

**KAJIAN MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM
INOPHYLUM*) SEBAGAI PELUMAS NABATI PADA
PEMESINAN FRAIS DAN BOR TULANG KORTIKAL**

Skripsi

Oleh

**NOVRY ROMADHANI DWIPUTRA
NPM 2155021005**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

**KAJIAN MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM
INOPHYLUM*) SEBAGAI PELUMAS NABATI PADA
PEMESINAN FRAIS DAN BOR TULANG KORTIKAL**

Oleh

NOVRY ROMADHANI DWIPUTRA

NPM 2115021005

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2026

ABSTRAK

KAJIAN MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM INOPHYLLUM*) SEBAGAI PELUMAS NABATI PADA PEMESINAN FRAIS DAN BOR TULANG KORTIKAL

OLEH

NOVRY ROMADHANI DWIPUTRA

Minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) merupakan salah satu minyak nabati yang berpotensi digunakan sebagai fluida pemotongan ramah lingkungan dalam proses pemesinan. Minyak ini memiliki keunggulan berupa biodegradabilitas, sifat pelumasan yang baik, serta tidak bersaing dengan kebutuhan pangan karena berasal dari sumber non-edible. Namun, kelemahan utama minyak nabati adalah stabilitas termal dan oksidatif yang relatif rendah, sehingga diperlukan pengembangan melalui formulasi atau teknik aplikasi yang tepat. Penggunaan Minimum Quantity Lubrication (MQL) menjadi salah satu solusi pelumasan modern yang efisien dan ramah lingkungan, karena hanya menggunakan fluida dalam jumlah sangat kecil. Kombinasi minyak nyamplung dengan metode MQL berpotensi meningkatkan kinerja pemesinan melalui penurunan gesekan, pengurangan panas, serta penurunan keausan pahat. Penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan minyak nyamplung sebagai fluida pemotongan berbasis MQL pada proses frais material tulang kortikal yang membutuhkan presisi tinggi, seperti pada aplikasi implan. Evaluasi dilakukan terhadap performa pemesinan yang meliputi kekasaran permukaan, keausan pahat, serta efisiensi proses. Diharapkan, penggunaan minyak nyamplung dengan metode MQL dapat menjadi alternatif fluida pemotongan yang lebih berkelanjutan, efektif secara teknis, serta mendukung konsep manufaktur ramah lingkungan.

Kata Kunci: minyak nyamplung, fluida pemotongan, MQL, pemesinan frais, tulang kortikal, pelumas nabati

ABSTRACT

A STUDY OF NYAMPLUNG (CALOPHYLLUM INOPHYLLUM) OIL AS A VEGETABLE LUBRICANT IN MILLING AND DRILLING OF CORTICAL BONE

BY

NOVRY ROMADHANI DWIPUTRA

Nyamplung oil (Calophyllum inophyllum) is a vegetable oil with strong potential as an environmentally friendly cutting fluid in machining processes. It offers advantages such as biodegradability, good lubricating properties, and does not compete with food resources since it is derived from non-edible sources. However, its main limitation lies in relatively low thermal and oxidative stability, requiring further development through formulation or appropriate application techniques. Minimum Quantity Lubrication (MQL) is an efficient and environmentally friendly lubrication method, as it uses only a very small amount of fluid. The combination of nyamplung oil with MQL has the potential to improve machining performance by reducing friction, lowering temperature, and minimizing tool wear. This study focuses on the application of nyamplung oil as an MQL-based cutting fluid in the milling process of cortical bone material, which requires high precision, such as in implant applications. The evaluation includes surface roughness, tool wear, and process efficiency. It is expected that this approach can provide a more sustainable and technically effective alternative cutting fluid while supporting environmentally friendly manufacturing.

Keywords: *nyamplung oil, cutting fluid, MQL, milling machining, cortical bone, vegetable lubricant*

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : **Kajian Minyak Nyamplung (*calophyllum inophyllum*) Sebagai Pelumas Nabati Pada Pemесinan Frais dan Bor Tulang Kortikal**

Nama Mahasiswa : **Novry Romadhani DwiPutra**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2155021005**

Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Pembimbing 1

Pembimbing 2

Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. **Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T.**

NIP. 197108171998021003

NIP. 2062776677130173

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

NIP. 198408162000121001

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.

NIP. 197908212003121003

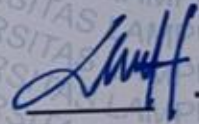
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

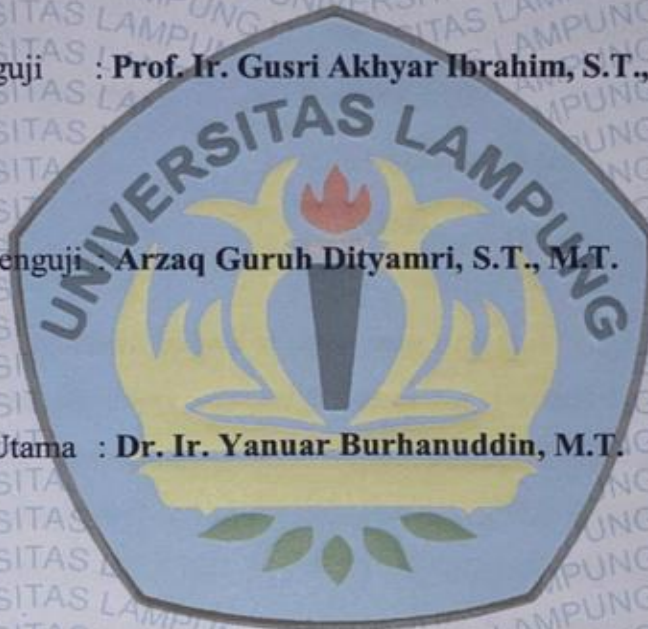
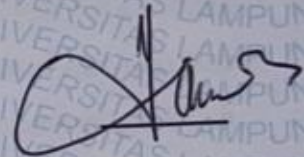
Ketua Penguji : **Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D**



Anggota Penguji : **Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T.**



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



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **16 April 2026**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Novry Romadhani DwiPutra
Nomor Pokok Mahasiswa : 2155021005
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Kajian Minyak Nyamplung (*calophyllum inophyllum*) Sebagai Pelumas Nabati Pada Pemesinan Frais dan Bor Tulang Kortikal ” adalah hasil karya ilmiah saya sendiri yang disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana di Universitas Lampung. Seluruh isi tidak mengandung karya orang lain, kecuali yang telah dikutip dan dicantumkan dalam daftar pustaka sesuai kaidah ilmiah. Apabila pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung.

Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan saya bersedia menanggung segala akibat yang ada, apabila pernyataan ini tidak benar.

Bandar Lampung, 22 April 2026



Novry Romadhani Dwi Putra
NPM 2155021005

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, Lampung pada tanggal 04 Juli 2002 sebagai anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Marpa'I dan Ibu Nurbaiti. Penulis beralamat di Perumahan Griya Abdi Negara Blok B11 no.15, Sukabumi Bandar Lampung, Provinsi Lampung. Penulis mengawali pendidikan di SD Negeri 2 Sawah Lama (2009-2015), SMP Negeri 4 Bandar Lampung (2015-2018), SMK SMTI Bandar Lampung (2018-2019), Universitas Lampung (2021-sekarang). Pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur SMPTN BARAT.

Selama menjadi mahasiswa , penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai sekertaris bidang organisasi dan kepemimpinan (ORGAPIN) periode 2022/2023 dan pernah menjadi Ketua Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) periode 2023/2024. Selanjutnya penulis mengikuti Kerja Praktik di BRIN PRTTG Subang. Penulis melakukan penelitian di bidang manufaktur dengan judul “Kajian Minyak Nyamplung (*calophyllum inophyllum*) Sebagai Pelumas Nabati Pada Pemesinan Frais dan Bor Tulang Kortikal ”. Di bawah bimbingan Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T. serta Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, S.T., M.T. sebagai pembahas.

MOTTO

“Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan) tetaplah bekerja keras
(untuk urusan yang lain).”

(Qs. Insyirah:7)

“aku membahayakan nyawa ibuku untuk lahir didunia, jadi tidak mungkin aku
tidak ada artinya”

(Penulis)

“Diatas Sang Maha Daya semua kendali terambil alih,
Jalanmu kan sepanjang niatmu, buka lagi visimu, kau tahu mana urutan satu.”

(33x – Perunggu)

“Semua akan indah pada waktunya dan semua akan baik baik saja. Pada akhirnya
semua ini hanya permulaan.”

(Allizwell)

PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati,
Saya mempersembahkan karya sederhana ini
Sebagai ungkapan cinta, kasih sayang, dan rasa terimakasih saya

KARYA TULISKU INI AKU PERSEMBAHKAN KEPADA :

Ayah Alm.Marpa'i, Ibu Nurbaity dan Kakak Adha Agung Wijaya Saputra,
yang dengan segala keterbatasan dan pengorbanan tanpa pamrih, selalu
mengiringi setiap langkah penulis dengan doa dan kasih sayang yang tak pernah
terucap, menjadi alasan utama penulis untuk terus bertahan dan menyelesaikan
skripsi ini.

Serta teman-teman teknik mesin 21 dan Himatem yang telah
bersama-sama melewati masa perkuliahan dengan segala cerita, perjuangan,
dan kebersamaan hingga akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji dan Syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Kajian Minyak Nyamplung (*calophyllum inophyllum*) Sebagai Pelumas Nabati Pada Pemesinan Frais dan Bor Tulang Kortikal ”. Laporan Skripsi ini disusun untuk melengkapi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Skripsi bagi mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin.

Penyusunan Skripsi ini berhasil berjalan dengan baik berkat peran serta dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang ditunjukkan kepada :

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.,Sc. Selaku ketua program studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T. Ph.D., IPU. selaku dosen pembimbing akademik.
5. Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T.,M.T., PhD. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam penyusunan Skripsi.
6. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam penyusunan Skripsi.

7. Bapak Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T. yang berkenan menjadi dosen pembahas dan memberikan kritik dan saran pada skripsi ini.
8. Seluruh staf program studi S1 Teknik Mesin yang telah membantu dan memberikan pengarahan dalam proses kepengurusan berkas perkuliahan
9. Kedua orang tua penulis Ayah Alm. Marpa'i, Ibu Nurbaity, kakak Adha Agung Wijaya Saputra, serta keluarga besar penulis yang penulis cintai dan selalu memberi doa, motivasi, semangat dan dukungan penuh dalam menyelesaikan program studi Teknik Mesin di Universitas Lampung.
10. Teman sekaligus sahabat saya yaitu, Parkiran Mba Desi 23, Kos Gun grup (Pppp), RBP,Teman Rumah, Kantin Uni dan Himatem Unila yang buat saya menjadi lebih berkembang seperti sekarang
11. Perunggu,Hindia,Bernadya,Oasis,TheJansen,SO7,Salpriadi,Danilla,dll.
Yang telah menemani saya dengan lagu lagunnya hingga memotivasi semangat belajar say
12. Teman-teman Angkatan 2021 Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan dukungan kepada penulis.
13. Semua pihak yang telah memberi dorongan, dukungan dan bimbingan dalam membantu penyelesaian skripsi.

Semoga laporan skripsi ini bisa menjadi sumber referensi yang bermanfaat untuk menambah pengetahuan bagi para pembaca. Penulis memohon maaf jika terdapat kesalahan atau kekurangan dalam pelaksanaan maupun penulisan laporan ini. Demikian yang dapat penulis sampaikan, atas perhatian dan kontribusi dari semua pihak, penulis ucapkan terima kasih.

