah subjek yang penting dalam desain eksperimen statistik. Ini adalah sekumpulan metode matematika dan statistik yang dapat digunakan untuk memodelkan dan menganalisis situasi di mana beberapa variabel mempengaruhi respons yang kita inginkan dan kita ingin mengoptimalkan respons tersebut (Montgomery 2005).

Tujuan pertama Metode Permukaan Respon adalah menemukan respons optimal pada sebuah desain percobaan. Ketika ada lebih dari satu respons maka penting untuk menemukan kombinasi nilai optimal yang tidak hanya mengoptimalkan satu respon (Oehlert 2000). Ketika ada batasan pada data desain, maka desain eksperimen harus memenuhi persyaratan Batasan.

Tujuan kedua adalah memahami bagaimana respons berubah dalam arah tertentu dengan menyesuaikan variabel desain. Secara umum, permukaan respons dapat divisualisasikan secara grafis. Grafik ini membantu untuk melihat bentuk permukaan respons seperti; bukit, lembah, dan garis punggung. Oleh karena itu,

fungsi $f(x_1, x_2)$ dapat diplot versus tingkat x_1 dan x_2 seperti yang ditunjukkan sebagai Gambar 2.9 (Montgomery 2005).

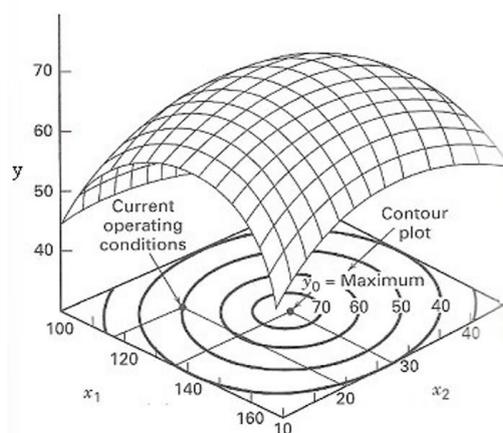


Gambar 2. 9 Kontur 3D Metode Permukaan Respon

Dalam grafik ini, setiap nilai x_1 dan x_2 menghasilkan nilai y . Grafik tiga dimensi ini menunjukkan permukaan respons dari samping dan disebut plot permukaan respons. Terkadang, tidak terlalu rumit untuk melihat permukaan respons dalam grafik dua dimensi.

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

Contour plot dapat menunjukkan garis kontur pasangan x_1 dan x_2 yang memiliki nilai respon y yang sama. Contoh plot kontur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Plot Kontur 3D

Grafik sangat berguna untuk memvisualisasikan permukaan respon, tetapi ketika ada lebih dari dua variabel independen, grafik menjadi sulit atau hampir mustahil untuk menunjukkan permukaan respon, karena melebihi 3 dimensi. Oleh karena itu, model permukaan respon sangat diperlukan untuk menganalisis fungsi f yang tidak diketahui.

2.10.1 Model Orde Pertama

Hubungan antara variabel respon y dan variabel independen tidak diketahui. Secara umum, model polinomial orde rendah digunakan untuk menggambarkan permukaan respon f . Model polinomial biasanya cukup akurat di daerah kecil permukaan respon. Karena itu, tergantung pada kesesuaian fungsi f yang tidak diketahui, model orde pertama atau orde kedua yang akan digunakan.

Selanjutnya, fungsi pendekatan f adalah model orde pertama ketika responnya adalah fungsi linear dari variabel bebas. Model orde pertama dengan N percobaan dilakukan pada q variabel desain dan respon tunggal y ditunjukkan pada Persamaan 2.2.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_q x_{iq} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.2)$$

Respon y adalah fungsi, f , dari variabel desain x_1, x_2, \dots, x_q , ditambah galat percobaan. Model orde pertama adalah model regresi berganda dan β_1 adalah koefisien regresi.

Model orde pertama digunakan untuk menggambarkan permukaan datar dengan atau tanpa permukaan miring. Model ini tidak cocok untuk menganalisis garis maksimum, minimum, dan *ridge*. Menggunakan pendekatan model orde pertama dari f masuk akal ketika f tidak terlalu

melengkung di daerah itu dan daerah itu tidak terlalu besar. Model orde pertama diasumsikan sebagai perkiraan yang memadai dari permukaan sebenarnya di wilayah kecil x (Montgomery 2005).

Selain itu, model orde pertama menunjukkan arah mana yang naik dan turun dalam respon. Metode pendakian paling curam adalah prosedur di mana algoritma mengikuti arah bergerak untuk meningkatkan respons paling banyak, yang digunakan untuk mengidentifikasi nilai maksimum. Metode penurunan paling curam terdiri dari mengambil arah penurunan respons yang paling cepat, yang digunakan untuk mengidentifikasi nilai minimum.

2.10.2 Model Orde Kedua

Ketika ada kelengkungan pada permukaan respons, model orde pertama tidak mencukupi. Oleh karena itu, model orde kedua berguna untuk memperkirakan sebagian dari permukaan respons yang sebenarnya dengan kelengkungan. Model orde kedua mencakup semua istilah dalam model orde pertama, dan istilah perkalian kuadrat dan silang. Biasanya direpresentasikan pada Persamaan 2.3.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.3)$$

Model orde kedua mengilustrasikan permukaan kuadrat seperti minimum, maksimum, *ridge*, dan *saddle*. Jika keluar suatu titik optimum maka titik ini disebut titik stasioner. Titik stasioner adalah kombinasi variabel desain untuk permukaan maksimum atau minimum di semua arah. Jika titik stasioner maksimum di beberapa arah dan minimum di arah lain,

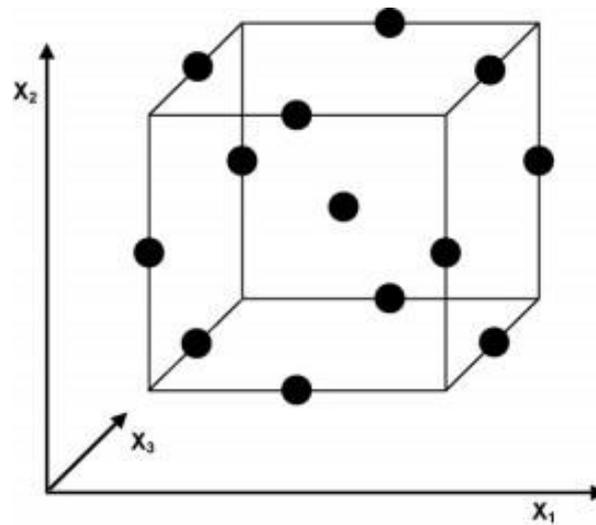
maka titik stasioner tersebut adalah titik pelana (Oehlert 2000). Visualisasi grafis sangat membantu dalam memahami permukaan respons orde kedua seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Secara khusus, plot kontur dapat membantu mengkarakterisasi bentuk permukaan dan menemukan respons optimal secara kasar. Desain paling populer untuk pemasangan model orde kedua adalah *Central Composite Design* (CCD) dan *Box Behnken Design* (BBD).

