

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN FREIS TERHADAP
NILAI KEKASARAN PERMUKAAN MENGGUNAKAN
METODE RSM PADA KONDISI PEMOTONGAN MQL.**

Skripsi

Oleh

MUHAMMAD ROSIKHUL IELMI

NPM. 2155021010



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN FREIS TERHADAP
NILAI KEKASARAN PERMUKAAN MENGGUNAKAN
METODE RSM PADA KONDISI PEMOTONGAN MQL.**

Oleh

MUHAMMAD ROSIKHUL IELMI

NPM. 2155021010

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



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

ABSTRAK

OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN FREIS TERHADAP NILAI KEKASARAN PERMUKAAN MENGGUNAKAN METODE RSM PADA KONDISI PEMOTONGAN MQL.

Oleh

MUHAMMAD ROSIKHUL IELMI

Proses pemesinan frais (*milling*) pada material biologis seperti tulang kortikal memerlukan pengendalian parameter yang ketat untuk menghasilkan kualitas kekasaran permukaan yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter pemesinan yang terdiri dari kecepatan putar (*spindle speed*), laju pemakanan (*feed rate*), dan kondisi pelumasan terhadap kekasaran permukaan (*surface roughness*) hasil proses frais tulang kortikal. Metode eksperimen yang digunakan adalah *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain percobaan *Box-Behnken Design* (BBD). Berdasarkan hasil pengujian serta analisis data, faktor C parameter ini dipilih berdasarkan hasil *fit summary* dengan nilai lack of fit yang signifikan. Pada data hasil ANOVA faktor C (pelumas) menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap respon, hal ini dapat dilihat hasil nilai P-value >0,05 yaitu sebesar 0,0032 dan diperoleh persamaan regresi *linear* untuk kekasaran permukaan yaitu, $R_a = 0,621 - 0,000099(A) - 0,0009(B) - 0,172(C)$. Hasil ini menunjukkan bahwa ketiga variabel tersebut memberikan pengaruh linear negatif, di mana peningkatan kecepatan putar, laju pemakanan, dan pelumasan memiliki kontribusi secara signifikan dalam menurunkan nilai kekasaran permukaan.

Kata Kunci: Pemesinan Frais, Tulang Kortikal, Kekasaran Permukaan, *Response Surface Methodology*, Regresi Linear.

ABSTRACT

OPTIMISATION OF MILLING MACHINE PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS VALUES USING THE RSM METHOD UNDER MQL CUTTING CONDITIONS.

BY

MUHAMMAD ROSIKHUL IELMI

The milling process on biological materials such as cortical bone requires strict control of machining parameters to achieve a high-quality surface finish. This study aims to analyse the influence of machining parameters—comprising spindle speed, feed rate, and lubrication conditions—on the surface roughness of the milled cortical bone. The experimental method used was Response Surface Methodology (RSM) with a Box-Behnken Design (BBD). Based on the test results and data analysis, factor C of these parameters was selected based on the fit summary results with a significant lack of fit value. In the ANOVA results, factor C (lubricant) showed a significant effect on the response; as evidenced by a P-value >0.05, specifically 0.0032, and a linear regression equation for surface roughness was obtained: $Ra = 0.621 - 0.000099(A) - 0.0009(B) - 0.172(C)$. These results indicate that all three variables exert a negative linear influence, whereby an increase in rotational speed, feed rate, and lubrication significantly contributes to reducing the surface roughness value.

Keywords: *Milling, Cortical Bone, Surface Roughness, Response Surface Methodology, Linear Regression.*

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : **Optimasi Parameter Pemesinan Frais Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Menggunakan Metode RSM Pada Kondisi Pemotongan MQL.**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Rosikhul Ielmi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2155021010**

Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Komisi Pembimbing 1

Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197108171998021003

Komisi Pembimbing 2

Arzaq Guruh Dityamri S.T., M.T.
NIP. 2062776677130173

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 198408162000121001

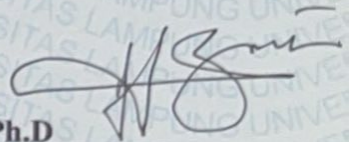
Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc
NIP. 197908212003121003

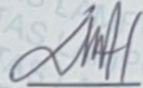
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

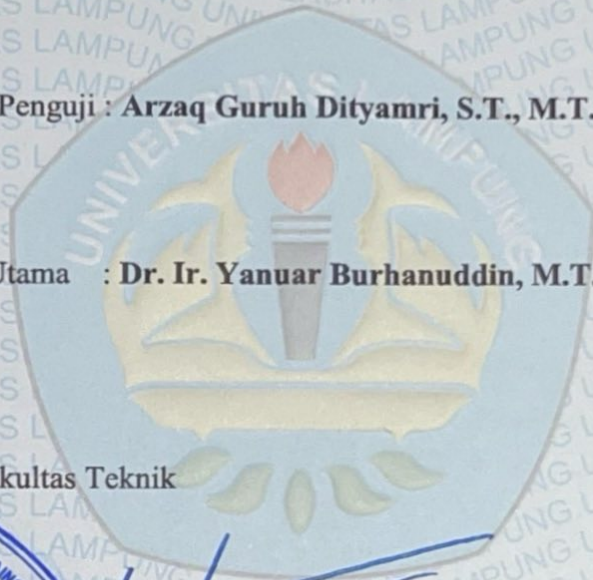
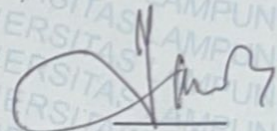
Ketua Penguji : Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D



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 : 26 April 2026

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul “Optimasi Parameter Pemesinan Frais Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Menggunakan Metode RSM Pada Kondisi Pemoangan MQL” merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 24 april 2026

Pembuat Pernyataan



Muhammad Rosikhul Ielmi
NPM.2155021010

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Rosikhul Ielmi dilahirkan di Bandar Lampung 12 September 2002. Penulis merupakan putra dari pasangan bapak Muhammad Ikbal dan Ibu Dewi Sartika. Penulis berdomisili di Perum Permata Biru.

Riwayat pendidikan penulis di mulai di SDN 2 Sukarame Bandar Lampung, dilanjutkan menempuh MTs Daar el-Qolam Gintung Jayanti Tangerang, dan menyelesaikan Madrasah Aliyah Negeri 1 Bandar Lampung. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Selama masa studi, penulis aktif mengembangkan diri melalui organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HMTM) Universitas Lampung sebagai Anggota Divisi Hubungan Masyarakat (2022) dan Sekretaris Divisi Kaderisasi (2023). Penulis juga telah menyelesaikan program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Tanjung Wangi Lampung Timur dengan mengerjakan proyek lampu jalan tenaga surya, Kerja Praktik di BRIN Subang dengan memodifikasi *Cyclone Separator* Penepung, dan mengikuti program magang kampus *Techno Preneur* yang dimana penulis membuat sebuah produk menggunakan mesin 3D *Print* lalu melakukan pemasaran dari produk tersebut.

Penulis telah dinyatakan lulus dan menyelesaikan pendidikan Strata-1 (S1) pada tahun 2026 setelah mempertahankan skripsi yang berjudul "Optimasi Parameter Pemesinan Frais Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Menggunakan Metode RSM Pada Kondisi Pematangan MQL". Penelitian tersebut disusun di bawah bimbingan Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T., dan Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. Dengan selesainya studi ini, penulis berhak menyandang gelar Sarjana Teknik (S.T.).

MOTTO

"Karena sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya beserta kesulitan itu ada kemudahan."

(Al-Insyirah ayat 5-6)

"Everybody is a genius. But if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will live its whole life believing that it is stupid."

(Albert Einstein)

“Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan?”

(Ar-Rahman ayat 73)

“Fokuslah pada satu bidang ilmu dengan telaten, sehingga muncul inovasi baru yang bisa menjadi hak paten.”