Bandar lampung, 22 April 2026
Penulis

Novry Romadhani DwiPutra
NPM. 2155021005

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tulang.....	6
2.1.1 Tulang kortikal	6
2.1.2 Tulang trabekular (<i>spons</i>).....	8
2.1.3 Microstruktur tulang	8
2.2 Potensi Minyak Nyamplung (<i>Calophyllum Inophyllum</i>).....	9
2.2.1 Reduksi keausan pahat dan efisiensi pelumasan	11
2.2.2 Potensi biokompatibilitas dan permukaan halus	11
2.3 Parameter Pemesinan Frais.....	11
2.4 Pemesinan Frais Terhadap Material Implan	14
2.5 <i>Minimum Quantity Lubrication</i> (MQL)	18
2.6 Kekasaran Permukaan	19
2.7 Metode Response Surface Methode (RSM).....	22

2.7.1 Penggunaan Response Surface Methode (RSM)	22
2.7.2 <i>Box-Behnken Design</i> (BBD).....	24
2.7.3 Analisis Of Varian (ANOVA).....	26
III. METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	28
3.1.1 Tempat penelitian	28
3.1.2 Waktu penelitian.....	29
3.2 Diagram Alur	30
3.3 Alat dan Bahan	31
3.3.1 Alat	31
3.3.2 Bahan.....	35
3.4 Prosedur Penelitian	39
3.5 Mekanisme Pemesinan Frais	40
3.5.1 Prosedur pengukuran kekasaran	41
IV. HASIL DAN DATA	43
4.1 Data Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Tulang Kortikal.....	43
4.2 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA) Untuk Kerasaran Permukaan Tulang.....	44
4.3 Normal Plot Residual.....	47
4.4 Kualitas Permukaan Tulang yang Dihasilkan Pasca Pemesinan Frais.....	49
4.5 Perbaikan Kualitas Lubang Menggunakan Pelumas Minyak Nyamplung Pada Pemesinan Bor	51
V. KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Rencana kegiatan penelitian.....	29
2. Spesifikasi CNC <i>milling</i>	32
3. Spesifikasi <i>end mill</i>	33
4. Spesifikasi <i>surface roughness tester</i>	34
5. Spesifikasi mikroskop USB	35
6. Tulang kortikal	36
7. Spesifikasi pelumas minyak nyamplung	37
8. Spesifikasi pelumas VCO	38
9. Parameter pemotongan.....	39
10. Parameter penelitian <i>box-behnken</i>	39
11. Hasil pengukuran kekasaran permukaan tulang kortikal	43
12. <i>Fit summary</i> untuk kekasaran permukaan tulang.....	44
13. ANOVA untuk kekasaran permukaan tulang	46
14. ANOVA untuk ketinggian burr.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Gambaran haversian, termasuk osteosit (Os), osteoblas (Ob), dan sel endotel (En), ditampilkan pada pembesar 1000x dengan pewarnaan pada perbesaran.....	7
2. Gambaran Haversian, termasuk osteosit (Os), osteoblas (Ob), dan sel endotel (En), ditampilkan pada perbesaran 1000x dengan pewarnaan Haematoxylin Eosin.....	9
3. Dari biji hingga penghilangan getah minyak nyamplung.....	10
4. Parameter pemesinan frais.....	15
5. Geometri mata pahat (endmill).....	17
6. Skema proses pemesinan fres dengan MQL.....	19
7. Parameter kekasaran permukaan.....	20
8. Pengukuran kekasaran permukaan.....	22
9. Plot metode permukaan respon.....	24
10. Penggambaran titik pada BBD.....	25
11. Tempat penelitian laboratorium produksi SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo.....	28
12. Tempat penelitian laboratorium metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.....	29
13. Diagram alur.....	30
14. CNC <i>milling</i>	31
15. Pahat <i>end mill</i> rahang 4.....	33
16. <i>Surface roughness tester</i>	34
17. Mikroskop USB.....	35
18. Spesimen uji.....	36

19. Pelumas minyak nyamplung	37
20. Pelumas VCO (Virgin Coconut Oil).....	38
21. Ilustrasi mekanisme proses pemesinan CNC <i>Milling</i> menggunakan teknik MQL.....	41
22. Plot residual berdistribusi normal (kekasaran permukaan).....	49
23. (a) $n=1040$ rpm, $f= 65$ mm/min, VCO; (b) $n= 1320$ rpm, $f=65$ mm/min, pelumas nyamplung.	51
24. Gambaran perbaikan kualitas lubang menggunakan pelumas minyak nyamplung pada pemesinan bor.....	55

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak namplung (*Calophyllum inophyllum*), merupakan salah satu minyak nabati yang berpotensi besar untuk digunakan sebagai fluida pemotongan ramah lingkungan. Minyak ini dinilai lebih aman dan sehat dibandingkan pelumas berbasis minyak mineral, karena memiliki sifat dapat terurai secara hayati dan tidak menimbulkan limbah berbahaya. Dalam beberapa dekade terakhir, minyak nabati menarik perhatian sebagai alternatif pelumas karena memiliki titik nyala, viskositas, dan sifat pelumasan yang lebih baik dibandingkan minyak mineral. (Wulandari et al., 2020). Meskipun demikian, kelemahan utamanya adalah stabilitas termal dan oksidatif yang rendah. Keterbatasan ini dapat diatasi melalui modifikasi kimia, penambahan aditif, atau pencampuran dengan minyak lain guna meningkatkan performanya dalam aplikasi industri minyak nyamplung telah diteliti dalam banyak studi dengan penggunaannya sebagai pelumas pemesinan di industri modern.

Sebuah studi pada minyak nyamplung menunjukkan bahwa minyak ini mampu memanfaatkan *cutting fluid* ramah lingkungan dengan koefisien gesek rendah, dimana nilai koefisien gesek tersebut yakni sebesar 0,072, angka ini lebih rendah dari beberapa pelumas komersial yang acap kali dipakai; contohnya adalah minyak kelapa murni 0,1 dan pelumas sintetik 0,05-1,5. (Milano et al,2022). Dikarenakan mampu mengurangi gesekan dan panas dengan efektif dan memiliki koefisien gesek yang rendah, maka minyaknya nyamplung sangat cocok untuk diterapkan dalam pemesinan bor pada tulang kortikal menggunakan metode ini. Hal ini membantu

meningkatkan ketelitian dari dimensi celah dan meminimalisir kerusakan jaringan, seperti yang sudah dideskripsikan dalam studi sebelumnya. (Milano et al., 2022).

Penggunaan fluida pemotongan yang tidak ramah lingkungan telah menimbulkan berbagai masalah, baik terhadap kesehatan operator maupun terhadap ekosistem. Efek jangka panjangnya mencakup peningkatan risiko penyakit serta pencemaran lingkungan akibat limbah oli mineral. Hal ini mendorong kebutuhan mendesak akan alternatif yang lebih berkelanjutan. Salah satu solusi yang kini tengah berkembang adalah penggunaan minyak nabati biodegradable, khususnya minyak nyamplung. Minyak nabati ini dinilai mampu meningkatkan efisiensi proses pemesinan sekaligus meminimalkan dampak lingkungan, sejalan dengan arah industri menuju manufaktur berkelanjutan. (Zhang et al., 2023).

Selain pemilihan jenis pelumas nabati, metode pelumasan juga memiliki peran penting. *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) merupakan teknik pelumasan modern yang menyemprotkan fluida dalam jumlah sangat kecil (5–100 mL/jam) ke zona potong dalam bentuk *aerosol*. Berbeda dari metode pendinginan membanjiri yang boros dan menghasilkan banyak limbah, MQL lebih efisien, hemat biaya, dan ramah lingkungan. Penggabungan MQL dengan berbasis minyak nyamplung berpotensi menciptakan sistem pelumasan yang efektif sekaligus berkelanjutan. Dalam proses pemesinan seperti *turning*, *milling*, dan *drilling*, tantangan utama seperti panas berlebih, gaya potong tinggi, serta keausan alat dapat diatasi secara lebih efektif dengan pendekatan ini. Penggunaan MQL terbukti mampu mengurangi konsumsi 8 persen limbah, dan menurunkan dampak negatif terhadap operator dan lingkungan (Kumar et al., 2024).

Minyak nyamplung memiliki sifat viskositas dan kestabilan oksidasi yang baik, serta mengandung senyawa bioaktif yang berpotensi menurunkan gesekan dan suhu pemotongan. Selain itu, sebagai minyak nabati non-edible,

penggunaannya tidak bersaing dengan kebutuhan pangan dan lebih ramah lingkungan. Penelitian oleh Hamni et al. (2022) menunjukkan bahwa penerapan pelumas berbasis minyak nabati dengan teknik *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) pada proses frais magnesium mampu menurunkan kekasaran permukaan secara signifikan

Dengan mempertimbangkan potensi minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) sebagai fluida dasar yang ramah lingkungan, serta keunggulan termofisik dari pelumas, dan efisiensi metode MQL, maka penelitian ini difokuskan pada penerapan minyak nyamplung sebagai pelumas dalam proses pemesinan, terhadap material yang digunakan yaitu tulang kortikal. Oleh karena itu, dalam proses pembuatannya diperlukan teknik pemesinan yang presisi dan ramah lingkungan untuk menjaga kualitas permukaan dan integritas material tersebut. Proses frais dipilih karena mampu menghasilkan bentuk geometris yang kompleks dengan akurasi tinggi, yang sangat dibutuhkan dalam pembuatan komponen implan. Penggunaan pelumas berbasis minyak nyamplung diharapkan dapat meningkatkan performa pemesinan melalui pendinginan dan pelumasan yang lebih baik, serta mendukung pendekatan yang lebih berkelanjutan serta menilai performa pemesinan meliputi penurunan keausan pahat, peningkatan kualitas permukaan, dan efisiensi proses. Diharapkan pendekatan ini dapat memberikan solusi inovatif berupa fluida pendingin alternatif yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga berkontribusi terhadap prinsip manufaktur yang bertanggung jawab dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang didapat yaitu:

- a. Seberapa besar potensi minyak nyamplung digunakan sebagai pelumas nabati dalam meningkatkan kualitas permukaan tulang pada proses pemesinan frais?

- b. Seberapa besar pengaruh penggunaan pelumas nabati berbasis minyak nyamplung terhadap nilai kekasaran permukaan hasil pemesinan implan tulang kortikal?
- c. Seberapa besar Perbaikan kualitas permukaan material implant menggunakan pelumas nyamplung pada pemesinan frais dan pemesinan bor?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang hendak dicapai pada penelitian ini adalah:

- a. Menentukan potensi minyak nyamplung sebagai pelumas dan melakukan uji pemesinan frais dan pemesinan bor pada tulang kortikal.
- b. Menentukan seberapa pengaruh signifikan menggunakan pelumas nabati berbasis minyak nyamplung dalam hasil pemesinan implan tulang kortikal.
- c. Perbaikan kualitas permukaan dibandingkan menggunakan pelumas nyamplung pada pemesinan frais dan pemesinan bor.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Potensi minyak nyamplung hanya untuk mengurangi keausan pada pemesinan implan tulang.
- b. Penelitian difokuskan hanya pada penggunaan minyak nyamplung dan VCO sebagai basis pelumas nabati untuk proses pemesinan frais tulang kortikal menggunakan metode MQL.
- c. Parameter dalam penelitian ini hanya kecepatan putar, *feed rate*, dan cairan pendingin (pelumas nabati).
- d. Metode pendinginan yang digunakan dalam penelitian ini hanya dengan sistem MQL.
- e. Variasi kecepatan putar dalam penelitian ini hanya 660, 1040, 1320 RPM.

f. Variasi *feed rate* dalam penelitian ini hanya 45, 55, dan 65 mm/min.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I, Pada bab ini berisikan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan dari dilaksanakannya penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II, Pada bab ini berisikan mengenai teori yang berhubungan dan mendukung pembahasan masalah yang diambil yaitu pelumas nabati dan Aplikasi dalam Pemesinan Material Implan, Potensi Minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*), Pemesinan Frais Terhadap Material Implan, *Minimum Quantity Lubrication* (MQL), dan kekasaran permukaan.

BAB III, Bab ini berisikan tentang metode-metode yang digunakan penulis dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan. Berikut beberapa tahap yang dilakukan, yaitu tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan penelitian, prosedur pengujian, dan diagram alir pelaksanaan penelitian.

BAB IV, Bab ini berisikan tentang data serta hasil penelitian dan perhitungan yang telah didapatkan selama penelitian.

BAB V, Pada bab ini membahas mengenai kesimpulan yang didapat dari pembahasan serta memberikan saran selama kegiatan pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA, Bab ini merupakan referensi daftar berisi informasi mengenai judul buku, nama pengarang, penerbit, dan sebagainya.

LAMPIRAN, Bab ini merupakan dokumen tambahan atau pendukung seperti gambar atau foto selama kegiatan pelaksanaan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tulang

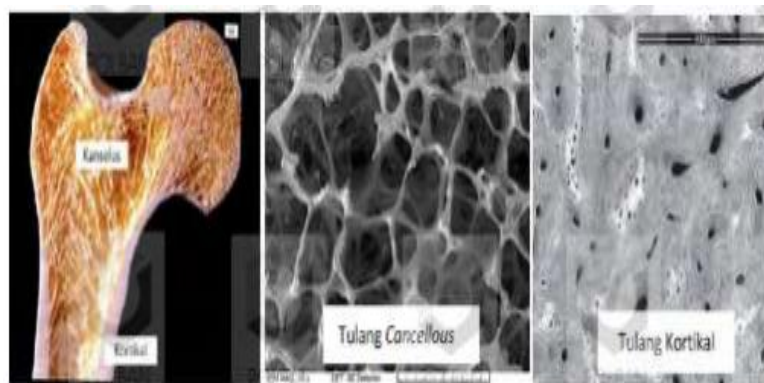
Tulang memiliki peran penting dalam tubuh manusia, baik secara struktural maupun fungsional. Secara mekanis, tulang bertindak sebagai penopang tubuh, memungkinkan postur dan pergerakan dengan menjadi titik perlekatan bagi otot rangka. Selain itu, tulang juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan mineral penting seperti kalsium dan fosfor, serta sebagai lokasi utama pembentukan sel darah melalui sumsum tulang. Tak hanya itu, tulang turut melindungi organ-organ vital seperti otak, jantung, paru-paru, dan sumsum tulang belakang. Di samping berbagai fungsi tersebut, tulang juga merupakan salah satu sumber utama *mesenchymal stem cell* (MSC) dalam tubuh, yang berperan dalam regenerasi jaringan. Kombinasi antara kekakuan dan elastisitas struktur tulang memungkinkan kekuatan serta ketahanan terhadap fraktur. Variasi bentuk tulang seperti tulang panjang, pipih, pendek, maupun tidak beraturan menentukan peran spesifiknya dalam tubuh (Bilgiç et al., 2020).