2.10.3 Box Behnken Design (BBD)

BBD dikembangkan oleh Box dan Behnken untuk percobaan orde dua. BBD yang berbentuk bola ini efektif untuk proses optimasi dimana seluruh titik terluar memiliki jarak yang sama terhadap titik pusat, yaitu sebesar $\sqrt{2}$. Oleh karena itu, BBD tidak mengenal titik faktorial dan titik permukaan. Pengulangan sebanyak tiga atau empat kali perlu dilakukan pada titik pusat untuk menghitung *lack of fit* (Myers dkk., 2009).

Salah satu perbedaan BBD dengan CCD adalah pada BBD tidak ada axial/star runs pada rancangannya. Tidak adanya axial/star runs ini menyebabkan BBD lebih efisien dalam rancangan, karena melibatkan lebih sedikit unit percobaan. Pada CCD, jumlah percobaan 3 faktor adalah $14+N_c$, sedangkan pada BBD hanya $12+N_c$. N_c merupakan notasi dari number of centre point dimana merupakan kombinasi pada level 0-0-0. Hal ini menunjukkan bahwa BBD lebih ekonomis terutama dalam percobaan yang membutuhkan biaya tinggi (Myers, 2009). Jumlah percobaan untuk BBD hanya memerlukan tiga level di setiap faktornya, sedangkan CCD memerlukan lima level (Box dan Draper, 1987).

BBD dibentuk berdasarkan kombinasi rancangan 2^k dengan incomplete black design dan dengan menambahkan center run pada rancangannya (Montgomery, 2009). Gambar 2.3 menunjukkan visual untuk rancangan box- behnken untuk tiga faktor (Montgomery, 2009).



Gambar 2. 11 *Box-Behnken* untuk tiga faktor

Rancangan BBD hanya dapat diterapkan pada percobaan yang memiliki minimal 3 faktor, dengan elemen penyusunnya adalah sebagai berikut:

1. Rancangan 2^k faktorial *incomplete block design*, dimana k adalah banyaknya faktor, yaitu percobaan pada titik $(0, \pm 1, \dots, \pm 1)$, $(\pm 1, 0, \dots, \pm 1)$, $(\pm 1, \pm 1, \dots, 0)$.
2. *Center runs* (n_c), yaitu percobaan pada titik pusat $(0, 0, \dots, 0)$, dimana jumlah *center runs* minimal 3 untuk berbagai jumlah faktor k .

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mencari dan menentukan parameter operasi yang sesuai agar mendapatkan kondisi optimum pada proses permesinan bubut dengan pahat putar pada material paduan titanium Ti-6Al-4V menggunakan metode analisis eksperimental. Metode permukaan respon Box Behnken design yang melibatkan 3 faktor 3 level dan 3 titik pusat dipilih pada penelitian ini, sehingga disiapkan 15 sampel percobaan secara acak. Penelitian ini akan menggunakan tiga variabel yaitu kecepatan spindel, kedalaman potong, dan jenis pelumas untuk memperoleh gambaran ragam keausan yang terjadi pada pahat serta mengetahui umur pahat pada masing-masing variasi percobaan. Setelah itu akan dilakukan analisis data sehingga diperoleh parameter pemotongan yang paling optimal.

3.1 Tempat Penelitian

Tempat penelitian dan pengambilan data dilakukan di Laboratorium Politeknik Tunas Garuda Lampung dan Laboratorium Produksi Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 5 bulan, dimulai pada bulan Januari 2023 sampai dengan bulan Mei 2023. Adapun deskripsi waktu penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Rencana Pelaksanaan Penelitian

Nama Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur	■	■	■	■																
Persiapan Alat dan bahan			■	■	■	■	■	■												
Pengujian dan pengambilan data									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Pembuatan laporan																	■	■	■	■

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

3.3.1 Mesin Bubut CNC

Mesin bubut adalah salah satu mesin perkakas yang dapat digunakan untuk melakukan proses pemesinan untuk berbagai material. Prinsip kerja mesin bubut adalah dengan menghilangkan material dari permukaan benda kerja yang berputar dengan menggunakan pahat potong yang bergerak linier sejajar dengan sumbu rotasi untuk menghasilkan geometri silindris yang diinginkan (Groover, 2010).



Gambar 3. 1 Mesin Bubut CNC

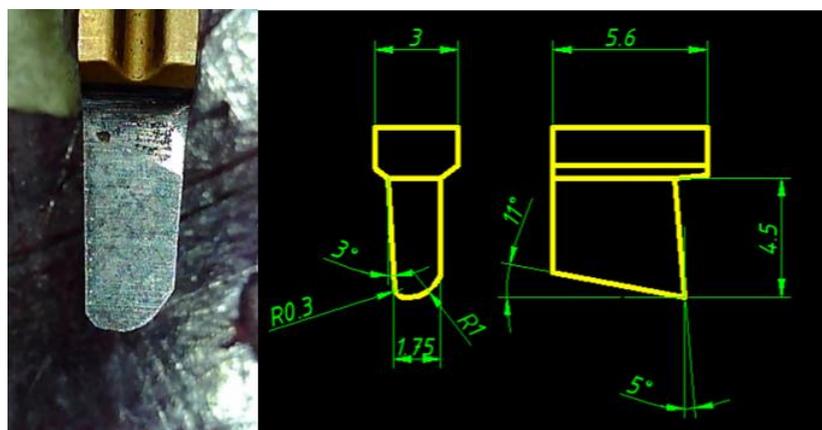
Mesin bubut yang digunakan untuk penelitian ini memiliki spesifikasi seperti terlihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Mesin CNC Feeler FT 350

TRAVEL	
X-axis travel	175+25 mm
Z-axis travel	700 mm
Tailstock travel type	Manual
Tailstock travel	610 mm
Quill travel type	Hydraulic
Quill diameter	70 mm
Quill stroke	90 mm
Quill taper	MT-4
SPINDLE	
Spindle speed	4,500rpm
Spindle nose	A2-6
Hydraulic chuck diameter	210 mm (8")
Spindle bore diameter	62 mm
Spindle bearing diameter	100 mm
Spindle taper	1:20
FEEDRATE	
Rapid traverse X-axis	30m/min
Rapid traverse Z-axis	30m/min

3.3.2 Pahat Ulir Kortikal

Pahat yang digunakan pada pemesinan ini adalah pahat karbida sisipan yang geometrinya disesuaikan dengan geometri ulir kortikal.