(Penulis Skripsi)

“Ilmu Tanpa Amalan Bagai Pohon Tak Berbuah”

(Imam Al-Ghazali)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar. Sholawat serta salam selau tercurahkan kepada Nabiallah Nabi Muhammad SAW.

KARYA TULIS INI SAYA PERSEMBAHKAN KEPADA

Ibunda dan Ayahanda Tercinta

Yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasiku, memberikan semangat dan doa yang tiada henti-hentinya selalu menyertai. Terima kasih atas cinta, doa, dukungan, serta pengorbanan tanpa hentinya yang tidak akan pernah bisa penulis balas sepenuhnya. Segala pencapaian ini adalah buah dari doa dan usaha kalian yang menyertai saya selama proses penyelesaian skripsi ini.

Para dosen yang telah membimbing

Yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing saya dengan penuh kesabaran hingga terselesaikannya tugas akhir 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

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan nikmat kepada penulis, sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Optimasi Parameter Pemesinan Frais Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Menggunakan Metode RSM Pada Kondisi Pemotongan MQL”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini banyak pihak yang telah memberikan pengalaman, dukungan, dan bantuan baik secara materi maupun motivasi. Hal tersebutlah yang sangat memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T, M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. Selaku Ketua Prodi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. 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 Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam penyusunan Skripsi.

7. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. yang berkenan menjadi Dosen Pembahas untuk memberikan kritik dan saran pada skripsi ini.
8. Seluruh Dosen, staf dan karyawan program studi S1 Teknik Mesin yang telah membantu dan memberikan pengarahan dalam proses kepengurusan berkas perkuliahan.
9. Saya mengucapkan terimakasih kepada Hilmul Khadir, Rafalesa Dinata dan rekan seperjuangan saya yang selalu membantu dan berdiskusi dalam mengerjakan penelitian skripsi ini.
10. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 yang ada di laboratorium CNC, termodinamika, motor bakar, mekanika struktur, dan fluida Jurusan teknik Mesin UNILA yang telah kebersamai, memberi motivasi dan semangat selama perkuliahan.
11. Teman-teman yang berada di kampung halaman yang telah menjadi tempat cerita dan selalu memberi dukungan serta motivasi kepada penulis selama ini.
12. Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak. Akhir kata penulis sangat berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembacanya.

Bandar Lampung, 26 Mei 2026
Penulis Skripsi

Muhammad Rosikhul Ielmi
NPM. 2155021010

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Struktur dan Sifat Biomekanik Tulang Kortikal	5
2.1.1 Aplikasi Pemesinan Tulang dalam Medis	6
2.1.2 Tantangan dalam Pemesinan Tulang.....	6
2.2 Pemesinan Freis.....	8
2.2.1 Pisau Pemesinan Freis	11
2.2.2 Parameter Pemesinan.....	13
2.3 Response Surface Methodology (RSM).....	16
2.4 Desain Box-Behnken (BBD).....	17
2.4.1 Model Matematika	19
2.4.2 Keunggulan dan Aplikasi BBD.....	19
2.5 Kekasaran Permukaan	20
2.5.1 Parameter Pengukuran Kekasaran Permukaan.....	21
2.6 Parameter Pengukuran Kekasaran Permukaan.....	22
2.6.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekasaran Permukaan.....	23
2.6.2 Pentingnya Kekasaran Permukaan dalam Aplikasi Industri	24
2.7 Analisis Of Varian (ANOVA).....	25
2.8 Mekanisme MQL (Minimum Quantity Lubrication)	26
2.8.1 Mekanisme Kerja MQL.....	27
2.8.2 Keuntungan dan Kekurangan MQL	28

2.8.3 Aplikasi dan Tren Penelitian MQL	29
2.9 Pelumas Minyak Nabati	30
2.9.1 Keunggulan Minyak Nabati sebagai Pelumas.....	31
2.9.2 Keterbatasan dan Modifikasi Minyak Nabati.....	32
2.9.3 Tren Penelitian Pelumas Minyak Nabati.....	33
III. METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1 Pendekatan Penelitian.....	34
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	34
3.2.1 Waktu penelitian.....	35
3.3 Diagram Alur.....	36
3.4 Variabel Penelitian	37
3.4.1 Variabel Terikat (<i>Output/Respons</i>)	38
3.5 Material Penelitian	39
3.6 Alat kerja	42
3.7. Prosedur Pemesinan Frais	45
3.8 Prosedur pengukuran kekasaran	46
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Data Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan Pada Pemesinan Tulang....	48
4.2 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA) Kekasaran Permukaan Tulang	50
4.3 Normal Plot Residual.	52
4.4 Plot Residual vs. Predicted	54
4.5 Model Matematik Pada Kekasaran Permukaan Tulang	56
4.6 Plot Interaksi.....	57
4.6.1 Plot kontur kekasaran tanpa pelumas (kering)	57
4.6.2 Plot kontur kekasaran permukaan dengan minyak nyamplung.....	59
4.6.3 Plot kontur kekasaran permukaan dengan pelumas VCO.	61
4.7 Optimasi Parameter Pemesinan Frais	62
V. KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Tulang Kortikal dan Konselus	5
Gambar 2. 2 Nekrosis Termal Pada Jaringan Tulang	7
Gambar 2. 3 Kerusakan Mekanis Pada Tulang.....	7
Gambar 2. 4 Pemesinan Freis.....	9
Gambar 2. 5 Sumbu gerak pemesinan frais	9
Gambar 2. 6 (a) proses frais vertical, (b) proses frais horizontal.....	10
Gambar 2. 7 Pisau Frais (<i>End Mill</i>).	12
Gambar 2. 8 Geometri Pisau Frais (<i>End Mill</i>).	12
Gambar 2. 9 Kubus BBD Untuk Tiga Faktor	18
Gambar 2. 10 Parameter kekasaran permukaan.....	20
Gambar 2. 11 Skema proses pemesinan fres dengan MQL	26
Gambar 2. 12 Proses pengolahan dari biji di ekstrak menjadi minyak.....	31
Gambar 3. 1 Tempat penelitian (Lab. Produksi, SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo)	34
Gambar 3. 2 Tempat penelitian Laboratorium Metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung).....	35
Gambar 3. 3 Spesimen uji.....	39
Gambar 3. 4 Pelumas minyak nyamplung	40
Gambar 3. 5 Pelumas VCO (Virgin Coconut Oil).....	40
Gambar 3. 6 Mesin CNC <i>milling</i>	42
Gambar 3. 7 Pahat <i>end mill</i> rahang empat	43
Gambar 3. 8 <i>Surface roughness tester</i>	44
Gambar 3. 9 Ilustrasi mekanisme proses pemesinan CNC <i>Milling</i> menggunakan teknik MQL.....	45
Gambar 3. 10 Ilustrasi mekanisme metode pengukuran menggunakan alat <i>surface roughness tester</i>	46
Gambar 4. 1 Plot residual berdistribusi normal kekasaran permukaan.....	53
Gambar 4. 2 Grafik 3D respon kekasaran permukaan tanpa pelumas (kering). ...	57
Gambar 4. 3 Grafik 2D prediksi respon kekasaran permukaan tanpa pelumas (kering).....	58
Gambar 4. 4 Grafik 3D respon kekasaran permukaan dengan pelumas minyak nyamplung.....	59
Gambar 4. 5 Plot kontur 2D prediksi respon kekasaran permukaan pelumas minyak nyamplung.....	60
Gambar 4. 6 Grafik 3D respon kekasaran permukaan dengan pelumas VCO.....	61

Gambar 4. 7 Grafik 2D prediksi respon kekasaran permukaan tanpa pelumas (kering).....	62
---	----