2.1.1 Tulang kortikal

Tulang kortikal merupakan jenis jaringan ikat yang tersusun dalam bentuk lapisan-lapisan yang dikenal sebagai *lamellae*. Ketebalan dan konfigurasi lamellae ini bervariasi antar tulang, tergantung pada fungsi dan lokasi anatominya. Tulang-tulang penopang beban besar seperti femur, misalnya, memiliki *lamellae* yang lebih tebal dan jumlahnya lebih banyak dibandingkan dengan tulang ekstremitas atas yang

menerima beban lebih ringan. Secara umum, ketebalan *lamellae* juga meningkat pada area-area tulang yang menerima tekanan paling besar seperti bagian anterior dan medial femur dibandingkan dengan bagian lateral dan posteriornya. Susunan serat kolagen dalam *lamellae* ini sangat terorganisir, membentuk pola melingkar yang memberikan kekuatan struktural untuk menahan tekanan fisiologis sehari-hari. Secara keseluruhan, jaringan tulang kortikal menyumbang sekitar 80% dari massa kerangka tubuh manusia. Setiap permukaan tulang dibungkus oleh membran tipis yang disebut periosteum.

Berikut pada Gambar 1 yang menunjukkan tulang dibentuk oleh tiga jenis sel utama yang memiliki fungsi berbeda dalam siklus hidup jaringan tulang. Sel *osteoklas*, yang berukuran sekitar 20–100 μm , bertugas untuk meresorpsi dan membongkar jaringan tulang yang sudah tua. Sementara itu, *osteoblas* yang berukuran lebih kecil sekitar 20–25 μm berperan dalam sintesis komponen organik tulang dan pembentukan matriks tulang baru. Saat aktif, osteoblas berbentuk kubus, namun ketika tidak aktif, bentuknya menjadi lebih pipih atau kosong. Setelah menyelesaikan pembentukan matriks, sebagian osteoblas akan berdiferensiasi menjadi osteosit, yaitu sel yang berperan dalam menjaga dan memelihara matriks tulang yang telah mengalami proses mineralisasi (Bilgiç et al., 2020).



Gambar 1. Gambaran *haversian*, termasuk *osteosit* (Os), *osteoblas* (Ob), dan sel *endotel* (En), ditampilkan pada pembesaran 1000x dengan pewarnaan pada perbesaran.
(Sumber: Bilgic et al., 2020)

2.1.2 Tulang trabekular (*spons*)

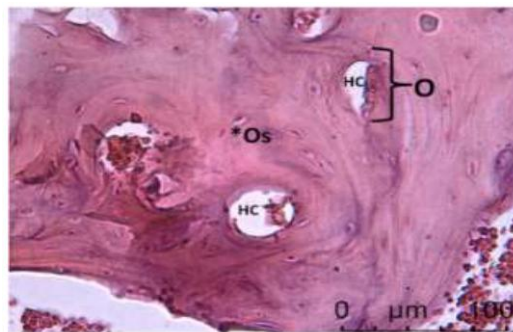
Tulang trabekuler merupakan jenis jaringan ikat yang tersusun dari lamellae, namun berbeda dengan tulang kortikal, susunan serat kolagen di dalam lamellae tulang trabekuler bersifat tidak teratur. Struktur ini membentuk jalinan trabekula yang saling terhubung, menciptakan jaringan seperti anyaman di dalam tulang. Tulang trabekuler umumnya ditemukan di bagian dalam metafisis dan epifisis tulang panjang, serta mengisi rongga meduler dan sebagian besar tulang pendek. Dibandingkan dengan tulang kortikal, tulang trabekuler menunjukkan aktivitas *metabolik* yang lebih tinggi, termasuk dalam hal produksi sel tulang dan pertukaran mineral, menjadikannya lebih aktif secara biologis.

2.1.3 Microstruktur tulang

Tulang dewasa, atau dikenal juga sebagai tulang sekunder, tersusun atas *lamellae* yang dapat terorganisir secara teratur maupun tidak teratur, serta mengandung sistem *Haversian* pada tulang kortikal atau sistem trabekuler pada tulang spons. Struktur mikro tulang, baik kortikal maupun trabekuler, terbentuk dari matriks *ekstraseluler organik* (ECM) yang terdiri atas kolagen tipe I sebagai komponen utama, disertai air dan kristal hidroksiapatit (HA). Perbedaan proporsi dan susunan antara serat kolagen dan mineral inilah yang membedakan karakteristik masing-masing jenis tulang. Dalam ECM, serat kolagen tersusun membentuk *lamellae* yang sejajar dan spiral, menciptakan pola struktural yang khas. Di antara serat kolagen tersebut terselip kristal nano hidroksiapatit, yang berperan penting dalam memberikan kekakuan dan kekuatan mekanik pada jaringan tulang.

Pada Gambar 2, menunjukkan struktur mikroskopis tulang dewasa (tulang sekunder) yang didominasi oleh sistem *Haversian* atau *osteon*.

Terlihat adanya saluran *Havers* (HC) di bagian tengah yang berfungsi sebagai jalur pembuluh darah dan saraf, dikelilingi oleh *lamellae konsentris* yang tersusun melingkar. Pada *lamellae* ini tampak pola cincin yang menunjukkan susunan serat kolagen yang terorganisir secara teratur. Di antara *lamellae* terdapat osteosit (Os) yang berada dalam lakuna, berperan dalam pemeliharaan jaringan tulang. Susunan konsentris ini mencerminkan kemampuan tulang dalam menahan beban mekanik secara optimal, karena distribusi gaya dapat disebarkan melalui struktur melingkar tersebut. Selain itu, kerapatan dan keteraturan *lamellae* menunjukkan tingkat mineralisasi yang tinggi akibat *deposisi* kristal *hidroksiapatit*, sehingga tulang tampak lebih kompak dan kuat dibandingkan tulang primer. (Bilgiç et al., 2020).



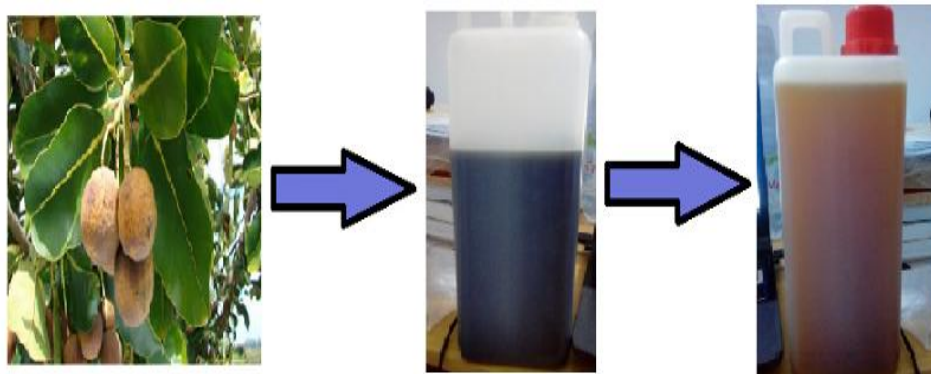
Gambar 2. Gambaran *Haversian*, termasuk *osteosit* (Os), *osteoblas* (Ob), dan sel *endotel* (En), ditampilkan pada perbesaran 1000x dengan pewarnaan *Haematoxylin Eosin*.
(Sumber: Bilgiç et al., 2020)

2.2 Potensi Minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*)

Minyak nyamplung diekstraksi dari biji *Calophyllum inophyllum* dan kaya asam oleat (34-53%), linoleat, stearat, dan palmitat. Viskositasnya yang cukup tinggi menghasilkan film pelumas yang baik, sementara sifat antyoksidan alami memberikan stabilitas termal di suhu operasi tinggi. Hal ini penting untuk mencegah degradasi selama pemesinan. Minyak nyamplung menunjukkan bahwa transformasi kimia tersebut dapat mengurangi

keasaman, memperkuat kestabilan dan umur simpan fitur penting dalam formulasi pelumas nabati. Minyak nyamplung memperlihatkan minyak nyamplung yang telah diesterifikasi cocok dijadikan basis biolubricant karena *viskositas* dan performa oksidatifnya bertambah baik,

Pada Gambar 3, memperlihatkan bentuk fisik bahan atau media yang digunakan dalam proses pemanfaatan minyak nyamplung, yang tampak sebagai struktur padat berpori dan berserat. Tekstur yang terlihat menunjukkan adanya rongga-rongga atau pori yang cukup banyak, sehingga memungkinkan material ini berperan sebagai media penahan atau penyerap minyak. Struktur berpori ini sangat mendukung dalam aplikasi pelumasan, karena mampu menahan dan melepaskan minyak secara bertahap selama proses pemesinan berlangsung. Selain itu, permukaan yang tidak rata dan berserat dapat meningkatkan luas kontak, sehingga distribusi minyak nyamplung menjadi lebih merata. Hal ini berkaitan dengan kemampuan minyak nyamplung yang memiliki viskositas tinggi untuk membentuk lapisan film pelumas yang stabil, sehingga gesekan dapat dikurangi dan temperatur kerja dapat lebih terkontrol. (Sugara et al., 2023).



Gambar 3. Dari biji hingga penghilangan getah minyak nyamplung.
(Sumber: Wulandari et al., 2020)

Minyak nyamplung menunjukkan karakteristik termal dan tribologis yang menjanjikan untuk digunakan sebagai fluida pemotong dalam proses pemesinan. Studi awal pada sifat dasar menunjukkan bahwa CIO memiliki titik nyala (*flash point*) sekitar 112 °C dan titik tuang (*pour point*) 89 °C,

menjadikannya lebih aman dan beroperasi dalam kondisi suhu yang luas dibandingkan minyak mineral biasa. Viskositasnya yang tinggi pada 40 °C menciptakan film pelumas yang stabil di antara pahat dan benda kerja, membantu menurunkan suhu operasi dan memperlambat keausan pahat dalam proses turning dan milling (Wulandari et al., 2020). Berikut potensi minyak nyamplung dalam pemesinan material implan:

2.2.1 Reduksi keausan pahat dan efisiensi pelumasan

Penelitian oleh Ilyas et al. (2024) menguji kombinasi minyak nyamplung oli dromus air pada variasi rasio 25:25:50% dalam proses bubut HSS pada baja S45C. Hasilnya menunjukkan bahwa formulasi ini secara signifikan mengurangi keausan pahat, terutama dibanding pelumas konvensional. Variasi campuran terbukti menjaga suhu pemotongan, sehingga mencegah degradasi geometri pahat aspek penting ketika mengerjakan material implan yang membutuhkan pahat dengan presisi sangat tinggi.

2.2.2 Potensi biokompatibilitas dan permukaan halus

Hasil penurunan keausan dan suhu ini sangat penting dalam pemesinan *stainless steel* 316L bahan umum implan medis. Permukaan halus dan bebas *mikro-kontaminan* adalah kunci keberhasilan proses osseointegrasi, mekanisme pelumasan alami dari minyak nabati seperti nyamplung diyakini memberikan efek serupa pada baja implan, mengurangi kerusakan permukaan pada tingkat mikro.

2.3 Parameter Pemesinan Frais

Parameter yang dapat diatur merujuk pada elemen-elemen pemesinan yang bisa langsung disesuaikan oleh operator saat menjalankan mesin frais. Seperti

halnya pada mesin bubut, parameter ini meliputi putaran spindel (n), gerak makan (f), dan kedalaman potong (a). Pengaturan putaran spindel dilakukan dengan memindahkan tuas pengatur kecepatan yang tersedia di mesin. Sementara itu, gerak makan bisa disesuaikan melalui tuas pengatur yang mengacu pada tabel gerak makan pada mesin tersebut. Dalam proses frais, dikenal dua jenis gerak makan, yaitu gerak makan per gigi (mm/gigi) dan gerak makan per putaran (mm/putaran). Untuk mengatur kedalaman potong, operator bisa menaikkan posisi benda kerja atau menurunkan posisi pahat.