Gambar 3. 2 Pahat Ulir Kortikal

Pahat sisipan dipasang pada *tool holder* (Gambar 3.3) dan dibentuk dengan menggunakan mesin *Great DI* menggunakan batu gerinda *diamond*.



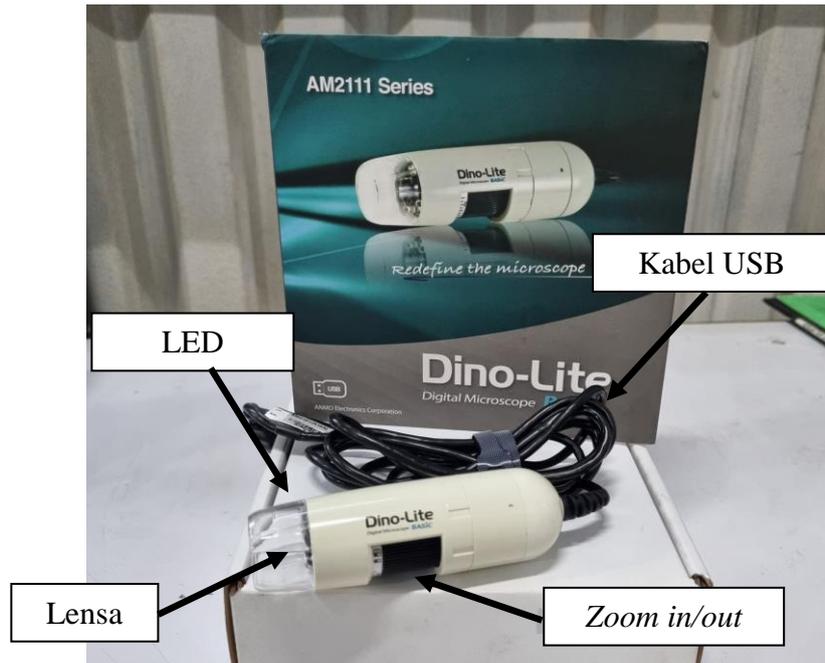
Gambar 3. 3 *Tool Holder*

3.3.3 Mikroskop Digital Dino Lite AM211

USB (Universal Serial Bus) Mikroskop adalah perangkat optik yang dapat menghubungkan komputer/laptop dengan objek pengamatan makhluk hidup atau benda mati yang memiliki skala perbesaran sesuai dengan kebutuhan. Prosedur penggunaan mikroskop USB dapat dijelaskan dengan Langkah-langkah di bawah ini.

1. Siapkan mikroskop USB, laptop dan objek yang ingin diamati.
2. *Install software* yang sesuai dengan tipe mikroskop USB.
3. Pasang mikroskop USB ke *port* USB pada komputer atau perangkat lain.
4. Jalankan *software* aplikasi mikroskop USB pada laptop.
5. Arahkan dan dekatkan mikroskop USB pada benda kerja sehingga objek yang diamati dapat terlihat pada layer laptop.
6. Putar tombol *zoom in/out* untuk mengatur posisi lensa kamera sesuai dengan nilai pembesaran yang diinginkan.
7. Atur jarak Mikroskop USB ke benda kerja hingga gambar yang muncul pada layer laptop terlihat jelas dan tajam.

8. Gunakan tombol *capture* pada *software* untuk mengambil gambar atau video dari objek yang diamati. Foto atau video akan tersimpan secara otomatis di *folder* Mikroskop USB.
9. Atur kecerahan, kontras, dan parameter lainnya menggunakan fitur *software* Mikroskop USB.



Gambar 3. 4 Mikroskop USB

Spesifikasi USB Mikroskop yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

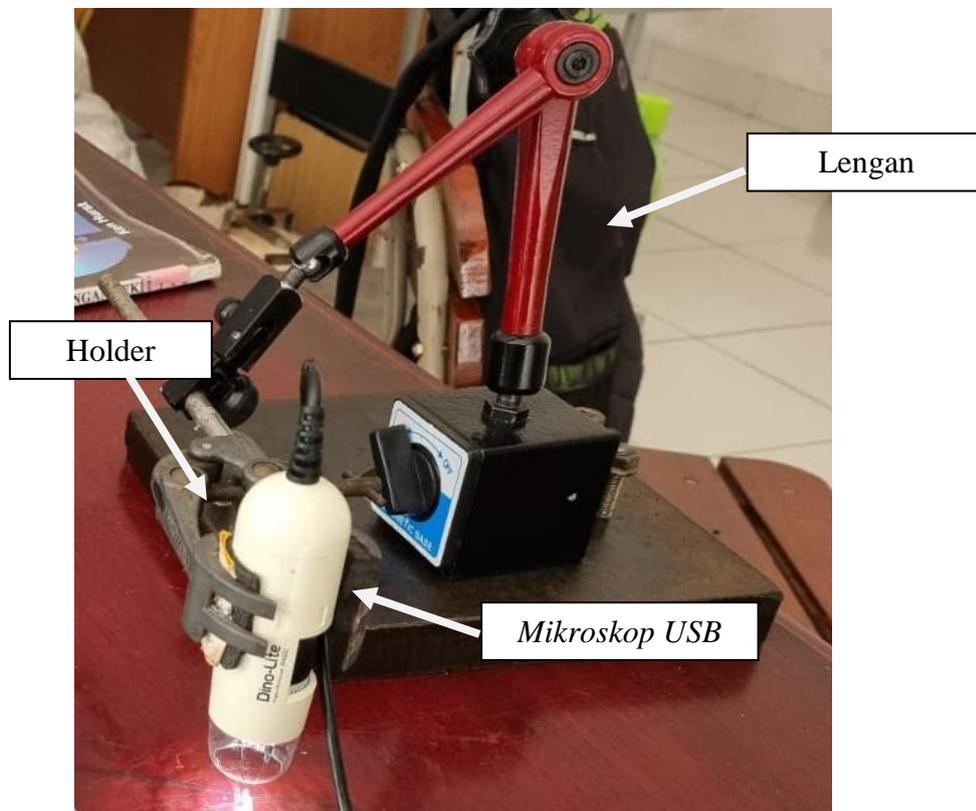
Tabel 3. 3 Mikroskop USB Dinolite AM2111

Model	AM2111 Dino-Lite Basic
Interface	USB 2.0
Product Resolution	640x480 pixels (VGA)
Magnification Rate	20x~50x, 200x
Sensor	Color CMOS
Frame Rate	Up to 30fps
Save Formats	Image: Dino Capture 2.0: BMP, GIF, PNG, MNG, TIF, TGA, PCX, WBMP, JP2, JPC, JPG, PGX, RAS, PNM DinoXcope: PNG, JPEG Movie:

	DinoCapture2.0: WMV, FLV, SWF DinoXscope: MOV
Lighting	4 white LED lights for illumination
Operating System Supported	Windows XP/7/8/10/11 macOS 10.14 or later
Unit Weight	100g
Unit Dimension	10.5cm (H) x 3.2cm (D)

3.3.4 Stand Mikroskop

Stand Mikroskop digunakan untuk memegang dan menempatkan mikroskop pada penelitian ini.