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Rencana kegiatan penelitian.....	35
Tabel 3. 2 Parameter pemotongan.....	37
Tabel 3. 3 Parameter <i>box-behnken design</i> untuk menghasilkan respon.....	38
Tabel 3. 4 Spesifikasi pelumas minyak nyamplung.....	41
Tabel 3. 5 Spesifikasi pelumas VCO	41
Tabel 3. 6 Spesifikasi CNC <i>milling</i>	42
Tabel 3. 7 Spesifikasi pahat <i>endmill</i>	43
Tabel 3. 8 Spesifikasi <i>surface roughness tester</i>	44
Tabel 3. 9 Tabel metode RSM <i>box-behnken design</i>	47
Tabel 4. 1 Hasil pengukuran kekasaran permukaan tulang kortikal	48
Tabel 4. 2 <i>Fit summary</i> untuk kekasaran permukaan	50
Tabel 4. 3 ANOVA untuk kekasaran permukaan tulang	51
Tabel 4. 4 Kriteria untuk optimasi numerik	63
Tabel 4. 5 Solusi optimasi pemesinan frais.....	64

I.PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dunia kesehatan (*Medical*) terkhusus dalam bidang bedah ortopedi mengalami kemajuan yang sangat amat pesat terjadi dikarenakan kebutuhan prosedur bedah yang lebih teliti, akurat dan tidak meninggalkan trauma bagi pasien yang telah melakukan bedah ortopedi. Salah satu hal yang penting dalam proses bedah ortopedi adalah proses bedah tulang melalui proses pemesinan, terutama pada tulang bagian terkeras (Tulang kortikal). Tulang kortikal atau biasa di sebut dengan tulang padat merupakan salah satu *macrostructur* jaringan tulang yang memiliki sifat padat dan keras. Tulang kortikal imemiliki modulus elastis yang tinggi, sehingga mampu menahan tekanan mekanik berupa beban dan puntiran yang berat (Nuraini, 2020).

Meskipun pada proses pemesinan tulang memiliki standar prosedur dalam pembedahan, proses pemesinan tulang kortikal memiliki tantangan yang unik dibandingkan dengan proses pemesinan dengan material logam atau polimer. Sifat biologis tulang yang heterogen, anisotropik, dan viskoelastis, serta respons termal dan mekanisnya terhadap pemotongan, sangat memengaruhi kualitas pemesinan (Sharif, 2023). Panas yang berlebihan selama pemesinan adalah masalah utama yang dapat menyebabkan nekrosis termal pada sel-sel tulang (osteocytes). Nekrosis ini dapat menghambat proses penyembuhan tulang, menyebabkan kegagalan implan, dan bahkan infeksi (Rathod, 2023). Selain itu, kekuatan pemotongan yang tinggi dan getaran yang tidak terkontrol dapat menyebabkan kerusakan mikrostruktural pada tulang, seperti retakan dan delaminasi, yang mengurangi integritas mekanis tulang di sekitar area pemesinan (Liu, 2024).

Dalam upaya untuk meminimalkan kerusakan termal dan mekanis pada tulang selama pemesinan, penelitian telah difokuskan pada optimasi parameter pemesinan (seperti kecepatan makan, laju makan, dan kedalaman makan), desain pahat, serta metode pendinginan dan pelumasan (Siddiquee, 2021). Pelumasan merupakan salah satu yang terpenting dalam proses optimasi pemesinan, salah satu penggunaan pelumas yang sering di gunakan dalam proses pemesinan medis yaitu pelumas alami (Minyak nabati).

Minyak nabati merupakan salah satu bentuk minyak pendingin yang alami (tidak beracun), mudah terurai secara alami, dan ramah lingkungan, sehingga menjadikannya minyak pendingin yang sangat baik dalam proses pemesinan (Farehan, 2020). Salah satu minyak nabati yang cukup banyak ditemui dan berpotensi sebagai pendingin yaitu minyak dari ekstrak biji nyamplung. Pada penelitian (Pulungan, 2025) bahwa karakteristik minyak nyamplung, memiliki total nilai kekentalan yang tinggi (160,66 mPa.s) menunjukkan stabilitas kekentalan yang baik terhadap perubahan suhu, dimana diukur nilai kekentalannya secara gravitasi (55,64 mm²/s) dan nilai kekentalan ketika di beri gaya (51,44 mPa.s) pada suhu 40°C secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa sifat fisikokimia minyak nyamplung cocok untuk aplikasi pelumasan. Pelumasan adalah suatu proses atau teknik yang menggunakan zat perantara (pelumas) untuk mengurangi gesekan (*friction*) dan keausan (*wear*) antara dua permukaan padat yang saling bersentuhan dan bergerak relatif satu sama lain. Pelumasan terdiri dari berbagai macam teknik salah satu di antaranya *Minimum Quantity Lubrication* (MQL), merupakan teknik pelumasan dan pendinginan yang menggunakan jumlah cairan yang sedikit biasanya kurang dari 100 mL/jam yang disemprotkan langsung ke area pemotongan dalam bentuk kabut halus penerapan MQL mampu menurunkan gesekan pada zona potong, mengurangi pembentukan panas secara signifikan, serta meningkatkan kualitas permukaan dan umur pahat. (Pratama, 2025).

Dengan mempertimbangkan potensi yang signifikan untuk mendapat nilai kekasaran minimum dalam proses pemesinan tulang, penelitian ini menggabungkan pelumas dan parameter pemesinan dengan metode matematik RSM, metode matematik *Respon Surface Methode* (RSM) *Box*

Behnken Design (BBD) dilakukan dengan menetapkan tiga level pada setiap faktor penelitian, yaitu level rendah (-1), level tengah (0), dan level tinggi (+1) (Saputra, 2024). Dengan menerapkan RSM, diharapkan dapat ditemukan kombinasi parameter pemesinan frais pada tulang kortikal yang optimal untuk menghasilkan kekasaran permukaan minimum.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi parameter pemesinan freis (kecepatan putar, laju pemakanan, dan pelumas) terhadap kekasaran permukaan tulang kortikal?
2. Bagaimana model matematik yang dibangun menggunakan metode (RSM)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dari penelitian adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh parameter pemesinan freis (kecepatan putar, laju pemakanan, dan pelumas) terhadap kekasaran permukaan benda kerja.
2. Menentukan model optimasi parameter pemesinan freis menggunakan metode RSM.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material benda kerja yang digunakan adalah tulang sapi
2. Jenis pahat freis yang digunakan adalah *High Speed Steel* (HSS)
3. Parameter pemesinan yang di variasi meliputi kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong.

4. Pengujian kekasaran permukaan akan dilakukan dengan *roughnes surface tester*
5. Optimasi akan difokuskan pada minimisasi nilai kekasaran permukaan (Ra).

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

BAB II, Pada bab ini berisikan mengenai teori yang berhubungan dan mendukung pembahasan masalah yang diambil yaitu, struktur dan sifat biomekanik tulang, tantangan dalam pemesinan tulang, pemesinan frais, pisau pemesinan frais, parameter pemesinan, metode penelitian RSM, kekasaran permukaan, dan mekanisme kerja MQL

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

BAB IV, Bab ini berisikan tentang data serta hasil penelitian, perhitungan yang telah didapatkan selama penelitian, distribusi residual plot, *analysis of variance* (ANOVA), model matematika yang digunakan, plot interaksi kekasaran, dan optimasi parameter pemesinan frais.

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

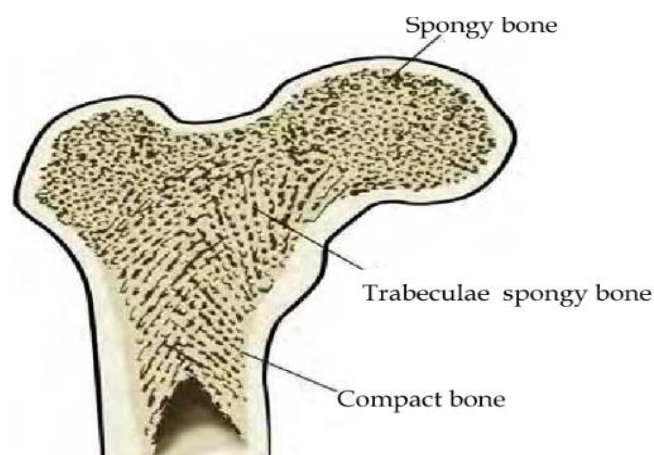
DAFTAR PUSTAKA, bab ini merupakan referensi daftar berisi informasi mengenai judul buku, nama pengarang, penerbit, dan sebagainya.