Nilai putaran spindel ditentukan berdasarkan kecepatan potong, yang merupakan hasil dari kombinasi jenis material pahat dan benda kerja. Kecepatan potong sendiri didefinisikan sebagai jarak yang ditempuh oleh satu titik pada keliling pahat dalam satu menit dan diukur dalam meter. Rumus perhitungannya sama dengan rumus kecepatan potong pada mesin bubut, hanya saja dalam proses frais, ukuran diameter yang digunakan adalah diameter dari pahat itu sendiri (Hanincová et al., 2024).

a. Kecepatan putar (Rpm)

Kecepatan potong adalah panjang ukuran lilitan pahat terhadap benda kerja atau dapat juga disamakan dengan panjang tatal yang terpotong dalam ukuran meter yang diperkirakan apabila benda kerja berputar selama satu menit. Dan kecepatan potong ini mempengaruhi suhu tulang dan ketelitian dimensi tulang.

$$V = \frac{\pi dn}{1000} = \frac{m}{\text{menit}} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- 1) V : Kecepatan potong (m/menit).
- 2) d : Diameter pisau frais atau benda kerja (mm).
- 3) n : Kecepatan putaran spindel (Rpm).
- 4) π : Konstanta lingkaran (3,14).
- 5) 1000: Angka pembagi untuk mengubah satuan milimeter (d) menjadi meter agar sesuai dengan satuan V (m/menit).

- b. Gerak makan per gigi (fz) merupakan jarak yang ditempuh oleh meja mesin (benda kerja) dalam setiap putaran satu mata potong (gigi) pisau frais. Parameter ini sangat krusial karena menentukan beban yang diterima oleh setiap mata potong dan sangat berpengaruh terhadap kualitas permukaan (kekasaran) benda kerja yang dihasilkan.

$$fz = \frac{vf}{zn} = mm/menit.....(2)$$

Keterangan:

- 1) (fz) Gerak makan per gigi.
 - 2) (Vf) kecepatan makan (mm/menit).
 - 3) (z) Jumlah mata potong
 - 4) (n) Kecepatan putaran spindel (Rpm).
- c. Kedalaman potong (*Depth of Cut*) merupakan kedalaman material yang dihilangkan dalam satu kali lintasan. Kedalaman potong yang lebih besar dapat mempercepat proses, namun memerlukan daya mesin yang lebih besar dan dapat mempengaruhi defleksi pahat. Terdapat dua jenis kedalaman potong pada mesin frais:
- 1) Kedalaman potong aksial (ap): Kedalaman pahat yang masuk searah dengan sumbu putar pisau frais. Kedalaman
 - 2) Potong *adrial* (ae): Lebar bagian benda kerja yang dipotong, yang diukur tegak lurus terhadap sumbu pisau. Dalam rumus yang Anda lampirkan, lebar pemotongan ini disimbolkan dengan (w).

$$z = \frac{vf \cdot \alpha \cdot w}{1000} = cm^3/menit.....(3)$$

Keterangan:

- 1) Kecepatan makan (vf): Seberapa cepat meja mesin bergerak membawa benda kerja menuju pisau (mm/menit).
- 2) Kedalaman potong (α): Jarak masuknya ujung pisau ke dalam permukaan benda kerja secara vertikal (mm).
- 3) Lebar pemotongan (w): Lebar area yang tersayat oleh pisau dalam satu lintasan (mm).

4) Angka 1000: Merupakan faktor pembagi untuk mengonversi satuan dari milimeter kubik (mm^3) menjadi sentimeter kubik (cm^3).

d. Waktu pemotongan (t_c) merupakan waktu yang di butuhkan oleh pahat frais untuk menyelesaikan satu lintasan pemakanan pada benda kerja dari titik awal hingga titik akhir. Secara teoritis, waktu pemotongan sangat bergantung pada panjang total lintasan yang harus ditempuh dan kecepatan gerak makan yang diatur pada mesin. Berdasarkan parameter pemesinan, rumus waktu pemotongan dinyatakan sebagai berikut:

$$t_c = \frac{lt}{vf} = \text{menit} \dots \dots \dots (4)$$

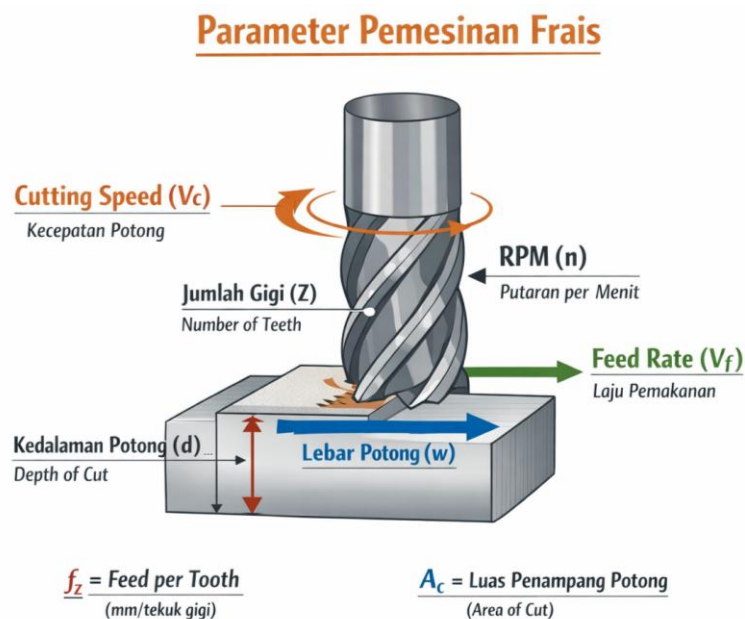
Keterangan:

- 1) Waktu pemotongan (t_c): Lama pemotongan (m).
- 2) Panjang pemotongan (lt): Merupakan panjang total lintasan pahat (mm).
- 3) Dalam praktiknya, lt biasanya mencakup panjang benda kerja ditambah dengan jarak awal (*start*) dan jarak bebas (*overtravel*) pahat agar pemotongan sempurna.
- 4) Kecepatan makan (vf) : Laju pemakanan dalam pemesinan (mm/menit).

2.4 Pemesinan Frais Terhadap Material Implan

Pemesinan frais (*milling*) merupakan proses penting dalam manufaktur komponen implan seperti titanium Ti-6Al-4V. Proses ini melibatkan kontak bergesekan tinggi antara pahat dan benda kerja, menghasilkan penurunan material dengan tingkat keausan alat tinggi serta akumulasi panas di zona potong. Pada material implan, kontrol suhu dan kualitas permukaan menjadi krusial karena berdampak langsung pada keberhasilan osseointegrasi dan biokompatibilitas. Penggunaan pelumas dalam pemesinan frais secara signifikan menurunkan gaya potong hingga 15%, sekaligus mengurangi suhu pemesinan sekitar 12 °C, dan meningkatkan umur pakai pahat hingga 30% (Dambatta et al., 2025).

Gambar 4, menunjukkan parameter utama dalam proses pemesian frais (milling) yang saling berkaitan dalam menentukan kualitas hasil pemotongan. Terlihat pahat frais berputar dengan kecepatan putar (RPM atau n) yang menghasilkan kecepatan potong (*cutting speed*, V_c), yaitu kecepatan relatif antara pahat dan benda kerja. Selain itu, terdapat jumlah gigi pahat (Z) yang memengaruhi banyaknya pemotongan per satu putaran. Arah gerak pemakanan ditunjukkan oleh *feed rate* (V_f), yaitu laju pergerakan benda kerja atau pahat selama proses pemotongan berlangsung. Pada benda kerja, terlihat parameter kedalaman potong (d) dan lebar potong (w) yang menentukan besarnya material yang dihilangkan, serta luas penampang potong (A_c) sebagai hasil perkalian keduanya. Parameter feed per tooth (f_z) juga ditunjukkan sebagai besarnya gerak makan untuk setiap gigi pahat. Keseluruhan parameter ini sangat penting untuk dikontrol karena akan memengaruhi gaya pemotongan, temperatur, keausan pahat, serta kualitas permukaan hasil pemesian.



Gambar 4. Parameter pemesian frais.
(Sumber: Lubis, 2024)

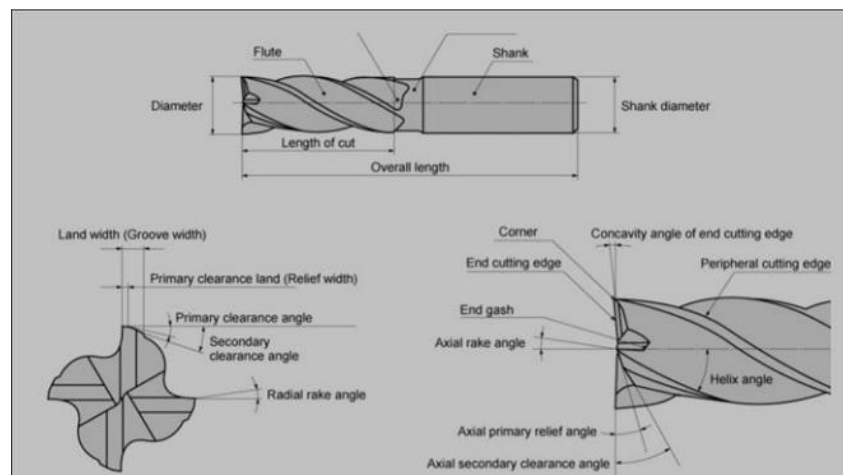
Dari Gambar 4, dapat didefinisikan beberapa parameter pemesian frais, yaitu :

- a. Kecepatan putar *spindle* (n , RPM) :Jumlah putaran pahat per menit. Kecepatan potong (*Cutting speed*, V_c): Kecepatan ujung pahat terhadap permukaan benda kerja (m/min), dihitung dari *spindle speed* dan diameter pahat.
- b. Laju pemakan (*Feed rate*, V_f): Kecepatan gerak alat terhadap benda kerja (mm/min).
- c. *Feed per tooth* (f_z): Jarak umpan per gigi *cutter* (biasa dijabarkan di banyak jurnal milling).
- d. *Depth of cut* (a_p) dan *width of cut* (a_e) juga sering dimasukkan dalam diagram parameter.

Beberapa studi menunjukkan bahwa pemesinan frais terhadap *alloy* dengan metode MQL menunjukkan bahwa surface roughness rata-rata R_a bisa turun dari $\sim 0,425 \mu\text{m}$ ke $\sim 0,311 \mu\text{m}$ saat milling TC4 *alloy* menggunakan MQL berbasis *graphene* atau nanopartikel. Permukaan yang lebih halus memungkinkan hasil implan yang lebih presisi dan mendukung proses osseointegrasi (Hu et al., 2023).

Pisau frais atau *end mill* merupakan jenis alat potong industri yang digunakan pada mesin frais (*milling machine*) untuk melakukan pemotongan material secara presisi. Berbeda dengan mata bor yang hanya memotong secara aksial (ke arah bawah), end mill dirancang dengan tepi potong pada bagian ujung dan sisi lateralnya, sehingga memungkinkan proses penyayatan ke berbagai arah (aksial, radial, maupun kombinasi keduanya). Alat ini berbasis material *micro-grain carbide*, sebuah material yang memiliki partikel sangat halus sehingga memberikan tepi potong yang lebih tajam dan kuat dibandingkan karbida standar. Keunggulan utama dari end mill ini terletak pada lapisan AlTiN (*Aluminium Titanium Nitride*) berfungsi sebagai thermal barrier (penghalang panas) super pada perkakas potong, membentuk lapisan aluminium oksida yang stabil di suhu tinggi, mencegah panas pindah ke alat potong, menjadikannya ideal untuk *dry machining* (pemesinan kering) untuk ketahanan alat yang lebih baik.

Berdasarkan Gambar 5 geometri *end mill* tersebut, terlihat bahwa setiap bagian memiliki fungsi spesifik yang mempengaruhi performa pemotongan. Bagian *flute* (alur heliks) berfungsi sebagai jalur pembuangan geram sekaligus menentukan kapasitas pemotongan, sedangkan *helix angle* (sudut heliks) berperan dalam mengurangi getaran dan meningkatkan kualitas permukaan hasil frais. Diameter dan *length of cut* menentukan kedalaman serta lebar pemotongan yang dapat dicapai, sementara shank dan shank diameter berfungsi sebagai bagian penjepit pada *spindle* mesin untuk menjaga kestabilan alat. Pada ujung pahat, terdapat *end cutting edge* dan *peripheral cutting edge* yang memungkinkan pemotongan baik secara *vertikal* maupun *horizontal*. Selain itu, sudut-sudut seperti *radial rake angle*, *axial rake angle*, serta *clearance angle* (*primary dan secondary*) dirancang untuk mengurangi gaya potong, memperlancar aliran geram, serta meminimalkan gesekan antara pahat dan benda kerja. Kombinasi seluruh parameter geometri ini sangat menentukan efisiensi proses frais, kualitas permukaan, serta umur pakai alat potong.