Gambar 3. 5 *Stand Mikroskop*

3.3.5 *Block Gauge*

Block Gauge adalah alat yang digunakan untuk standar kalibrasi alat ukur. Alat ini digunakan untuk dasar pengukuran saat mengukur benda kerja sehingga menghasilkan kepresisian yang tinggi terhadap nilai pengukuran benda kerja. Alat ini mempunyai ukuran yang bervariasi sehingga dapat

dilakukan kalibrasi sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan. Block Gauge ini digunakan untuk kalibrasi ukuran 1.005-100 mm.



Gambar 3. 6 *Block Gauge Set*

Pada penelitian ini, *block gauge* digunakan sebagai referensi ukuran yang dipakai untuk mengkalibrasi ukuran yang diberikan pada *software AutoCAD*.

3.3.6 *Software Auto CAD*

Auto CAD digunakan untuk menginterpretasikan gambar dan memberi ukuran keausan pahat hasil foto mikroskop USB.

3.3.7 *Software Design Expert 13*

Design Expert 13 digunakan untuk membantu membuat rancangan percobaan dan menganalisa hasil penelitian secara kuantitatif. Metode RSM Box Behnken Design merupakan salah satu desain analisis yang terdapat di dalam menu analisis software ini dan digunakan untuk membuat rancangan percobaan yang akan dilaksanakan.

3.3.8 *Changhua Chen Ying Oil Machine*

Changhua Chen Ying Oil Machine merupakan alat yang digunakan dalam pemesinan bubut sebagai alat penyemprot pelumas dalam Metode MQL (*Minimum Quantity Lubrication*).



Gambar 3. 7 *Changhua Chen Ying Oil Machine*

Tabel 3. 4 Spesifikasi *Changhua Chen Ying Oil Machine*

Tipe	CEN01
Volume pelepasan	0.13 l/min
<i>Max pressure</i>	15kgf/cm ²
<i>Tank capacity</i>	2L
Konsumsi daya	30±3W
<i>Max operation time</i>	4min
Tegangan	220V 1A

3.3.9 Kompresor Udara

Kompresor udara adalah mesin yang mengubah energi listrik atau mekanik menjadi energi kinetik dengan menekan dan memampatkan udara. Udara yang dipampatkan kemudian dapat digunakan untuk berbagai keperluan spesifik. Pada penelitian ini, kompresor digunakan untuk memberikan suplai udara pada sistem MQL sehingga cairan pelumas dapat dikabutkan. Hasil pengabutan diarahkan ke ujung mata pahat untuk menurunkan suhu pemotongan.



Gambar 3. 8 Kompresor Udara

3.3.10 Material Ti 6AL 4V ELI

Penelitian ini menggunakan bahan Titanium Grade 5 (Ti-6Al-4V ELI) diameter 10 mm. Komposisi kimia paduan Ti-6Al-4V ditunjukkan pada Tabel 3.5 di bawah ini.

Tabel 3. 5 Komposisi Kimia Paduan Ti-6Al-4V ELI (wt%)

Content	Composition
C	0.05
Fe	0.09
N	0.01
O	-
Al	6.15
V	4.4
H	0.005
Ti	Balance



Gambar 3. 9 Paduan Ti-6Al-4V ELI

3.3.11 Pelumas/Cairan Pendingin

Pelumas atau cairan pendingin dalam pemesinan dipakai untuk memperbaiki sifat-sifat tribologi dari proses pemesinan. Cairan ini membantu mengurangi panas yang terbentuk, memperpanjang umur alat, menurunkan deformasi termal benda kerja, memperhalus permukaan, dan membersihkan chip dari zona pemotongan (Ramana, 2014). Penelitian ini menggunakan 3 kondisi pemesinan yaitu pemesinan kering, pelumas minyak sawit, dan pelumas sintetik.

a. Pelumas Minyak Sawit

Menurut penelitian Ketaren. (1986), rumus kimia CPO Indonesia $C_{3}H_{5}(COOR)_3$ dengan ciri-ciri sebagai berikut: berat molekul: 847,28 g/mol, titik didih: 298°C Titik Beku: 5°C, berat jenis: 0,9 kepadatan: 0,895 g/cm³, jenis panas: 0,497 kal/g°C, Penampilan: Kemurnian cairan oranye-kuning: 98%, kotoran: 2% air.

Sifat kualitatif dan fisikokimia minyak sawit Indonesia (CPO) rata-rata mengandung kadar asam lemak bebas (ALB) 3,94%, kadar air 0,02%, kadar pengotor 0,02%, kadar karoten 420 ppm dan DOBI

1,83 tidak berbeda dengan Siaha et al. Al. (2009) melaporkan nilai ALB 3,51% (1,06–10,66%), kadar air 0,03% (0,01–0,19%) dan pengotor 0,02% (0,01–0,16%) dilaporkan). Namun kadar karoten dan nilai DOBI berbeda yaitu 553 ppm (271-790 ppm) dan 2,24% (0,9-2,99%). Data menunjukkan bahwa sebagian besar perusahaan secara konsisten menerapkan mutu CPO SNI 01-2901-2006 sesuai persyaratan.

b. Pelumas Sintetik

Pelumas sintesis adalah cairan khusus yang dibuat secara kimia untuk memberikan kinerja pendinginan, pelumasan, dan anti-korosi yang optimal saat melakukan pemesinan dan pengerjaan logam. Pelumas ini berbeda dari minyak pemotongan konvensional yang berbasis minyak mineral atau emulsi berbasis air karena merupakan formulasi sintesis yang memiliki banyak keuntungan yang dapat meningkatkan kualitas pemesinan dan umur alat.