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

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur dan Sifat Biomekanik Tulang Kortikal

Tulang berperan dalam banyak mekanisme fisiologis karena tingkat plastisitasnya yang tinggi, yang sangat penting untuk pemeliharaan struktur, perlindungan, dan pergerakan. Jaringan tulang terdiri dari osteoblas, sel pelapis tulang, dan osteoklas selain dari deposit mineral (Naveen Kumar dkk, 2021). Tulang pada tubuh manusia dan mamalia lainnya umumnya di klasifikasikan menjadi dua jenis, yakni tulang kortikal yang dikenal sebagai tulang kompak dan tulang *trabecular* yang dikenal sebagai tulang *cancellous* atau tulang spons. Gambar 2.1 struktur tulang kortikal dan Konselus kedua jenis ini diklasifikasikan berdasarkan porositas dan struktur mikronya (Nuraini, 2020)



Gambar 2.1 Struktur Tulang Kortikal dan Konselus

(Sumber: Nuraini, 2020).

Tulang kortikal merupakan bagian terbesar (80%) penyusun kerangka manusia. Tulang ini memiliki modulus elastis yang tinggi, sehingga mampu menahan tekanan mekanik berupa beban tekukan atau puntiran yang berat, Tulang

kortikal juga sebagian besar terletak pada batang tulang panjang dan membungkus tulang trabecular pada ujung sendi dan vertebra (Ott, 2018). Sedangkan tulang trabecular atau disebut juga dengan tulang *cancellous*, merupakan tulang yang memiliki pori seperti spons dan kebanyakan pada tulang ini ditemukan di dekat permukaan sendi, pada akhir tulang panjang dan bagian dalam tulang pendek.

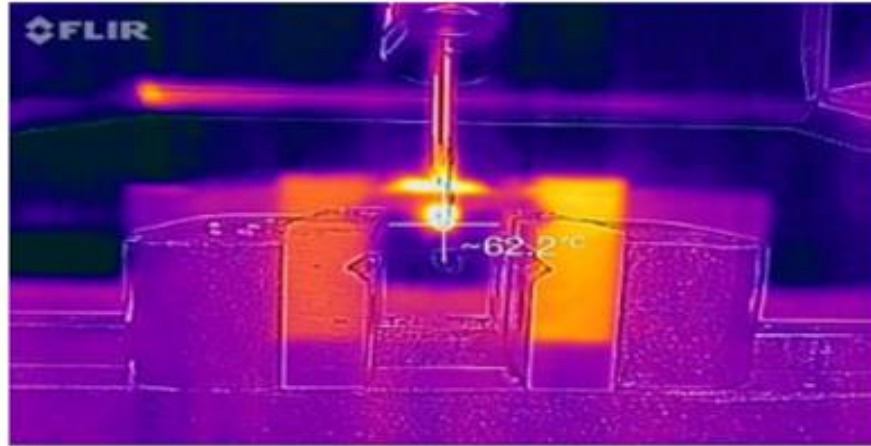
2.1.1 Aplikasi Pemesinan Tulang dalam Medis

Pemesinan tulang merupakan prosedur esensial dalam berbagai operasi bedah. Aplikasi umum meliputi:

1. *Osteotomi*: pemotongan tulang yang terkontrol untuk mengubah bentuk atau panjang tulang, seperti pada koreksi deformitas atau operasi sendi (Sharif et al., 2023).
2. Pengeboran Tulang: pembuatan lubang untuk fiksasi internal menggunakan sekrup atau pin, atau untuk pengambilan sampel biopsi (Saxena & Singh, 2022).
3. Pembersihan dan pembentukan rongga: proses untuk menyiapkan lokasi pemasangan implan, seperti pada penggantian sendi atau penempatan implan gigi.
4. Trevining: Pengambilan sampel berbentuk silinder dari tulang untuk analisis diagnostik. Presisi dan integritas tulang pasca-pemesinan sangat menentukan keberhasilan dan prognosis prosedur bedah.

2.1.2 Tantangan dalam Pemesinan Tulang

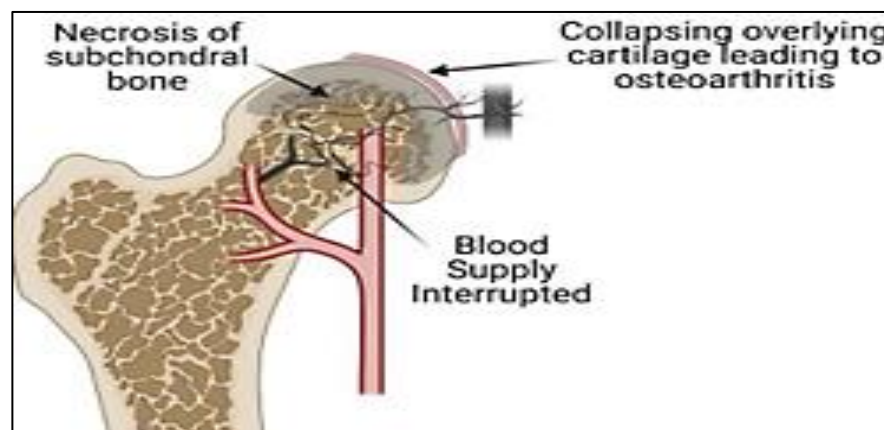
Salah satu tantangan terbesar dalam pemesinan tulang adalah pembangkitan panas di zona pemotongan. Energi mekanik yang digunakan untuk menghilangkan material sebagian besar diubah menjadi energi panas akibat gesekan antara pahat dan tulang, serta deformasi plastis material (Rathod, 2020). Gambar 2.2 *nekrosis thermal* pada jaringan tulang, terutama osteosit, sangat sensitif terhadap suhu tinggi. Paparan suhu di atas 47 selama satu menit dapat menyebabkan *nekrosis thermal*, yaitu kematian sel-sel tulang (Siddiquee, 2021).



Gambar 2. 2 *Nekrosis Thermal* Pada Jaringan Tulang

(Sumber : M.S Noorazizi dkk.,2014)

Nekrosis ini dapat menghambat proses *osteointegrasi* (penyatuan implan dengan tulang), memperpanjang waktu penyembuhan, meningkatkan risiko infeksi, dan bahkan menyebabkan kegagalan implan (Saxena & Singh, 2022). Oleh karena itu, kontrol suhu selama pemesinan tulang adalah prioritas utama. Gambar 2. 3 kerusakan mekanis pada tulang yang bisa terjadi pada saat proses pemesinan tulang seperti retakan mikro, delaminasi, dan *chatter* (getaran) yang dapat mengurangi integritas struktural tulang di sekitar area pemesinan (Liu, 2024).



Gambar 2. 3 Kerusakan Mekanis Pada Tulang

(Sumber : Sumit Murab dkk.,2021)

Gaya potong yang tinggi dapat menyebabkan tulang mengalami deformasi plastis atau bahkan fraktur mikro, yang mengganggu kemampuan tulang

untuk menopang beban setelah operasi. Kekasaran permukaan yang tinggi pada area yang dipotong juga dapat menghambat proses penyembuhan, meningkatkan risiko infeksi, dan mengurangi kekuatan *adhesi* implan (Sharif, 2023). Kualitas permukaan yang baik sangat penting untuk kontak optimal antara implan dan tulang, serta untuk meminimalkan respons inflamasi.