Gambar 5. Geometri mata pahat (endmill).
Sumber : (Putra et al., 2022)

2.5 *Minimum Quantity Lubrication (MQL)*

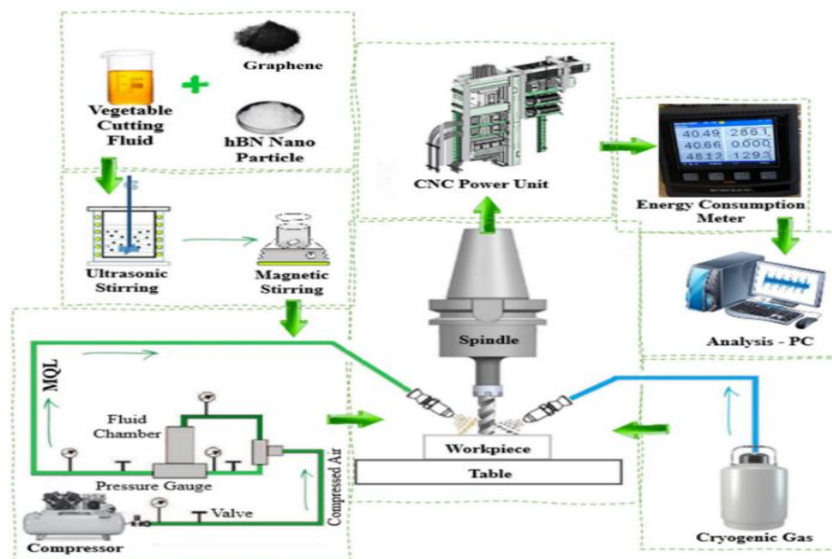
MQL dapat didefinisikan sebagai media suplai pelumasan dalam bentuk aerosol. MQL adalah teknologi terbaru dalam pemesinan yang berguna untuk mendapatkan keunggulan dalam keselamatan lingkungan dan ekonomi, dengan mengurangi penggunaan *coolant lubricant* dalam pemesinan. Dalam MQL, sejumlah kecil aliran *lubricant* digunakan dengan debit 50-100 ml/h (Yurtkuran et al., 2024).

Pelumasan kuantitas minimum merupakan penggunaan cairan pemotongan dengan kuantitas yang lebih kecil yaitu sekitar sepuluh seperseribu jumlah cairan pemotongan yang digunakan dalam pendinginan mesin. MQL mengandung campuran udara bertekanan dan tetesan mikro minyak yang ditembakkan langsung antara alat dan *chip*. Namun, pertanyaan tentang bagaimana pelumas dapat menurunkan gesekan di bawah suhu yang sangat tinggi dan beban masih belum terjawab terutama untuk proses pemesinan yang lama. Pemesinan dengan MQL hampir sama atau sering lebih baik dari pemesinan basah secara tradisional dan permukaan akhir ketika memotong baja dan aluminium paduan (Nugraha et al., 2020).

MQL umumnya menggunakan minyak nabati seperti minyak jagung, kelapa, jatropha, atau minyak ester yang ditingkatkan dengan pelumas sebagai media pemotongan. Minyak ini memiliki performa pelumasan tinggi karena struktur trigliserida bermolekul panjang dan polar, sehingga membentuk lapisan pelumas efektif pada antarmuka alat-benda kerja. Selain itu, sifatnya biodegradable dan non-toksik menjadikannya ramah lingkungan, serta mengurangi dampak buruk terhadap pekerja dan ekosistem.

Pada Gambar 6 menjelaskan proses *Minimum Quantity Lubrication (MQL)* pada gambar bekerja dengan mencampurkan fluida potong dalam jumlah sangat sedikit dengan udara bertekanan, kemudian disemprotkan langsung ke area pemotongan dalam bentuk kabut halus. *Fluida* terlebih dahulu dicampur secara merata, lalu dialirkan melalui sistem bertekanan yang dilengkapi

pengatur tekanan sebelum keluar melalui *nozzle* menuju kontak antara pahat dan benda kerja. Kabut ini berfungsi sebagai pelumas sekaligus pendingin ringan, sehingga mampu mengurangi gesekan dan panas tanpa perlu menggunakan cairan dalam jumlah besar seperti pada metode konvensional. Dengan cara ini, proses pemesinan menjadi lebih efisien, bersih, dan ramah lingkungan, sekaligus membantu memperpanjang umur alat potong. (Naveed, Arslan, 2021).



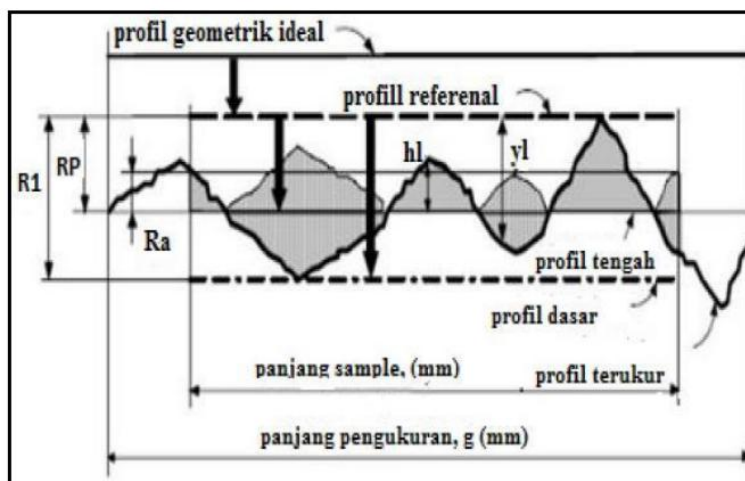
Gambar 6. Skema proses pemesinan frais dengan MQL.
Sumber : (Yurtkuran et al., 2024)

2.6 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan suatu karakteristik permukaan dan ketidakraturan konfigurasi permukaan berupa guratan yang terlihat pada profil permukaan. Kekasaran permukaan dapat juga dikatakan jarak penyimpangan rata-rata dari garis rata-rata profil. Faktor yang mempengaruhi nilai kekasaran antara lain yaitu mekanisme parameter pemotongan, geometri dan dimensi pahat, cacat pada material benda kerja dan kerusakan pada aliran geram, benda kerja yang dikerjakan dengan mesin dan dilakukan pemotongan pada permukaan tidak dapat rata atau halus sama sekali, tetapi akan

meninggalkan berkas berupa lembah atau puncak yang disebut kekasaran permukaan.

Berdasarkan Gambar 7, kekasaran permukaan ditunjukkan oleh adanya profil gelombang berupa puncak (*peak*) dan lembah (*valley*) yang terbentuk sepanjang hasil pemotongan. Pola ini mencerminkan ketidakrataan permukaan yang dihasilkan oleh interaksi antara pahat dan benda kerja selama proses machining. Jarak dan tinggi puncak-lembah tersebut menggambarkan tingkat kekasaran, di mana semakin besar penyimpangannya dari garis rata-rata, maka permukaan akan semakin kasar. Selain itu, bentuk profil yang tidak seragam dapat mengindikasikan adanya getaran (*vibration*), keausan pahat, atau ketidakstabilan proses pemotongan. Oleh karena itu, *analisis visual* terhadap profil permukaan seperti pada gambar sangat penting untuk mengevaluasi kualitas hasil pemesinan serta menentukan apakah diperlukan perbaikan pada parameter proses atau kondisi alat potong. (Aminy & Aji, 2022).



Gambar 7. Parameter kekasaran permukaan.
Sumber : (Aminy & Aji, 2021)

Dari Gambar 7 parameter kekasaran permukaan, dapat didefinisikan beberapa parameter kekasaran permukaan, yaitu :

- Kekasaran total (R_t) merupakan jarak antara garis referensi dengan garis alas.

- b. Kekasaran perataan (R_p) merupakan jarak rata-rata antara garis referensi dengan garis terukur.
- c. Kekasaran rata-rata aritmatik (R_a) merupakan nilai rata-rata aritmatik antara garis tengah dan garis terukur.
- d. Kekasaran rata-rata kuadratik (*root mean square height*), $R_q(\mu m)$ adalah akar bagi jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.
- e. Kekasaran total rata-rata, $R_z(\mu m)$ merupakan jarak rata-rata profil alas ke profil terukur pada lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil alas keprofil terukur pada lima lembah terendah.

Parameter kekasaran yang 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 , sama seperti toleransi ukuran (lubang dan poros) harga kekasaran rata-rata aritmetis R_a juga mempunyai harga toleransi kekasaran. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan antara lain kecepatan potong, kecepatan pemakanan, kedalaman potong, jenis dan kondisi pahat, serta kondisi pelumasan selama proses pemesinan. Dengan demikian, nilai kekasaran permukaan menjadi indikator penting dalam menilai kualitas hasil pemesinan karena dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara parameter pemotongan, kondisi pahat, sifat material, dan mekanisme pembentukan geram.

Hubungan antara kekasaran permukaan rata-rata (R_a) dan gerak makan (*feed*, f) pada proses pemesinan frais secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan geometrik pahat.

$$R_a = \frac{f^2}{32r} \dots\dots\dots(5)$$

- 1. Kekasaran rata-rata= R_a (mm atau μm)
- 2. Gerak makan per putaran = f (mm/rev)
- 3. Jari-jari ujung pahat = r (mm)

Berdasarkan Gambar 8, permukaan yang terlalu kasar dapat menyebabkan kegagalan fungsi komponen, meningkatkan gesekan, serta menurunkan ketahanan aus dan estetika produk. Oleh karena itu, pengendalian terhadap parameter pemesinan dan pemilihan strategi pemotongan yang tepat menjadi kunci untuk menghasilkan permukaan dengan kekasaran yang sesuai standar desain dan fungsional. . (Rizza & Pratama, 2021)



Gambar 8. Pengukuran kekasaran permukaan.
Sumber : (Rizza & Pratama, 2021)

2.7 Metode Response Surface Methode (RSM)

Response Surface Method (RSM) adalah metode statistik dan matematika yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara beberapa variabel bebas dengan satu atau lebih respon. Tujuan utama RSM adalah membangun model statistik yang mampu menggambarkan pengaruh variabel proses terhadap respon, sehingga dapat ditentukan kombinasi parameter yang paling optimal. Metode ini juga digunakan untuk memprediksi nilai respon dan membantu proses optimasi berdasarkan hubungan antara faktor dan respon yang diteliti. (Leyva-Jiménez et al., 2022).

2.7.1 Penggunaan Response Surface Methode (RSM)

Penggunaan RSM pada dasarnya mirip dengan analisis regresi karena sama-sama menggunakan metode kuadrat terkecil untuk

memperkirakan parameter, tetapi RSM dikembangkan lebih lanjut untuk mencari kondisi optimal dari suatu respon.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \dots \dots \dots (6)$$

Dimana:

Y : variabel respon

X_i : variabel bebas/faktor ($i = 1, 2, 3, \dots, k$)

ε : *error*

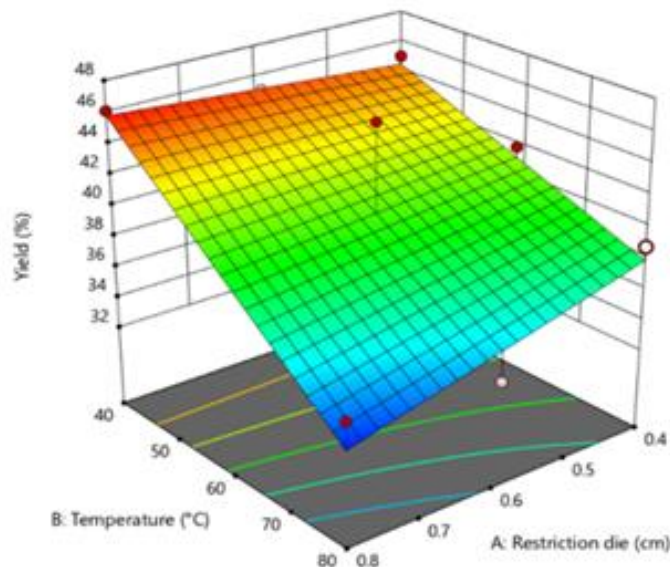
Dalam metode ini, variabel bebas (x_1, x_2, \dots, x_k) dianggap kontinu, sedangkan respon (Y) diperlakukan sebagai variabel acak. Karena hubungan matematis antara variabel bebas dan respon biasanya tidak diketahui, maka digunakan pendekatan model polinomial sederhana, misalnya regresi linier, sebagai langkah awal. Biasanya tahap awal dirumuskan model regresi polinomial dengan ordo yang rendah, misal berordo satu yang tidak lain merupakan model regresi linier, dengan persamaan berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + E \dots \dots \dots (7)$$

Jika kondisi optimum belum jelas, digunakan metode dakian tercuram untuk bergerak menuju titik dengan respon yang semakin besar hingga tidak ada peningkatan lagi. Selanjutnya, dalam kasus multi-respon, optimasi dilakukan dengan bantuan plot kontur untuk memvisualisasikan dan menentukan nilai respon terbaik.