Pelumas sintesis tidak mengandung bahan dasar minyak mineral atau minyak bumi, sehingga warnanya bening. Hal yang membedakan pelumas sintesis dengan cairan non-sintesis adalah kandungan aditif yang lebih tinggi pada cairan sintesis, yang membuatnya lebih awet dan biasanya lebih unggul dalam kinerjanya. Pelumas sintesis lebih resisten terhadap oksidasi dan panas, selain itu juga memiliki massa jenis yang lebih rendah dan lebih tahan terhadap perubahan viskositas, terutama bagi industri penerbangan yang memerlukan ketelitian dan efektivitas pelumas

sintetis sehingga menghasilkan komponen yang sesuai dengan standar mutu dan performa yang tinggi. Pelumas sintetis dapat menjaga suhu benda kerja tetap rendah saat pemotongan dengan kecepatan tinggi yang dapat mengeluarkan serpihan dari daerah pemotongan untuk mencegah goresan pada benda kerja akibat serpihan logam.

3.4 Desain Parameter Pemesinan

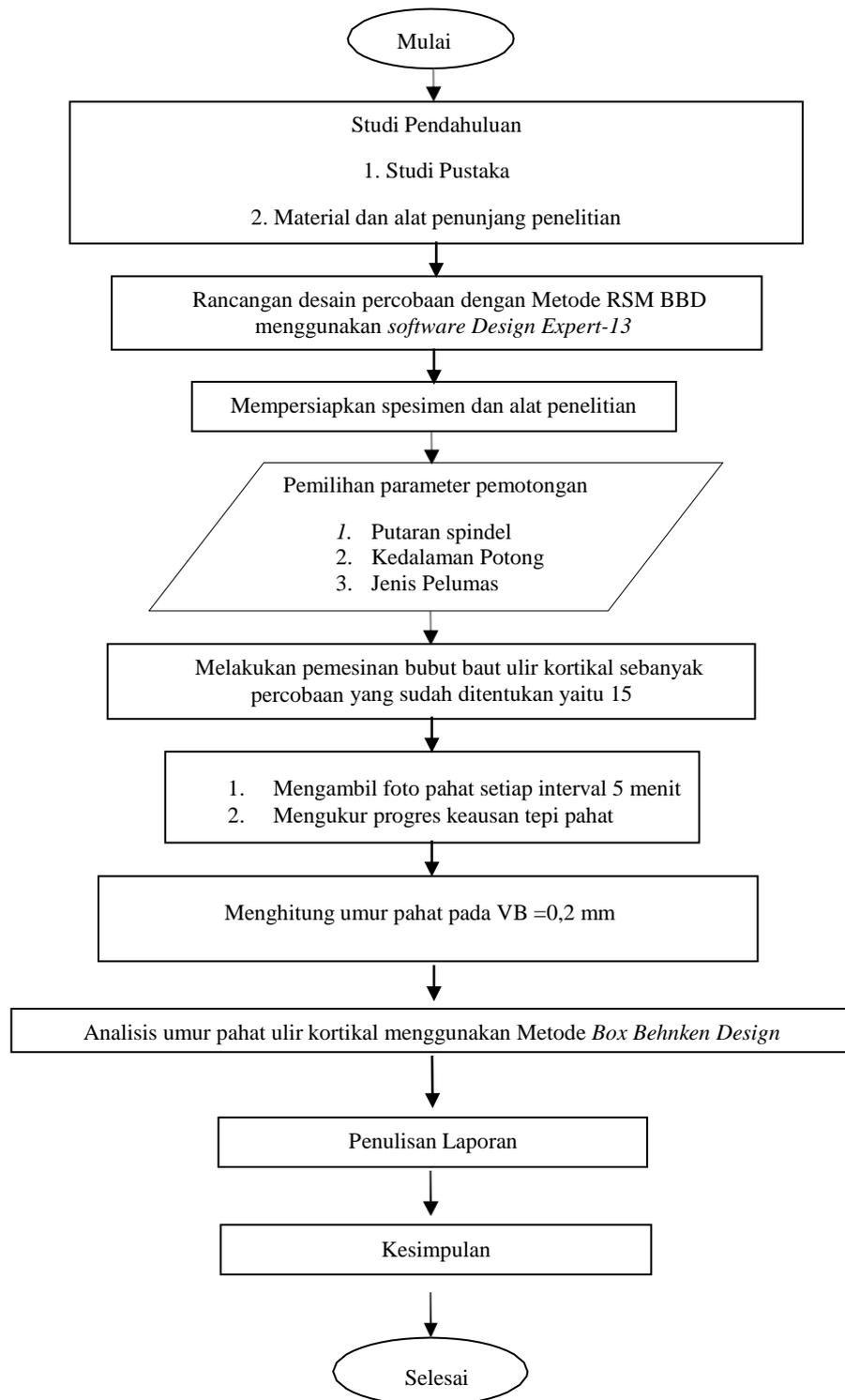
Pada penelitian ini variasi parameter pemotongan yang dilakukan untuk proses ini adalah putaran spindle, kedalaman pemotongan, dan jenis pelumas. Putaran spindel yang digunakan adalah 100, 200, dan 300 rpm, untuk kedalaman pemakanan yang digunakan yaitu; 0,01; 0,02; dan 0,03 mm sedangkan besar kecepatan pemakanan yang digunakan konstan sesuai dengan jarak puncak ulir. Pada Tabel 3.6 menunjukkan desain parameter yang akan digunakan.

Tabel 3. 6 Desain Parameter Pemotongan

Faktor	Level		
	1	2	3
Putaran spindel (rpm)	100	200	300
Kedalaman Potong (mm)	0,01	0,02	0,03
Pelumas	kering	minyak sawit	sintetik

Kombinasi parameter pemesinan tersebut dirancang dengan menggunakan desain eksperimen Metode Permukaan Respon *Box Behnken Design*.

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 10 Diagram alir penelitian

3.6 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Persiapan Alat dan Bahan

Set-up mesin bubut, persiapan alat meliputi pahat bubut, pahat ulir, pahat potong, kompresor udara, MQL dan *microscope*. Kemudian *set-up* mesin bubut dengan memasukkan kode pemesinan CNC pemotongan ulir kortikal. Bahan yang digunakan ialah Ti-6Al-4V ELI yang berbentuk silinder dengan diameter awal sebesar 10 mm dengan dimensi acuan baut ulir mengikuti standar ISO 5835.