2.2 Pemesinan Freis

Pemesinan freis adalah salah satu proses pemesinan yang menggunakan pahat potong dengan mata potong jamak yang berputar (*multi-point cutting tools*). Proses pemotongan terjadi karena adanya hantaran (*feed*) benda kerja menuju pahat yang sedang berputar. Secara prinsip, mesin freis bekerja dengan cara melepaskan logam dari benda kerja menggunakan pisau frais (*cutter*) yang berputar pada spindel mesin. Berbeda dengan mesin bubut di mana benda kerja yang berputar, pada mesin frais umumnya benda kerja bergerak secara translasi (mendatar atau tegak) sementara pahat berputar pada posisi tetap.

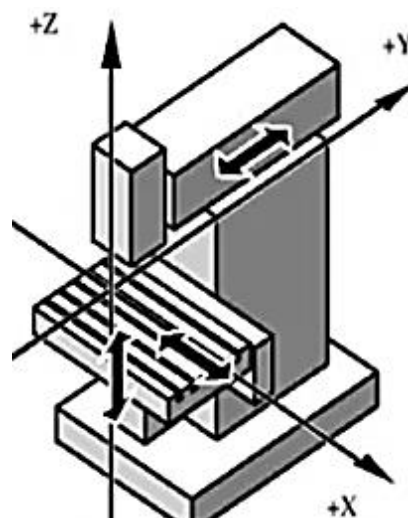
Proses pemesinan freis tidak hanya di gunakan pada pemotongan material logam akan tetapi dapat digunakan pada pemotongan material *non* logam dengan contoh dilakukan di dalam dunia medis (pemesinan frais tulang). Proses pemesinan frais tulang ini meliputi pemotongan, pengeboran, atau pembentukan tulang untuk tujuan rekonstruksi tulang yang mengalami kerusakan. Kualitas hasil pemesinan frais pada proses pemesinan sangat dipengaruhi dengan kepresisian pemotongan baik dalam menentukan parameter dan prosedur pemotongan terkhusus tulang pada kondisi anatomi, integritas jaringan, dan respons biologis pasca-operasi. Dalam beberapa tahun terakhir, pemesinan freis (*milling*) telah muncul sebagai alternatif menjanjikan. Metode ini menawarkan potensi untuk mencapai akurasi yang lebih tinggi, kualitas permukaan yang lebih baik, dan kerusakan termal yang lebih rendah pada tulang. Namun, sifat heterogen, anisotropik, dan viskoelastik tulang kortikal menghadirkan tantangan unik dalam mengoptimalkan parameter pemesinan.



Gambar 2. 4 Pemesinan Frais

(Sumber : Romiyadi 2016)

Pemesinan frais (*milling*) adalah suatu proses permesinan yang menggunakan alat potong berputar dengan mata potong jamak (*multiple cutting edges*) untuk menyayat dan menghilangkan material dari benda kerja (Sutrisno, 2023). Berbeda dengan proses bubut yang benda kerjanya berputar, pada proses frais alat potong (pisau frais) yang berputar, sementara benda kerja dicekam pada meja mesin dan bergerak secara translasi, gerakan ini yang disebut dengan gerak makan (*feed*). Gambar 2.5 sumbu gerak pemesinan frais dilakukan pada tiga sumbu koordinat (X, Y, dan Z), memungkinkan pembentukan berbagai geometri permukaan seperti permukaan datar, alur, *chamfer*, hingga bentuk-bentuk kompleks.

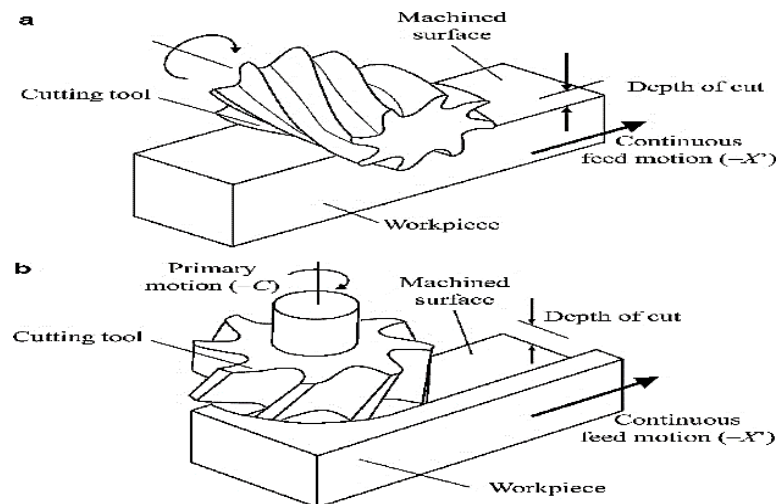


Gambar 2. 5 Sumbu gerak pemesinan frais

Prinsip kerja pemesian frais didasarkan pada dua gerakan utama, yaitu:

1. Gerak utama (gerak potong): gerakan rotasi dari pisau frais yang dipasang pada spindel. Kecepatan putaran ini diatur oleh kecepatan spindel (spindle speed) dalam satuan putaran per menit (rpm).
2. Gerak makan : gerakan translasi dari benda kerja relatif terhadap pisau frais. Gerakan ini bisa berupa pergerakan meja mesin (pada sumbu X dan Y) atau pergerakan spindel (pada sumbu Z), yang diatur oleh kecepatan makan (feed rate) dalam satuan milimeter per menit (mm/menit).

Jenis mesin frais ini dioperasikan secara manual oleh operator dengan memutar handwheel pada setiap sumbu. Berikut beberapa jenis sumbu mesin frais konvensional yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 6 (a) proses frais vertical, (b) proses frais horizontal

- a. Mesin frais horizontal: Spindel mesin terletak sejajar dengan meja mesin. Jenis ini cocok untuk pemotongan permukaan datar yang lebar dan pembuatan alur (Suteja, 2020).
- b. Mesin frais vertikal: Spindel mesin tegak lurus terhadap meja mesin. Mesin ini sangat fleksibel untuk pekerjaan seperti *pocketing*, *drilling*, dan pembuatan alur (*slotting*).

Selain pemesian frais penggerak manual, pada saat ini telah dibuat mesin frais dengan berbagai jenis yang sama dengan mesin konvensional tetapi menggunakan kendali CNC (*Computer Numerically Controlled*) (Dwi, 2010).

Pemesinan frais CNC adalah proses otomatis yang dikendalikan oleh program komputer (*G-Code*). Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama:

1. Unit kontrol : Komputer yang memproses program *G-Code*.
2. Motor *servo*: Menggerakkan sumbu-sumbu mesin (X, Y, Z) berdasarkan perintah dari unit kontrol.
3. Pahat potong dan pemegang pahat (*Tool Holder*): Pahat yang digunakan pada mesin frais CNC umumnya menggunakan material performa tinggi seperti karbida, dengan geometri yang dirancang untuk efisiensi pemotongan dan umur pahat yang panjang (Klok, 2021).
4. Sistem koordinat: Mesin CNC bekerja dengan sistem koordinat *Cartesian* (X,Y,Z) untuk menentukan setiap gerakan pahat.

Keunggulan utama mesin frais CNC adalah kemampuannya untuk mencapai akurasi dan presisi yang sangat tinggi, mengurangi kesalahan manusia (*human error*), serta meningkatkan kecepatan dan efisiensi produksi. Teknologi ini memungkinkan pembuatan komponen dengan geometri yang sangat kompleks yang tidak dapat dikerjakan dengan mesin konvensional (Rahman, 2024).