Pada Gambar 9, menampilkan plot metode permukaan respon (*Response Surface Methodology/RSM*) yang menggambarkan hubungan antara dua variabel proses, yaitu A: ukuran *restriction die* (cm) dan B: *temperatur* ($^{\circ}\text{C}$), terhadap respon berupa *yield* (%). Permukaan berwarna menunjukkan tren perubahan *yield*, di mana gradasi warna dari biru ke merah merepresentasikan peningkatan nilai *yield*. Secara umum, terlihat bahwa *yield* cenderung meningkat pada kombinasi temperatur yang lebih rendah dan ukuran *restriction die* yang lebih kecil, yang ditunjukkan oleh area berwarna kuning hingga merah.

Sebaliknya, pada temperatur yang lebih tinggi dan ukuran *restriction die* yang lebih besar, *yield* menurun, ditunjukkan oleh area berwarna biru. Titik-titik merah pada permukaan merupakan data hasil eksperimen yang digunakan untuk membangun model, sementara garis kontur di bagian bawah memperjelas pola interaksi kedua variabel terhadap respon. Visualisasi ini menunjukkan bahwa terdapat interaksi signifikan antara temperatur dan *ukuran restriction die* dalam memengaruhi *yield*, sehingga optimasi kedua parameter tersebut penting untuk mencapai hasil yang maksimal. (Saelee et al., 2022)



Gambar 9. Plot metode permukaan respon.
Sumber : (Saelee et al., 2022)

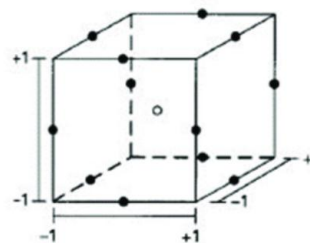
2.7.2 Box-Behnken Design (BBD)

Box-Behnken Design (BBD) ialah salah satu desain eksperimen non factorial yang pada setiap percobaannya melibatkan nilai median dari setiap faktor (*variable*). Pada desain BBD penentuan point menggunakan tiga tingkatan yaitu : untuk nilai atas atau nilai tertinggi (1), nilai tengah atau median (0), dan untuk nilai bawah adalah (-1).

Desain BBD juga biasanya digunakan sebagai desain numerik dan juga kategorial (jenis) untuk optimasi didalam eksperimen, akan tetapi menggunakan faktor kategorial (jenis) dapat meningkatkan jumlah percobaan. Dikarenakan resolusi yang tinggi dibandingkan dengan desain CCD, desain BBD dapat digunakan secara efisien untuk beberapa penelitian di berbagai bidang.

Pada Gambar 10, menunjukkan penggambaran titik percobaan pada desain *Box–Behnken* (BBD), yang merupakan salah satu metode dalam perancangan eksperimen untuk optimasi proses. Dalam BBD, titik-titik percobaan disusun secara sistematis pada kombinasi level tengah dan level tinggi-rendah dari masing-masing faktor, tanpa melibatkan titik ekstrem (*corner points*) seperti pada desain faktorial penuh. Representasi ini memperlihatkan bagaimana setiap titik berada pada posisi strategis di sepanjang sisi-sisi ruang desain, sehingga memungkinkan evaluasi pengaruh linier, interaksi, dan kuadratik antar variabel secara efisien. Pendekatan BBD memberikan keuntungan dalam mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan sekaligus tetap mampu menghasilkan model yang akurat untuk analisis permukaan respon, sehingga banyak digunakan dalam optimasi berbagai proses ilmiah dan teknik.

Run	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



Gambar 10. Penggambaran titik pada BBD.

Sumber : (Szpisják-Gulyás et al., 2023)

2.7.3 Analisis Of Varian (ANOVA)

ANOVA atau *analysis of varian* digunakan untuk mencari besarnya pengaruh dari setiap parameter kendali dari suatu proses. ANOVA, merupakan alat pengambilan keputusan statistik yang digunakan untuk mendeteksi perbedaan beberapa kinerja dari rata-rata parameter yang diuji dengan analisis varians, ANOVA adalah alat pengambilan keputusan statistik yang digunakan mendeteksi perbedaan kinerja rata-rata parameter yang diuji. Metode ANOVA digunakan untuk membandingkan rata-rata dua atau lebih variasi kelompok atau faktor untuk menentukan apakah ada perbedaan yang signifikan antar kelompok.

a. Jumlah kuadrat (*Sum of Square*)

Rumus yang digunakan untuk menghitung jumlah kuadrat dapat dilihat di bawah ini:.

$$SS = \sum x^2 - \frac{G^2}{N} \dots \dots \dots (8)$$

Dengan: x : data dari masing-masing kelompok

G : total x dari seluruh kelompok

N : jumlah sampel keseluruhan

b. Derajat kebebasan (*Degree of Freedom*)

Derajat kebebasan dalam SS dapat dihitung dengan rumus:

$$V_{SS} = n - 1 \dots \dots \dots (9)$$

Dengan: V : *degree of freedom*

SS : *sum of square*

n : jumlah sampel

c. Rata-rata kuadrat (*mean square*)

Deviasi rata-rata atau *mean square deviation* dalam ANOVA dilambangkan dengan MS.

$$MSb = \frac{SSb}{VSSb} \dots\dots\dots(10)$$

$$MS_w = \frac{SS_w}{VSS_w} \dots\dots\dots(11)$$

d. F_{tabel} dihitung dengan melihat nilai α , F_{hitung} didapatkan dengan rumus dibawah ini:

$$F_{hitung} = \frac{MSb}{MS_w} \dots\dots\dots(12)$$

Menurut (G. Ibrahim et al., 2025) Perhitungan rumus dasar ANOVA melibatkan beberapa tahapan. ANOVA untuk nilai rata-rata digunakan untuk mencari faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi hasil dari eksperimen.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu pelaksanaan penelitian yang direncanakan oleh penulis adalah sebagai berikut:

3.1.1 Tempat penelitian

Adapun tempat pelaksanaan penelitian yang akan dilakukan ini adalah sebagai berikut:

- a. Pada Gambar 11 menunjukkan proses pengujian pemesinan proses pemesinan frais dilakukan di Laboratorium Produksi, Jurusan Teknik Mesin, SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo.



Gambar 11. Tempat penelitian laboratorium produksi SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo.

- b. Pada Gambar 12 menunjukkan proses pengambilan data dari penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Metrologi Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 12. Tempat penelitian laboratorium metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.

3.1.2 Waktu penelitian

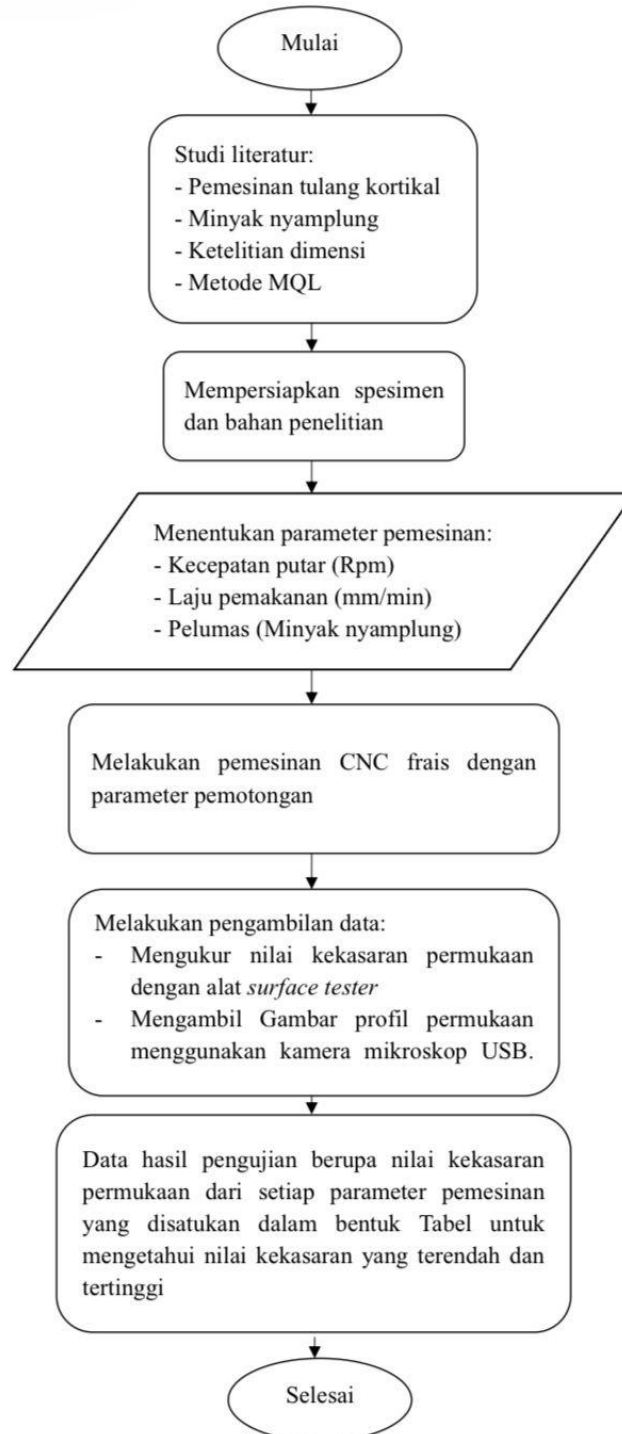
Penelitian ini dilaksanakan dengan skema yang terjadwal seperti terlampir pada Tabel 1, menunjukkan rancangan kegiatan penelitian

Tabel 1. Rencana kegiatan penelitian

JADWAL RENCANA KEGIATAN PENELITIAN							
WAKTU PELAKSANAAN							
NO.	KEGIATAN	AGUSTUS	SEPTEMBER	OKTOBER	NOVEMBER	DESEMBER	JANUARI
1	Penyelesaian proposal tugas akhir						
2	Seminar proposal tugas akhir						
3	Pelaksanaan penelitian tugas akhir						
4	Pengolahan data dan penulisan skripsi tugas akhir						
5	Seminar hasil skripsi						
6	Ujian skripsi						

3.2 Diagram Alur

Adapun diagram alur penelitian yang terdapat pada Gambar 13 di bawah ini:



Gambar 13. Diagram alur.

3.3 Alat dan Bahan

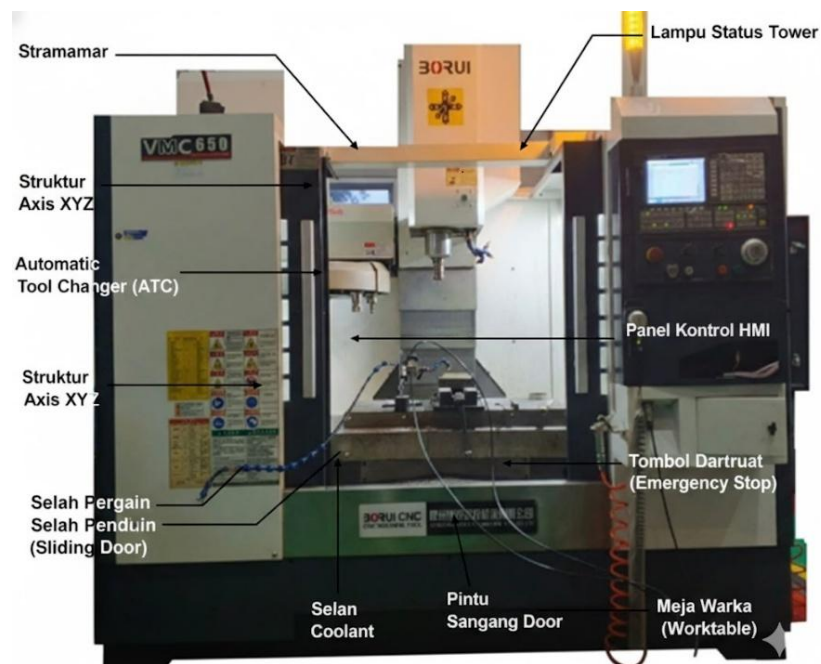
Alat dan bahan yang akan digunakan penulis dalam penelitian ini dilaksanakan terdiri dari alat utama dan alat pendukung lainnya yaitu sebagai berikut:

3.3.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Mesin CNC *milling*

Berdasarkan Gambar 14 yaitu merupakan mesin CNC *milling* adalah salah satu jenis mesin CNC yang mengandalkan program komputer dalam pengerjaannya. Sistem komputer akan mengendalikan dan mengontrol mesin dengan gerak otomatis. Proses *milling* dalam mesin ini merupakan proses pengeboran dan pemotongan material.



Gambar 14. CNC *milling*.