2. Menentukan Variabel dan Respon

Dalam penelitian ini, variabel dan respon selama proses pemesinan berlangsung ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Parameter Penelitian

No	Kecepatan Spindel	Kedalaman pemotongan	Pelumas
	(rpm)	(mm)	
1	100	0.01	kering
2	200	0,02	minyak sawit
3	300	0,03	sintetik

3. Menyiapkan tabel penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode permukaan respon Box Behnken, yang ditunjukkan dengan Tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Parameter Penelitian Box Behnken Design

Run Order	Std Order	Kode Untuk Variabel		
		Kecepatan Spindel (rpm)	Kedalaman Potong (mm)	Jenis Pelumas
1	12	200	0,03	sintetik
2	2	300	0,01	minyak sawit
3	1	100	0,01	minyak sawit
4	14	200	0,02	minyak sawit
5	5	100	0,02	kering
6	6	300	0,02	kering
7	13	200	0,02	minyak sawit
8	7	100	0,02	sintetik
9	11	200	0,01	sintetik
10	10	200	0,03	kering
11	9	200	0,01	kering
12	8	300	0,02	sintetik
13	15	200	0,02	minyak sawit
14	3	100	0,03	minyak sawit
15	4	300	0,03	minyak sawit

4. Mempersiapkan bahan uji Paduan Titanium Ti-6Al-4V ELI.
5. Mengatur pembesaran USB Mikroskop sebagai referensi ukuran

Pengaturan referensi ukuran dilakukan dengan mengatur pembesaran USB Mikroskop untuk pengambilan gambar *block gauge*. *Block Gauge* yang digunakan berukuran 1 mm dengan toleransi ($\pm 0,002$). Setelah itu, hasil foto dimasukkan ke software Auto CAD untuk diukur dan dijadikan referensi untuk proses pengukuran selanjutnya.

6. Proses pembuatan dan Pengambilan Data

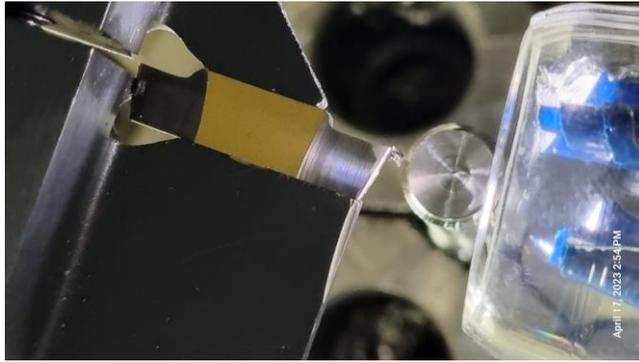
Pada tahap ini setelah *set-up* mesin selesai, pahat sudah terpasang di *tool post* dan benda kerja sudah tercekam di *chuck* dengan baik, setelah itu atur fokus dan perbesaran USB kamera lalu gunakan block gauge dan untuk pengambilan gambar awal melakukan *input code* CNC pemesinan (gambar 3.11).



Gambar 3. 11 Pengaturan di Mesin Bubut CNC

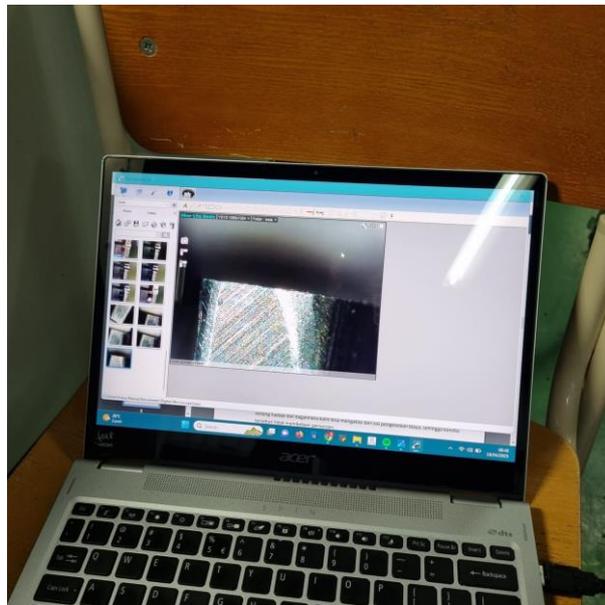
Apabila dijelaskan secara bertahap maka akan dilakukan proses pembubutan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Melakukan *facing* permukaan benda kerja menggunakan pahat bubut muka dengan arah pemakanan melintang.
- b. Melakukan pemakanan menggunakan pahat bubut rata kanan dengan arah memanjang, membuat diameter sebesar 9,5 mm sepanjang 50 mm.
- c. Langkah selanjutnya atur mesin bubut untuk pembuatan ulir dengan mengganti pahat ulir pada *tool post*.



Gambar 3. 12 Posisi Pahat Ulir dan USB Mikroskop

- d. Atur posisi 0 (*zero point*) pahat sekaligus atur jarak USB mikroskop dengan pembesaran yang diinginkan, sehingga gambar pahat dapat terlihat dengan jelas.



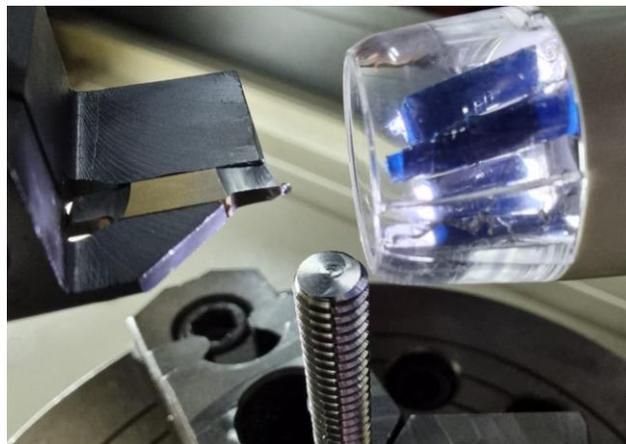
Gambar 3. 13 Gambar Awal Pahat Ulir Kortikal pada Posisi *Zero Point*

- e. Buat ulir pada bagian benda yang berdiameter 9,5 mm sepanjang 50 mm dengan pengaturan parameter pemotongan sesuai dengan *run order* pada desain eksperimen yang telah ditetapkan.



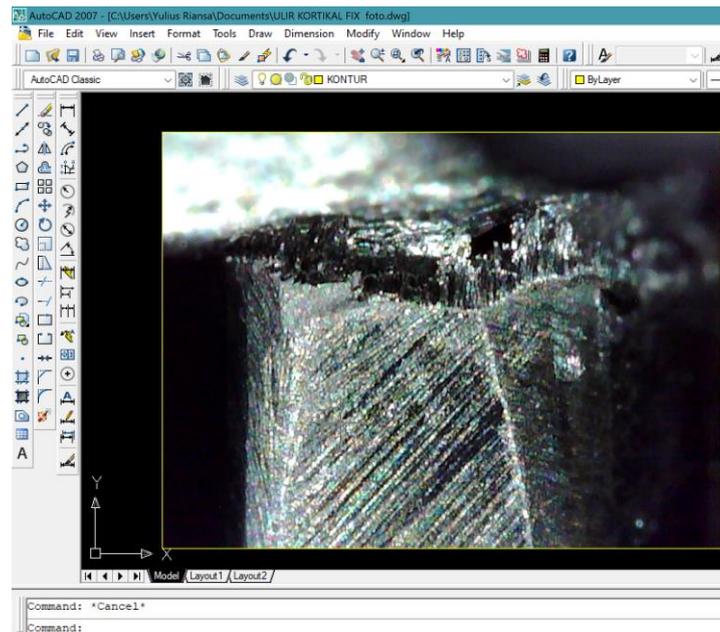
Gambar 3. 14 Foto Pembuatan Ulir Kortikal

- f. Mengambil foto keausan pahat yang terjadi setiap interval 5 menit dengan bantuan USB mikroskop dan laptop.