2.2.1 Pisau Pemesinan Frais

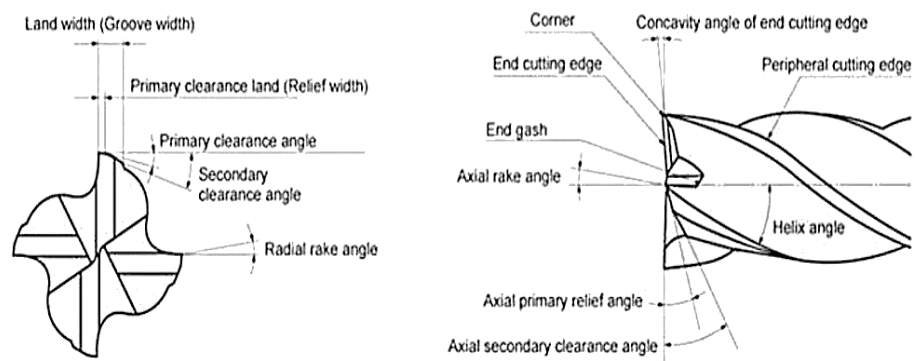
Pisau frais atau gigi pisau frais pada umumnya terbuat dari bahan-bahan high speed steel (HSS), *cemented carbide* atau *cast alloy*. Pisau pemesinan frais pada umumnya dapat dibedakan mejadi pisau frais solid dan pisau frais *inserted* (Rahdiyanta, 2010). Pisau frais tipe solid adalah jenis alat potong pada mesin frais yang seluruh bagiannya (badan dan mata potong) dibuat dari satu material utuh. Sedangkan pisau frais tipe insert (*insertable milling cutter*) adalah salah satu jenis perkakas potong yang paling banyak digunakan dalam industri manufaktur modern. Berbeda dengan dua mata pisau sebelumnya yang sering digunakan pemesinan logam, dalam dunia bedah ortopedi memiliki pisau khusus pada pemesinan bedah ortopedi (tulang) yaitu pisau bor (*Drill Bit*) dan Pisau Frais (*End Mill*) . Berikut gambar 2.7 pisau frais (*end mill*).



Gambar 2. 7 Pisau Frais (*End Mill*).

Sumber : (Amos and Birru, 2020)

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.



Gambar 2. 8 Geometri Pisau Frais (*End Mill*).

Sumber : (Lucky Wihelman 2022).

Tingkat kekasaran pada *endmill* dapat dilihat dengan variasi jumlah mata sayat cutter (*end mill*) dimana pada sudut penyayatan sangat mempengaruhi hasil dari penyayatan benda kerja apabila sudut sayat (*cutter endmill*) semakin kecil sudut penyayatan maka kekuatan potong cutter endmill lebih kuat tetapi pada sudut yang kecil tidak terlalu tajam untuk melakukan penyayatan benda kerja. Sedangkan sudut penyayatan yang terlalu besar maka dalam proses pemesinan akan mudah aus dikarenakan kekuatan terhadap cutter terlalu kecil meskipun lebih tajam tetapi mempunyai sudut penyayatan yang kecil.

2.2.2 Parameter Pemesinan

Kualitas hasil pemesinan frais sangat dipengaruhi oleh parameter pemesinan, antara lain:

1. Kecepatan potong (*cutting speed, Vc*): kecepatan linier mata potong saat bersentuhan dengan benda kerja, dihitung dari kecepatan putaran spindel (N) dan diameter pisau (D). Pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan dan umur pahat sangat signifikan.

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

Keterangan:

- a. V: kecepatan potong (m/menit).
 - b. d: diameter pisau frais atau benda kerja (mm).
 - c. n: kecepatan putaran spindel (Rpm).
 - d. π : konstanta lingkaran (3,14).
 - e. 1000: angka pembagi untuk mengubah satuan milimeter (d) menjadi meter agar sesuai dengan satuan V (m/menit).
2. Gerak makan per gigi (fz) : 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.

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

Keterangan:

- a. (fz) gerak makan per gigi.
 - b. (Vf) kecepatan makan (mm/menit).
 - c. (z) jumlah mata potong
 - d. (n) kecepatan putaran spindel (Rpm).
3. 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.
 - 2) Kedalaman potong radial (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).

$$z = \frac{vf \cdot a \cdot w}{1000} = \text{cm}^3/\text{menit} \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

- a. vf (kecepatan makan/*feed speed*): seberapa cepat meja mesin bergerak membawa benda kerja menuju pisau (mm/menit).
- b. a (kedalaman potong/*depth of cut*): jarak masuknya ujung pisau ke dalam permukaan benda kerja secara vertikal (mm).
- c. w (lebar pemotongan/*width of cut*): lebar area yang tersayat oleh pisau dalam satu lintasan (mm).

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

- a. t_c (waktu pemotongan): lama pemotongan (m).
- b. lt (panjang pemotongan): merupakan panjang total lintasan pahat (mm).
- c. Dalam praktiknya, lt biasanya mencakup panjang benda kerja ditambah dengan jarak awal (start) dan jarak bebas (overtravel) pahat agar pemotongan sempurna.
- d. vf (kecepatan makan): laju pemakanan dalam pemesinan (mm/menit).
5. Kriteria umur pahat dapat digunakan untuk menentukan umur pahat jika konstanta pemotongan dan kecepatan pemotongan diketahui. Umur pahat ditentukan oleh batas keausannya. Keausan tepi (V_b) dianggap sebagai fungsi pangkat dari waktu pemotongan (t) dan, ketika diplot pada skala logaritma ganda, menunjukkan hubungan linier. Persamaan kriteria umur pahat ditemukan oleh F.W. Taylor dan sering disebut sebagai "persamaan umur pahat Taylor." (Muhammad Daud, 2021). Persamaan tersebut dapat dilihat pada rumus berikut:

$$V_c \times T^n = C \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

- a) CT = konstanta umur pahat Taylor (mm atau μm)
 - b) V_c = kecepatan potong (mm/menit)
 - c) T = lama waktu pemotongan (menit)
 - d) n = harga eksponen
6. *Material removal rate* (MRR) adalah material yang dihilangkan setelah dilakukan proses pemesinan dengan satuan waktu (mm^3/min atau cm^3/min), yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas. MRR dipengaruhi oleh kecepatan pemotongan, laju pemakanan, dan kedalaman pemotongan, dengan rumus dasar

$$MMR = 1000 \times V_c \times f \times t \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan :

- a) V = kecepatan makan (m/menit)
- b) f = laju pemakanan (mm/revolution)
- c) t = kedalaman makan (mm)

2.3 Response Surface Methodology (RSM)

Response Surface Methodology (RSM) adalah kumpulan teknik matematika dan statistika yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis masalah di mana sebuah respons (variabel dependen) dipengaruhi oleh beberapa variabel independen, dengan tujuan untuk mengoptimalkan respons tersebut (Montgomery, 2017). Pendekatan ini mengatasi metode tradisional yang hanya mengubah satu faktor pada satu waktu, yang tidak mampu menangkap interaksi antar faktor. Tahapan dasar dalam RSM meliputi:

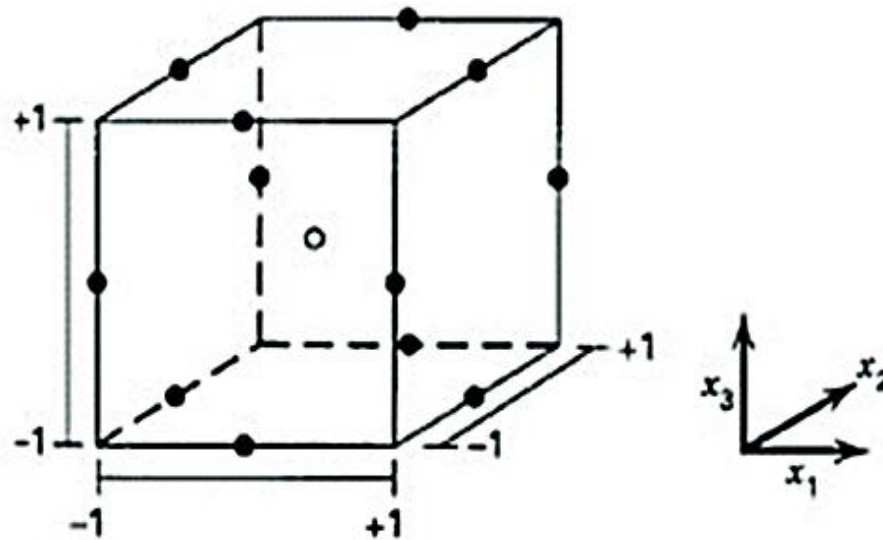
1. Perancangan eksperimen (*experimental design*): menggunakan desain eksperimen yang efisien untuk mengumpulkan data. Desain yang umum digunakan dalam RSM adalah *central composite design* (CCD) dan *box-behnken design* (BBD). Desain ini memungkinkan estimasi koefisien model kuadratik dan eksplorasi area respons dengan jumlah percobaan yang relatif minimal (Das & Patra, 2020).