Tabel 2. Spesifikasi CNC *milling*

Spesifikasi CNC <i>milling machine</i> ATC VMC650	
<i>Repeatability</i> (x/y/z) (mm)	± 0,005
<i>Table travel</i> (y) (mm)	400
<i>Table size</i>	800 x 400
<i>Max. table load</i> (kg)	400
<i>Voltage</i>	220V / 380V
<i>Weight</i> (t)	4
<i>Range of spindle speed</i>	1 – 10000 rpm
<i>Rapid feed speed</i>	20000 – 24000 mm/min
<i>Positioning accuracy</i>	±0,0075
<i>Table travel</i> (x) (mm)	650
<i>Table travel</i> (z) (mm)	500
<i>Spindle taper</i>	BT40
<i>CNC control system</i>	GSK

b. Pahat *End mill* HSS

Berdasarkan pada Gambar 15 yaitu menunjukkan pahat *end mill High Speed Steel* (HSS) dengan diameter 6 mm sangat cocok digunakan dalam proses pemesinan frais pada tulang kortikal karena memiliki kombinasi kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan panas yang baik. HSS mampu mempertahankan kekerasan pada suhu tinggi, sehingga ideal untuk memotong material dengan sifat biologis seperti tulang kortikal yang relatif keras namun rapuh. Penggunaan diameter 6 mm memungkinkan pembuatan slot atau rongga dengan ukuran sedang secara efisien dan akurat, serta menghasilkan permukaan akhir yang lebih halus jika dibandingkan dengan diameter pahat yang lebih kecil. Selain itu, pahat *end mill* HSS juga ekonomis dan dapat diasah kembali, menjadikannya pilihan praktis untuk prosedur pemesinan berbasis penelitian maupun medis.



Gambar 15. Pahat *end mill* rahang 4.

Tabel 3. Spesifikasi *end mill*

Spesifikasi <i>End mill</i> Merk Lexees	
Panjang	60 mm
Panjang <i>flute</i>	19 mm
Jumlah rahang	4 rahang
Diameter	6 mm
Jenis material	HSS (<i>High Speed Steel</i>)

c. *Surface roughness tester*

Pada Gambar 16, *Surface roughness tester* merupakan alat pengukuran kekasaran permukaan. Setiap permukaan komponen dari suatu benda mempunyai beberapa bentuk yang bervariasi menurut strukturnya maupun dari hasil proses produksinya. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan menggunakan *transducer* dan diolah dengan *mikroprocessor*. *Roughness tester* dapat digunakan di lantai di setiap posisi, horizontal, vertikal atau di mana pun. Hasil pengukuran nilai kekasaran permukaan yang dapat diambil adalah Ra, Rz, Rq. Dan dengan ketelitian alat 0,01 μm . Pada Tabel 5 menunjukkan standar ISO *surface roughness tester* yang digunakan .



Gambar 16. *Surface roughness tester*.

Tabel 4. Spesifikasi *surface roughness tester*

Parameter	Spesifikasi
Merek	Mitutoyo
Tipe alat	Surface Roughness Tester (Portable)
Metode pengukuran	Stylus (kontak langsung)
Rentang pengukuran (Z)	$\pm 800 \mu\text{m}$
Resolusi	$0,0001 \mu\text{m}$
Parameter yang diukur	Ra, Rz, Ry, Rt, Rq, Rp, Rv, Rsk, Rku
Cut-off length (λ_c)	0,08 / 0,25 / 0,8 / 2,5 mm
Traverse length	Maks. ± 25 mm
Stylus tip radius	$2 \mu\text{m}$
Sudut stylus	60°
Kecepatan pengukuran	0,25 / 0,5 / 0,75 mm/s
Tampilan	LCD (grafik profil permukaan)
Penyimpanan data	Internal memory + output ke PC
Sumber daya	Baterai rechargeable

Tabel 5. Standar ISO *surface roughness tester*

Ra (μm)	Rz.Ry (μm)	L (mm)	Ln+5L(mm)
$\geq 0.008 \sim 0.02$	$\geq 0.025 \sim 0.10$	0.08	0.4
$> 0.02 \sim 0.1$	$> 0.10 \sim 0.50$	0.25	1.25
$> 0.1 \sim 2.0$	$> 0.50 \sim 10.0$	0.8	4
$> 2.0 \sim 10.0$	$> 10.0 \sim 50.$	2.5	12.5
$> 10.0 \sim 80.0$	$> 50.0 \sim 320$	8	40

d. Kamera mikroskop USB

Pada Gambar 17 yaitu menunjukkan kamera Mikroskop USB digunakan untuk mengambil gambar profil permukaan dari material magnesium yang sudah dilakukan proses permesinan. kamera mikroskop USB ini memiliki pembesaran hingga 1000 kali.



Gambar 17. Mikroskop USB.

Tabel 6. Spesifikasi mikroskop USB

No	Spesifikasi	
1	Dimensi	180 mm x 30 mm
2	Kualitas gambar	HD <i>color</i> dengan CMOS sensor
3	<i>Zoom</i>	500x
4	USB	USB <i>Port</i> 2.0 & USB 1.1

3.3.2 Bahan

Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu tulang kortikal sapi atau kambing yang sudah dipisahkan dari daging kemudian dibersihkan agar tidak berbau amis. Tulang sapi dipilih karena dapat dengan mudah ditemukan, struktur anatomi tulang sapi memiliki kemiripan dengan tulang manusia terutama dalam hal komposisi dan tekstur, tulang sapi juga sering digunakan dalam penelitian biomekanik dan studi anatomi.

a. Tulang Kortikal Sapi

Berdasarkan Gambar 16 yaitu tulang kortikal sapi merupakan bagian tulang yang padat dan keras yang terletak pada lapisan luar tulang, serta memiliki struktur yang relatif homogen dibandingkan tulang spons sehingga sering digunakan sebagai material uji dalam penelitian pemesinan biomaterial. Sifat mekaniknya yang menyerupai tulang manusia, seperti kekuatan tekan dan kekerasan,

menjadikan tulang kortikal sapi relevan untuk studi karakteristik pemotongan, keausan pahat, serta evaluasi kekasaran permukaan pada aplikasi implan medis.



Gambar 18. Spesimen uji.

Tabel 7. Tulang kortikal

Spesifikasi Tulang Kortikal	
Jenis Hewan	Sapi
Umur	$\pm 2-3$ tahun (dewasa muda)
Jenis Kelamin	Sapi jantan
Bagian kaki	Depan
Ukuran Material	Panjang 70mm Tinggi 20mm

b. Pelumas nabati Nyamplung

Pada Gambar 19 merupakan minyak nyamplung adalah minyak nabati yang diekstrak dari biji tanaman *Calophyllum inophyllum*, Dalam aplikasi pemesinan, minyak nyamplung berpotensi digunakan sebagai pelumas ramah lingkungan karena memiliki viskositas tinggi, daya lumas yang baik, serta mampu menurunkan gesekan dan

temperatur pemotongan sehingga dapat meningkatkan kualitas permukaan.



Gambar 19. Pelumas minyak nyamplung.

Tabel 8. Spesifikasi pelumas minyak nyamplung

Spesifikasi	
Warna	Bening
Isi bersih	2 liter
Tingkat kekentalan	119,5 mm ² /s
<i>Viskositas</i>	29 cst
Titik Nyala	150°C
Kandungan Resin	10-30%
Prinsip	Disemprotkan
Koefisien gesek	0,072

c. Pelumas VCO (*Virgin Coconut Oil*)

Berdasarkan Gambar 20 yaitu merupakan *virgin coconut oil* (VCO) adalah minyak kelapa murni yang diperoleh dari daging kelapa segar tanpa melalui proses pemanasan tinggi atau bahan kimia, sehingga kandungan nutrisi alaminya seperti asam laurat tetap terjaga. Dalam

konteks pemesinan, VCO termasuk pelumas nabati yang memiliki sifat *biodegradable*, viskositas yang baik, serta kemampuan pelumasan yang cukup efektif untuk mengurangi gesekan dan temperatur, sehingga berpotensi meningkatkan kualitas permukaan hasil pemotongan.



Gambar 20. Pelumas VCO (*Virgin Coconut Oil*).

Tabel 9. Spesifikasi pelumas VCO

Spesifikasi	
Warna	Bening
Isi bersih	2 liter
Tingkat kekentalan	1,4088 mm ² /s hingga 1,5701 mm ² /s
Viskositas	26,59 mm ² /s pada suhu 40°C
Titik Nyala	177°C hingga 232°C
Kandungan asam laurat	47-54%
Kadar air	0,1-0,2%
Prinsip	Disemprotkan
Koefisien gesek	0,1

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian secara rinci disajikan pada Tabel 10 sebagai pedoman pelaksanaan setiap tahapan penelitian.

Tabel 10. Parameter pemotongan

No	Faktor	Level		
	Nama	Nilai terendah	Nilai tengah	Nilai tertinggi
		-1	0	1
1	Kecepatan putar (rpm)	660	1040	1320
2	Laju pemakanan (mm/min)	45	55	65
3	Pelumas nabati	Kering	Minyak nyamplung	VCO

Pengambilan data pada setiap parameter dilakukan sebanyak 15 kali. Hal ini dilakukan untuk memasukkan hasil pengujian nilai kekasaran permukaan. Setelah selesai, perlu dilakukan uji ketelitian kekasaran. Uji ketelitian kekasaran pada penelitian ini menggunakan *surface roughness tester*. Adapun proses persiapan alat uji yaitu:

- Pastikan alat uji *surface roughness tester* dalam kondisi baik dan terkalibrasi dengan benar.
- Atur penempatan alat uji *surface roughness tester* sehingga didapat dengan sudut yang sesuai.
- Sebelum pengujian, pastikan alat uji profil proyektor terkalibrasi dengan benar dan sesuai dengan panduan yang disediakan oleh produsen.
- Adapun tabel penelitian untuk RSM *box-behnken* adalah sebagai berikut:

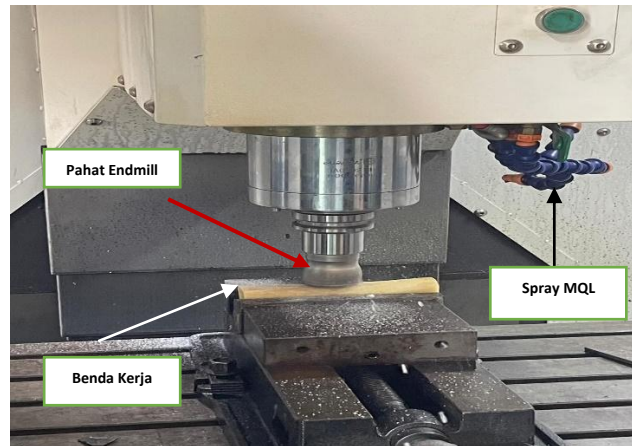
Tabel 11. Parameter penelitian *box-behnken*

std	Run	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
		Kecepatan Putar (rpm)	Laju Pemakanan (mm/min)	Cairan Pelumas
15	1	1040	55	Nyamplung
5	2	660	55	Kering
8	3	1320	55	VCO
1	4	660	45	Nyamplung
12	5	1040	65	VCO
3	6	660	65	Nyamplung

9	7	1040	45	Kering
7	8	1320	55	VCO
14	9	1040	55	Nyamplung
6	10	1320	55	Kering
10	11	1040	65	Kering
2	12	1320	45	Nyamplung
4	13	1320	65	Nyamplung
11	14	1040	45	VCO
13	15	1040	55	Nyamplung

3.5 Mekanisme Pemesinan Frais

Mesin di *set-up*, maka proses pengefraisan tulang kortikal dapat dilakukan menggunakan pelumas berbasis minyak nyamplung. Pelaksanaan penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kekasaran pada permukaan benda kerja menggunakan *surface roughness tester*. Pada proses pemessinan ini menggunakan pahat *End mill* HSS 10mm untuk semua parameter pemessinan yang digunakan. Pada Gambar 21 yang menunjukkan proses pengefraisan (*milling*) pada material tulang kortikal yang dijepit menggunakan ragum di atas meja mesin frais. Pahat jenis *end mill* sedang berputar dan melakukan pemotongan pada permukaan benda kerja, terlihat dari adanya serbuk hasil pemessinan (geram) yang tersebar di sekitar area pemotongan. Proses ini dilakukan dengan bantuan pelumasan untuk mengurangi gesekan dan panas, sehingga dapat meningkatkan kualitas permukaan hasil pemessinan serta menjaga umur pahat.