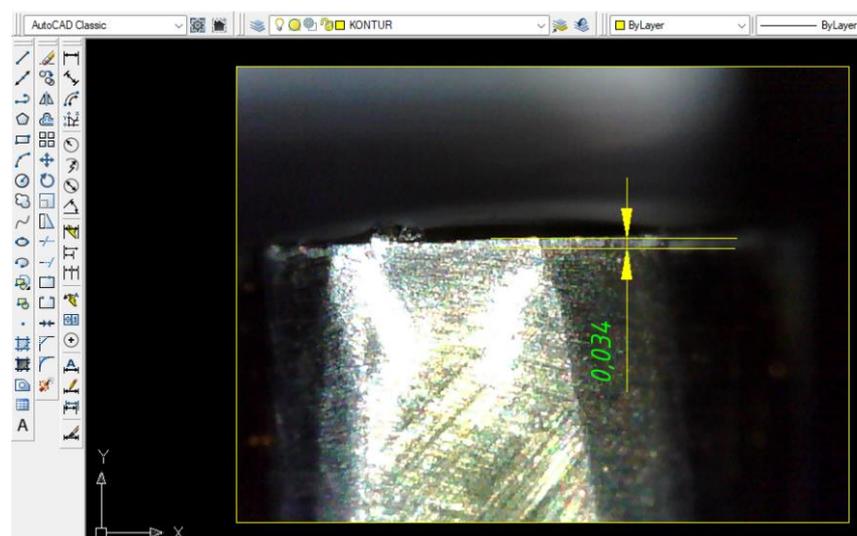
Gambar 3. 15 Pengambilan Data Foto Keausan Pahat

- g. Mengulangi langkah poin e sampai dengan 60 menit (12x pengambilan gambar setiap sampel).
- h. Memindahkan hasil foto ke program *Auto CAD* untuk diukur besar keausan pahat.



Gambar 3. 16 Foto Keausan Pahat di Auto CAD

- i. Mengamati kondisi keausan pahat setelah proses pemesian bubut dengan menggunakan mikroskop.
- j. Mengukur besar keausan pahat di Auto CAD.



Gambar 3. 17 Mengukur Keausan Pahat Ulir Kortikal

- k. Mengumpulkan data keausan pahat sesuai dengan desain eksperimen percobaan.

Tabel 3. 9 Tabel Pengukuran keausan tepi pahat

Run Order	Putaran Spindel	Kedalaman Potong	Pelumas	Pengukuran keausan(mm)				
				1	2	3	4	5
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

1. Menghitung umur pahat pada $VB=0,2$ menit dengan menggunakan interpolasi dan ekstrapolasi

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (3.1)$$

7. Pengolahan Data

Setelah semua proses dilakukan, data yang sudah didapat akan diolah dengan menggunakan software *Design Expert 13* dengan Metode Permukaan Respon *Box Behnken* sehingga dapat diketahui parameter pemesinan yang optimal.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada makalah ini proses pemesinan ulir kortikal paduan Ti-6Al-4V ELI dengan pahat karbida dianalisa menggunakan pendekatan RSM-BBD. Eksperimen pembubutan pahat dilakukan pada benda kerja menggunakan berbagai kombinasi kecepatan spindel, kedalaman potong, dan pelumas sesuai dengan rencana eksperimen untuk mengukur keausan pahat. Perangkat lunak *design expert-13* digunakan untuk mengembangkan matriks desain, menganalisis signifikansi parameter, mengembangkan model proses, dan mengoptimalkan parameter proses untuk keausan dan umur pahat. Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Faktor yang berpengaruh paling signifikan pada respon umur pahat adalah jenis pelumas dengan nilai P-Value 0,001 atau persen kontribusi 99%. Selain itu faktor lain yang berpengaruh adalah kuadrat dari kecepatan spindel (A^2), yang memiliki nilai F sebesar 35.22 dan nilai p sebesar 0,0019 atau persen kontribusi 99%, sedangkan faktor kedalaman potong tidak signifikan dengan nilai P-Value sebesar 0,30.
2. Pada semua kondisi pemesinan (pemesinan kering, pelumas minyak sawit, dan pelumas sintetik) umur pahat terbaik diperoleh pada daerah kecepatan spindel sedang (200 rpm). Pada kondisi pemesinan kering, rata-rata umur pahat saat kecepatan spindel 200 rpm sebesar 116,47 menit. Umur pahat rata-

rata akan turun sebesar 55,61% pada kecepatan spindel 100 rpm dan 49,01% pada kecepatan spindel 300 rpm.

3. Pada kondisi pemesinan dengan pelumas minyak sawit, rata-rata umur pahat saat kecepatan spindel 200 rpm sebesar 183,977 menit atau meningkat 57,96% dibandingkan dengan kondisi pemesinan kering. Umur pahat rata-rata akan turun sebesar 36,86% pada kecepatan spindel 100 rpm dan 29,5% pada kecepatan spindel 300 rpm.
4. Saat pemesinan dengan pelumas sintetik, umur pahat rata-rata saat kecepatan spindel 200 rpm adalah 211,243 menit. Ini menunjukkan kenaikan sebesar 81,37% dibandingkan dengan pemesinan tanpa pelumas atau 14,82% jika dibandingkan dengan pelumas minyak sawit. Umur pahat rata-rata akan berkurang sebesar 33,47% saat kecepatan spindel 100 rpm dan 24,13% saat kecepatan spindel 300 rpm.
5. Kondisi optimum proses pemesinan diperoleh pada parameter kecepatan spindel 202,073 rpm, kedalaman potong 0,15 mm, dan kondisi pemesinan dengan pelumas sintetik.

5.2 Saran

Pada penelitian ini terdapat saran yang diberikan guna untuk mendapatkan hasil yang lebih baik lagi dalam pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Pada penelitian ini untuk pengukuran ketelitian melihat cacat/ kerusakan permukaan hanya menggunakan Mikroskop USB basic yang belum memiliki skala pengukuran sehingga pengukuran masih harus dilakukan menggunakan software AutoCAD untuk membantu mengukur keausan yang terjadi. Hal ini

menyebabkan waktu penelitian bertambah, sehingga mengurangi efisiensi dalam proses penelitian ini.