2. **Pemodelan Statistika:** Mengembangkan model matematis, biasanya dalam bentuk persamaan polinomial orde kedua, yang menggambarkan hubungan antara variabel masukan dan respons.

Oleh karena itu, RSM banyak digunakan dalam formulasi materi, pengembangan produk, dan optimasi parameter pemesinan. Misalnya, ini digunakan untuk menemukan kombinasi kecepatan potong, laju pemakanan, dan pendinginan terbaik. Kelebihan tambahan dari metode ini adalah memungkinkan peneliti menemukan kondisi operasi yang ideal sekaligus menyimpulkan respon di luar titik eksperimen yang diuji, yang membuat RSM dianggap sebagai metode yang efektif dan hemat sumber daya (Caesarendra, 2024).

2.4 Desain Box-Behnken (BBD)

Box-behnken design (BBD) merupakan salah satu jenis desain eksperimen dalam kerangka RSM yang dikembangkan oleh George E. P. Box dan Donald Behnken pada tahun 1960. Desain ini merupakan desain faktorial tiga level, yang ditandai dengan kombinasi eksperimen yang berada di titik tengah dari setiap sisi kubus eksperimen dan di titik pusat (*center point*) (Karimi et al., 2023). Gambar 2. 9 kubus BBD untuk tiga faktor : -1 (rendah), 0 (tengah), dan +1 (tinggi). Pada desain BBD ini memungkinkan peneliti membuat model kuadratik yang tidak hanya dapat memprediksi respons dengan sangat akurat, tetapi juga dapat mengungkap interaksi antar-faktor yang mungkin sulit ditemukan dengan teknik eksperimen konvensional. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa *box-behnken* lebih efisien dalam mengurangi jumlah percobaan dibandingkan dengan desain faktorial penuh, yang berarti lebih sedikit sumber daya digunakan tanpa mengurangi kualitas model. Namun demikian, jumlah kombinasi percobaan meningkat secara signifikan ketika elemen kategorikal seperti jenis sorben atau jenis material dimasukkan ke dalam perancangan. Hal ini menunjukkan bahwa, meskipun desain *box-behnken* yang terkenal memiliki resolusi dan efisiensi yang tinggi, kompleksitas eksperimen masih diperlukan (Celso & Cardoso 2025).



Gambar 2. 9 Kubus BBD Untuk Tiga Faktor

(Sumber: Ferreira et. al, 2007)

Seperti yang di ilustrasikan pada gambar skema kubus desain, model ini melibatkan tiga faktor (X_1 , X_2 , X_3) dengan distribusi titik percobaan yang terletak pada titik tengah setiap tepi kubus serta titik pusat. Secara geometris, untuk tiga faktor parameter, desain ini membentuk 13 titik percobaan unik. Jumlah ini terdiri dari 12 titik yang berada di tengah-tengah rusuk kubus dan 1 titik pusat (C_0) (Ghasemi, 2020). Meskipun dalam standar perangkat lunak statistik seperti *design expert* atau *minitab* sering kali digunakan total 15 titik (dengan penambahan replikasi pada titik pusat untuk mengestimasi kesalahan eksperimental dan memeriksa (*lack of fit*), secara visual ketiga titik pusat tersebut berada pada koordinat yang sama $(0, 0, 0)$. Jumlah percobaan untuk BBD dapat dihitung dengan rumus:

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

- a. N = jumlah percobaan
- b. k = jumlah faktor
- c. C_0 = jumlah replikasi titik pusat

2.4.1 Model Matematika

Data yang diperoleh dari eksperimen BBD dapat dianalisis melalui persamaan polinomial orde kedua merupakan persamaan paling umum digunakan dan dikembangkan untuk menyesuaikan data eksperimental dan menentukan istilah model yang relevan dapat ditulis sebagai berikut.

$$Y, \% = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j^2 \dots \dots \dots (8)$$

Persamaan polinomial orde kedua diatas menjelaskan bahwa, Y adalah respon, β_0 koefisien konstan. β_i , β_{ii} , dan β_{ij} adalah efek orde pertama, orde kedua, dan interaksi. x_i dan x_j adalah variabel independent (Ghasemi, 2020). Analisis model ini biasanya dilakukan dengan *analysis of variance* (ANOVA) untuk menentukan signifikansi statistik dari setiap koefisien model, serta untuk menguji kecocokan model (*goodness of fit*).

2.4.2 Keunggulan dan Aplikasi BBD

Berdasarkan *Global nest journal* (2020) *box-behnken design* memiliki beberapa keunggulan utama :

1. Jumlah percobaan yang cenderung sedikit dibandingkan dengan *CCD* (*Central Composite Desain*)
2. *Box-behnken design* memungkinkan menentukan korelasi matematis antara variabel independen dan dependen
3. Dalam memprediksi efisiensi yang dilakukan peneliti melalui desain experiment *box-behnken design* didapat hasil yang memuaskan .

BBD telah banyak diterapkan di berbagai bidang untuk mengoptimalkan berbagai proses. Contoh aplikasinya meliputi:

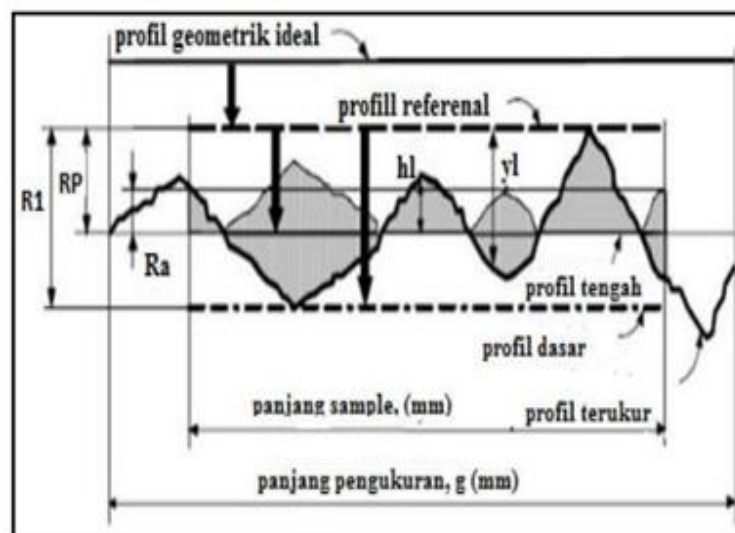
- 1 Bioenergi: optimalisasi produksi biodiesel dari minyak nabati (Nurul et al., 2021).

- 2 Pengolahan lingkungan: optimalisasi parameter proses untuk menghilangkan polutan dari air limbah (Maimaiti, 2022).
- 3 Teknik Pemesinan: pengaruh parameter pemesinan terhadap kesalahan *circularity* lubang bor tulang kortikal (Adilla, 2024).

Dengan keunggulan ini, BBD menjadi salah satu alat yang efisien dalam Desain Eksperimen untuk memetakan dan mengoptimalkan respons dari suatu proses.