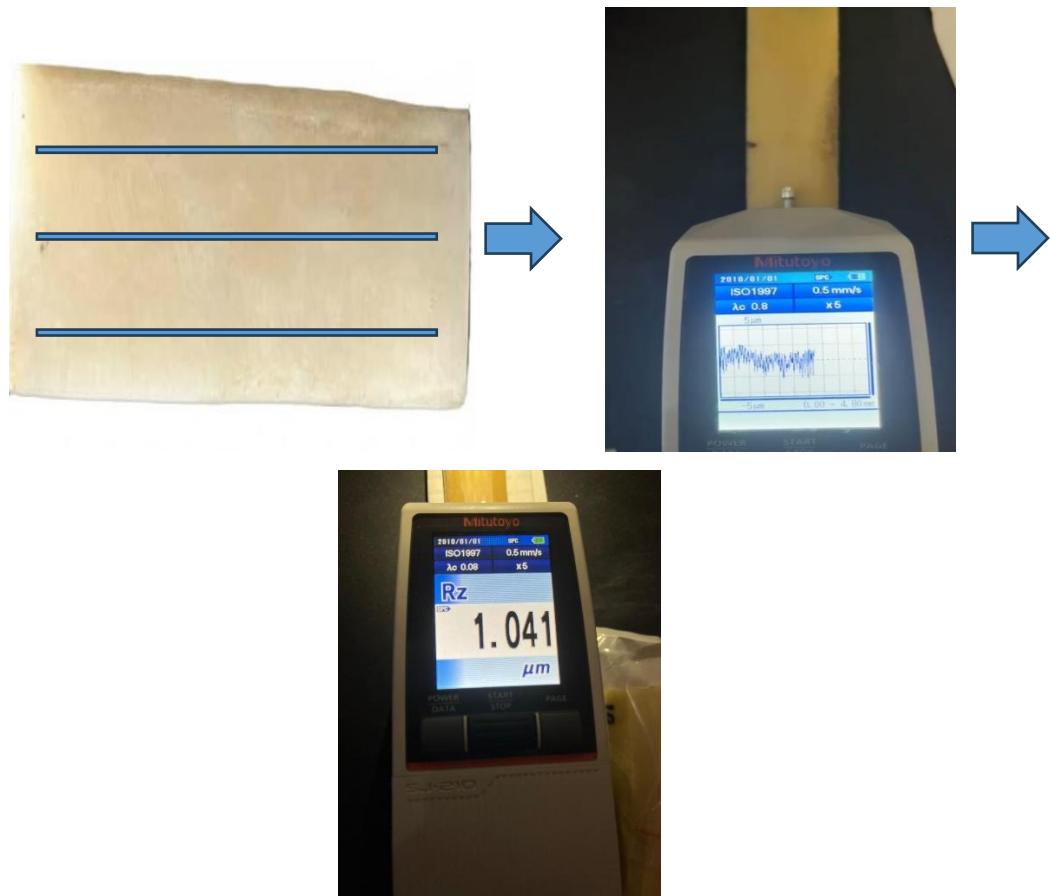
Gambar 21. mekanisme proses pemesinan CNC *Milling* menggunakan teknik MQL.

3.5.1 Prosedur pengukuran kekasaran

Setelah proses pemesinan dilakukan *surface roughness tester* diletakkan pada permukaan benda uji kemudian *stylus* (berupa jarum) diatur sehingga beradadalam posisi stabil pada pembacaan skala tekanan terhadap permukaan objek yang akan diukur, setelah posisi *surface roughness tester* sudah stabil barulah pengambilan nilai kekerasan dilakukan dengan menekan tombol start pada alat dan *stylus* akan bergerak dengan konstan sesuai dengan sumbu horizontal dan sejajar dengan benda uji (berada dalam garis lurus) pengambilian data kekasaran menggunakan *surface roughness tester* sebanyak tiga kali. Langkah-langkah pengukuran kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

1. Spesimen hasil pemesinan dibersihkan dari sisa geram dan pelumas menggunakan kain bersih agar tidak mempengaruhi hasil pengukuran.
2. Surface roughness tester dikalibrasi terlebih dahulu sesuai standar pengukuran.
3. Spesimen diletakkan pada permukaan datar dan stabil untuk menghindari getaran selama pengukuran.
4. Probe (*stylus*) alat ditempatkan pada permukaan spesimen sejajar dengan arah pemesinan.

5. Pengukuran dilakukan dengan menggerakkan stylus sepanjang permukaan spesimen sesuai panjang sampling yang ditentukan.
6. Nilai kekasaran permukaan (R_a) ditampilkan pada layar alat dan dicatat.
7. Setiap spesimen diukur sebanyak tiga kali pada titik yang berbeda, kemudian diambil nilai rata-rata untuk meningkatkan akurasi data.



Gambar 22. Ilustrasi pengambilan data nilai kekasaran permukaan menggunakan *surface roughness tester*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan juga pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan keseluruhan hasil penelitian yang telah dilakukan, penggunaan minyak nyamplung terbukti memiliki potensi yang baik sebagai pelumas nabati pada proses pemesinan frais dan bor tulang kortikal dengan metode *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) terbukti efektif dalam meningkatkan performa proses pemesinan. Hal ini ditunjukkan dengan kemampuan minyak nyamplung dalam menurunkan gesekan dan temperatur pada zona pemotongan, sehingga proses pemesinan berlangsung lebih stabil serta mampu mengurangi potensi kerusakan termal pada material tulang kortikal.
2. Penggunaan pelumas nabati berbasis minyak nyamplung dalam proses pemesinan implan tulang kortikal memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap kualitas hasil pemesinan. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan nilai kekasaran permukaan yang mencapai $0,204 \mu\text{m}$ serta kemampuan dalam meminimalkan pembentukan burr hingga $0,033 \text{ mm}$ pada kondisi optimal. Selain itu, berdasarkan hasil analisis, faktor pelumas terbukti menjadi parameter yang paling dominan dibandingkan kecepatan putar dan laju pemakanan, sehingga menunjukkan bahwa pemilihan pelumas yang tepat berperan utama dalam menentukan kualitas permukaan dan kestabilan proses pemesinan.
3. Pada kondisi pemesinan yang optimal, penggunaan minyak nyamplung mampu menghasilkan kualitas permukaan terbaik yang ditunjukkan

dengan nilai kekasaran permukaan terendah sebesar $0,204 \mu\text{m}$ serta mampu meminimalkan pembentukan burr pada proses pengeboran hingga nilai terendah sebesar $0,033 \text{ mm}$. Hasil ini menunjukkan bahwa minyak nyamplung tidak hanya efektif dalam meningkatkan kualitas permukaan, tetapi juga mampu menghasilkan permukaan yang lebih halus, seragam, dan presisi, sehingga sangat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai pelumas ramah lingkungan dalam proses pemesinan biomaterial, khususnya pada material tulang kortikal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mengembangkan penggunaan minyak nyamplung sebagai pelumas nabati melalui modifikasi sifat pelumas, seperti penambahan aditif atau pencampuran dengan minyak nabati lain, guna meningkatkan kemampuan pelumasan dan pendinginan. Penelitian lanjutan juga perlu mengkaji variasi parameter pemesinan yang lebih luas, meliputi kecepatan putar, laju pemakanan, serta penerapannya pada proses pemesinan bor, agar diperoleh kondisi pemesinan yang lebih optimal. Selain itu, pengukuran parameter tambahan seperti suhu pemesinan, keausan pahat, dan karakteristik mikrostruktur permukaan disarankan untuk memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai kinerja minyak nyamplung sebagai pelumas nabati yang ramah lingkungan pada aplikasi material implan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afonso, I. S., Pereira, J., Ribeiro, A. E., Amaral, J. S., Rodrigues, N., Gomes, J. R., ... & Ribeiro, J. (2022). Analysis of a vegetable oil performance in a milling process by MQL lubrication. *Micromachines*, 13(8), 1254.
- Aminy, A. Y., & Aji, A. A. (2022). Optimasi Kualitas Pembubutan Aluminium 6061 Akibat Perubahan Sudut Potong Pahat HSS. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, 25(2), 124–131. <https://doi.org/10.25042/jpe.112021.07>
- Bilgiç, E., Boyacıoğlu, Ö., Gizer, M., Korkusuz, P., & Korkusuz, F. (2020). *Architecture of bone tissue and its adaptation to pathological conditions. Comparative Kinesiology of the Human Body: Normal and Pathological Conditions*, 71–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812162-7.00006-0>
- Dambatta, Y. S., Li, B., Zhang, Y., Yang, M., Xu, P., Wang, W., Zhou, Z., Yang, Y., Dong, L., & Li, C. (2025). *Tribological evaluation of Al₂O₃/GO/ZnO tripartite hybrid based nanofluid for grinding Ti-6Al-4V alloy with minimum quantity lubrication. Frontiers of Mechanical Engineering*, 20(1), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11465-024-0817-z>
- Dityamri, A. G., Ibrahim, G. A., Harun, S., & Burhanuddin, Y. (2024). Investigation of Drilling Parameters Affecting Borehole Circularity in Cortical Bone. *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 18(2), 71–79. <https://doi.org/10.24853/sintek.18.2.71-79>
- Hamni, A., Pratama, A., & Akhyar Ibrahim, G. (2022). Implementasi *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) Pada Pembuatan Ulir Luar Material Magnesium. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, 14(01), 1–8. <https://doi.org/10.33504/manutech.v14i01.160>
- Hanincová, L., Procházka, J., & Novák, V. (2024). *Comparative Analysis of Cutting Forces in CNC Milling of MDF: The Role of Tool Coatings, Cutting Speed, and Feed Per Tooth. Coatings*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/coatings14091085>

- Ilyas, B. S., Purnomo, S. J., & Listyanda, R. F. (2024). Pemanfaatan Minyak Biji Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum* Linn) Sebagai Alternatif Coolant Pada Proses Pembubutan. *Majamecha*, 6(2), 262-269.
- Kumar, A., Bhagat, K. C., Gangopadhyay, S., & Das, P. (2024). *Effect of flow rate in minimum quantity lubrication (MQL) in micro-drilling of Ti-6Al-4V*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135(11), 5173–5186. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14756-5>
- Leyva-Jiménez, F. J., Fernández-Ochoa, Á., Cádiz-Gurrea, M. de la L., Lozano-Sánchez, J., Oliver-Simancas, R., Alañón, M. E., Castangia, I., Segura-Carretero, A., & Arráez-Román, D. (2022). Application of Response Surface Methodologies to Optimize High-Added Value Products Developments: Cosmetic Formulations as an Example. *Antioxidants*, 11 (8), 1–23. <https://doi.org/10.3390/antiox11081552>
- Lubis, S. (2024). Studi Eksperimental Dampak Dari Proses Pemotongan Pada *Side Milling* Dan *Face Milling* Terhadap Tingkat Kekerasan Pada Permukaan Logam. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 5(1), 128–135. <https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v5i1.1549>
- Milano, J., Shamsuddin, A. H., Silitonga, A. S., Sebayang, A. H., Siregar, M. A., Masjuki, H. H., ... & Zamri, M. F. M. A. (2022). Tribological study on the biodiesel produced from waste cooking oil, waste cooking oil blend with *Calophyllum inophyllum* and its diesel blends on lubricant oil. *Energy Reports*, 8, 1578-1590
- Mizera, Č., Aleš, Z., Herák, D., Hrabě, P., Kabutey, A., Napitupulu, R. A. M., & Ungureanu, N. (2023). *Mechanical Pressing of Coconut Oil and Evaluation of Its Lubricant Properties*. *Processes*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/pr11103034>
- Naveed, Arslan, J. (2021). *Friendly Machining Using Biodegradable Cutting Fluids*. *Energies*, 14, 1–35
- Nugraha, D. A., Qoryah, R. D. H., & Darsin, M. (2020). Pengaruh Metode *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan. *Rekayasa*, 13(2), 125–129. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v13i2.6259>
- Pratama, I., & Rizza, M. A. (2022). Pengaruh Parameter Pemotongan Pada Proses Frais Terhadap Kekasaran Permukaan Material Aluminium 6061. *Jurnal Teknik Ilmu Dan Aplikasi*, 2(2), 49–56. <https://doi.org/10.33795/jtia.v2i2.63>

- Sugara, I. R., Ilminnafik, N., Junus, S., Kustanto, M. N., & Hermawan, Y. (2023). *Experimental Study on the Effect of Magnetic Fields on Combustion Characteristics of Biodiesel from Nyamplung (Calophyllum Inophyllum)*. *Automotive Experiences*, 6(1), 122–132. <https://doi.org/10.31603/ae.8328>
- Urbeyni, F. (2020). Pengaruh Parameter Permesinan Terhadap Burr Formation Pada Proses Milling Dengan Cnc Router Aluminium Sheet 1100. *Machine : Jurnal Teknik Mesin*, 6(1), 14–19. <https://doi.org/10.33019/jm.v6i1.1178>
- Wulandari, W. N., Darsin, M., & Wibowo, R. K. K. (2020). *Study on characteristics of calophyllum inophyllum oil as a new alternative cutting fluid*. *AIP Conference Proceedings*, 2278(October). <https://doi.org/10.1063/5.0015792>
- Yurtkuran, H., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Yılmaz, H., Günay, M., & Vashishtha, G. (2024). *Prediction of power consumption and its signals in sustainable turning of PH13-8Mo steel with different machine learning models*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133(5–6), 2171–2188. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13867-3>
- Zhang, X., Li, C., Zhou, Z., Liu, B., Zhang, Y., Yang, M., Gao, T., Liu, M., Zhang, N., Said, Z., Sharma, S., & Ali, H. M. (2023). *Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application*. In *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* (Vol. 36, Issue 1). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5>