2. Untuk melihat kontur dan kerusakan/cacat permukaan yang lebih detail dapat menggunakan uji SEM (Scanning Electron Microscope).
3. Pada penelitian selanjutnya dapat juga mengamati optimasi parameter pahat ulir kortikal multirespon dengan metode lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulgadir, M. M., Ahmadi, A. E. M., & Bouhawish, W. Y. (2019). Machinability of Titanium Grade-5 Alloy (Ti-6Al-4V) During Turning Processes : A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN:*, 6(10), 565–572.
<https://www.researchgate.net/publication/337943315%0AMachinability%0Awww.irjet.net>
- ASTM. (2002). ASTM Book Standard F543 - 13 Standard Specification and Test Methods for Metallic Medical Bone Screws. In *ASTM International: Vol. i* (Issue June). <https://doi.org/10.1520/F0543-13E01>. Copyright
- Bagherzadeh, A., & Budak, E. (2018). Investigation of machinability in turning of difficult-to-cut materials using a new cryogenic cooling approach. *Tribology International*, 119, 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.033>
- Chao, C. K., Hsu, C. C., Wang, J. L., & Lin, J. (2007). Increasing bending strength of tibial locking screws: Mechanical tests and finite element analyses. *Clinical Biomechanics*, 22(1), 59–66.
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2006.07.007>
- Daga, B., Rivera, G., & Boeri, R. (2007). Review of the regulations for the use of stainless steels for orthopedic implants in Argentina. *Journal of Physics: Conference Series*, 90(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/90/1/012045>
- Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2016). Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 78, 111–119.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.011>
- Dogra, A. P. S., Kapoor, S. G., & DeVor, R. E. (2002). Mechanistic model for tapping process with emphasis on process faults and hole geometry. *Journal*

of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 124(1), 18–25. <https://doi.org/10.1115/1.1430237>

Festas, A., Ramos, A., & Davim, J. P. (2022). Machining of titanium alloys for medical application - a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(4), 309–318. <https://doi.org/10.1177/09544054211028531>

Groover, M. P. (2010). Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed. In *Metallurgy of Welding* (4th ed.). https://doi.org/10.1007/978-94-010-9506-8_6

Ibrahim, G. A., Che Haron, C. H., & Ghani, J. A. (2010). Tool wear mechanism in continuous cutting of difficult-to-cut material under dry machining. *Advanced Materials Research*, 126–128(December 2016), 195–201. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.195>

Ibrahim, Gusri Akhyar, Hamni, A., Septiani, C., & Burhanuddin, Y. (2022). Optimasi Parameter Pemesinan Ulir Ti-6Al-4V ELI terhadap Jarak Pitch dan Sudut Ulir Menggunakan Metode Taguchi. *Prosiding SNTTM*, 13–14.

Ibrahim, Gusri Akhyar, Haron, C. H. C., & Ghani, J. A. (2010). Tool wear performance of CVD-insert during machining of Ti-6%Al-4%V ELI at high cutting speed. *Key Engineering Materials*, 443(December 2016), 371–375. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.443.371>

Kincaid, B., Schroder, L., & Mason, J. (2007). Measurement of orthopedic cortical bone screw insertion performance in cadaver bone and model materials. *Experimental Mechanics*, 47(5), 595–607. <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9056-6>

Liao, Y. S., & Chen, C. N. (2013). A study of a strategy for threading titanium alloy. *Advanced Materials Research*, 753–755, 323–332. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.323>

M. Venkata, R., G. Krishna Mohan, R., & D. Hanumantha, R. (2014). Optimization and Effect of Process Parameters on Tool Wear in Turning of

Titanium Alloy under Different Machining Conditions. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2(4), 272–277.

<https://doi.org/10.7763/ijmmm.2014.v2.141>

Mezentsev, O. A., DeVor, R. E., & Kapoor, S. G. (2002). Prediction of thread quality by detection and estimation of tapping faults. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 124(3), 643–650. <https://doi.org/10.1115/1.1475319>

Mhamdi, M.-B., Boujelbene, M., Bayraktar, E., & Zghal, A. (2012). Surface Integrity of Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Ball end Milling. *Physics Procedia*, 25(December), 355–362.

<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.096>

Namb, M., & Paulo, D. (2011). Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 01(01), 9–14. <https://doi.org/10.4236/jsemat.2011.11002>

Olortegui-Yume, J. A., & Kwon, P. Y. (2007). Tool wear mechanisms in machining. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2(3–4), 316–334. <https://doi.org/10.1504/ijmmm.2007.015469>

Paul, J. P., & Gefen, A. (2003). Optimizing the biomechanical compatibility of orthopedic screws for bone fracture fixation (multiple letters). *Medical Engineering and Physics*, 25(5), 435–436. [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(03\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(03)00025-0)

Pervaiz, S., Deiab, I., Rashid, A., & Nicolescu, M. (2017). Minimal quantity cooling lubrication in turning of Ti6Al4V: Influence on surface roughness, cutting force and tool wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1542–1558. <https://doi.org/10.1177/0954405415599946>

Rahim, E. A., & Sasahara, H. (2011a). A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, 44(3), 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.10.032>

- Rahim, E. A., & Sasahara, H. (2011b). Investigation of tool wear and surface integrity on MQL machining of Ti-6AL-4V using biodegradable oil. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(9), 1505–1511. <https://doi.org/10.1177/0954405411402554>
- Schmid, S. R. (n.d.). *MANUFACTURING ENGINEERING Illinois Institute of Technology*.
- Uhthoff, H. K., Poitras, P., & Backman, D. S. (2006). Internal plate fixation of fractures: Short history and recent developments. *Journal of Orthopaedic Science*, 11(2), 118–126. <https://doi.org/10.1007/s00776-005-0984-7>
- Zareidoost, A., Yousefpour, M., Ghasemi, B., & Amanzadeh, A. (2012). The relationship of surface roughness and cell response of chemical surface modification of titanium. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 23(6), 1479–1488. <https://doi.org/10.1007/s10856-012-4611-9>
- Zawada-Tomkiewicz, A., Żurawski, Ł., Tomkiewicz, D., & Szafraniec, F. (2021). Sustainability and tool wear of titanium alloy thread cutting in dry and cryogenic conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(9–10), 2767–2781. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07034-1>
- Zukhruf, F. (2021). *PENGANTAR OPTIMASI DALAM REKAYASA TRANSPORTASI* (Edi Warsidi (ed.); 1st ed.). ITB Press.