2.5 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan ukuran/nilai kasar nya permukaan suatu material atau tinggi rendah nya suatu permukaan material yang di ukur dari suatu titik acuan (Budiana,dkk., 2020). Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai deviasi mikroskopis dari permukaan ideal, yang terbentuk dari puncak dan lembah yang tidak beraturan akibat proses pemesinan. Kekasaran permukaan memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja fungsional suatu komponen, seperti ketahanan aus, kekuatan lelah, sifat korosi, kemampuan pelumasan, dan bahkan aspek estetika (Grzesik, 2019). Semakin rendah nilai kekasaran permukaan, semakin halus dan berkualitas permukaan benda kerja tersebut.



Gambar 2. 10 Parameter kekasaran permukaan

(Sumber: Aminy & Aji, 2021)

Dari gambar di atas, dapat didefinisikan beberapa parameter kekasaran permukaan, yaitu :

- 1) Kekasaran total (R_t) merupakan jarak antara garis referensi dengan garis alas.
- 2) Kekasaran perataan (R_p) merupakan jarak rata-rata antara garis referensi dengan garis terukur.
- 3) Kekasaran rata-rata aritmatik (R_a) merupakan nilai rata-rata aritmatik antara garis tengah dan garis terukur.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l h(x) dx \quad (9)$$

- 4) 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.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l h^2(x) dx} \quad (10)$$

- 5) 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 ke profil terukur pada lima lembah terendah.

$$R_z = \frac{1}{5} [\sum_{i=1}^5 h_i - \sum_{j=1}^5 h_j] \quad (11)$$

2.5.1 Parameter Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan berbagai parameter standar. Parameter yang paling umum digunakan adalah:

- 1 R_a (*arithmetic average roughness*): Ini adalah parameter kekasaran yang paling sering digunakan dan diakui secara internasional. R_a didefinisikan sebagai nilai rata-rata aritmetik dari nilai absolut simpangan profil kekasaran dari garis tengah. Meskipun banyak digunakan karena kesederhanaannya, R_a kurang sensitif terhadap puncak dan lembah yang ekstrem (Mahardika, 2023).
- 2 R_z (*maximum height of the profile*): R_z adalah jarak vertikal rata-rata antara lima puncak tertinggi dan lima lembah terendah dalam panjang

sampel. Parameter ini lebih sensitif terhadap cacat permukaan atau puncak dan lembah yang menonjol dibandingkan Ra.

- 3 Rmax (*maximum roughness depth*): Rmax adalah jarak vertikal antara puncak tertinggi dan lembah terendah dalam panjang sampel.
- 4 Rq (*root mean square roughness*): Rq adalah nilai kuadrat rata-rata (RMS) dari simpangan profil kekasaran dari garis tengah. Rq lebih sensitif terhadap variasi besar dalam profil kekasaran dibandingkan Ra. Dalam banyak aplikasi industri, nilai Ra menjadi parameter utama yang dipertimbangkan untuk menilai kualitas permukaan hasil pemesinan karena kemudahan interpretasi dan penggunaannya yang luas (Kumar, 2020).

2.6 Parameter Pengukuran Kekasaran Permukaan

Terdapat beberapa parameter standar yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan. Parameter ini biasanya diperoleh dari profil permukaan yang diukur menggunakan alat khusus. Parameter yang paling umum digunakan adalah Ra (*arithmetic average roughness*). Ra adalah nilai rata-rata aritmetika dari seluruh jarak absolut profil dari garis tengah (*mean line*) dalam satu panjang sampel. Parameter ini paling sering digunakan karena sederhana dan memberikan gambaran umum kekasaran.

Rumus untuk menghitung Ra adalah:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \dots \dots \dots (12)$$

Rumus dapat dijabarkan :

$$Ra = \frac{(y_1) + (y_2) + \dots + (y_n)}{n} \dots \dots \dots (13)$$

Keterangan:

L = panjang sample (*sampling length*)

$y(x)$ = profil permukaan pada posisi x

N = jumlah titik data

y_i = jarak profil dari garis tengah pada titik ke- i

2.6.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi. Faktor-faktor ini dapat dikategorikan menjadi beberapa kelompok terutama pada hasil permukaan dari proses pemotongan benda yang telah dilakukan di pemesinan adalah sebagai berikut.

- 1) Kecepatan Potong *cutting speed* (V_c): peningkatan kecepatan potong pada umumnya cenderung mengurangi kekasaran permukaan sampai batas tertentu. Hal ini disebabkan oleh penurunan gaya potong, pembentukan chip yang lebih baik, dan efek termal yang dapat melunakkan material pada zona geser (Duduzile & Raseshodi, 2021). Namun, kecepatan potong yang terlalu tinggi dapat menyebabkan keausan pahat yang cepat dan getaran, sehingga dapat meningkatkan kekasaran.
- 2) Kecepatan makan *feed rate* (f): kecepatan makan memiliki korelasi positif yang kuat dengan kekasaran permukaan. Peningkatan kecepatan makan akan menghasilkan puncak dan lembah yang lebih tinggi pada permukaan yang dimesin, sehingga meningkatkan nilai kekasaran (Rao, 2022). Oleh karena itu, kecepatan makan yang lebih rendah umumnya menghasilkan permukaan yang lebih halus.
- 3) Kedalaman potong *depth of cut* (ap): kedalaman potong biasanya memiliki pengaruh yang lebih kecil dibandingkan kecepatan makan dan kecepatan potong, terutama pada proses *finishing*. Namun, kedalaman potong yang terlalu besar dapat meningkatkan gaya potong dan defleksi pahat, yang berpotensi meningkatkan kekasaran (Agrawal, 2020). Pada

proses finishing, kedalaman potong yang dangkal sering digunakan untuk mencapai permukaan yang halus.

2.6.2 Pentingnya Kekasaran Permukaan dalam Aplikasi Industri

Kontrol kekasaran permukaan sangat penting dalam berbagai aplikasi industri karena secara langsung memengaruhi:

- 1) Ketahanan aus: permukaan yang lebih kasar cenderung memiliki lebih banyak titik kontak yang menonjol, meningkatkan tekanan lokal dan mempercepat keausan.
- 2) Kekuatan lelah: retakan lelah seringkali berawal dari cacat permukaan atau konsentrasi tegangan pada puncak kekasaran. Permukaan yang halus dapat meningkatkan kekuatan lelah komponen.
- 3) Ketahanan korosi: permukaan yang kasar memiliki lebih banyak celah dan area yang dapat menahan kontaminan, yang dapat mempercepat proses korosi.
- 4) Sifat pelumasan: permukaan yang lebih halus dapat mempertahankan lapisan pelumas yang lebih tipis dan seragam, mengurangi gesekan dan keausan.
- 5) Aspek fungsional: dalam aplikasi seperti segel dan *bearing*, kekasaran permukaan yang tepat sangat penting untuk kinerja optimal dan mencegah kebocoran atau kerusakan (Wang & Xu, 2022).

Oleh karena itu, optimasi parameter pemesinan untuk mencapai kekasaran permukaan yang diinginkan merupakan aspek krusial dalam rekayasa manufaktur untuk memastikan kinerja dan keandalan produk.

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.

2.7 Analisis Of Varian (ANOVA)

1. Jumlah kuadrat (*sum of square*)

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

$$SS = \sum x^2 - \frac{G^2}{N} \dots \dots \dots (14)$$

Keterangan:

x : data dari masing-masing kelompok

G : total x dari seluruh kelompok

N : jumlah sampel keseluruhan

2. Derajat kebebasan (*degree of freedom*)

Derajat kebebasan dalam SS dapat dihitung dengan rumus:

$$V_{SS} = n - 1 \dots \dots \dots (15)$$

Keterangan:

V : *degree of freedom*

SS : *sum of square*

n : jumlah sampel

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

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

$$MS_b = \frac{SS_b}{V_{SS_b}} \dots \dots \dots (16)$$

$$MS_w = \frac{SS_w}{V_{SS_w}} \dots \dots \dots (17)$$

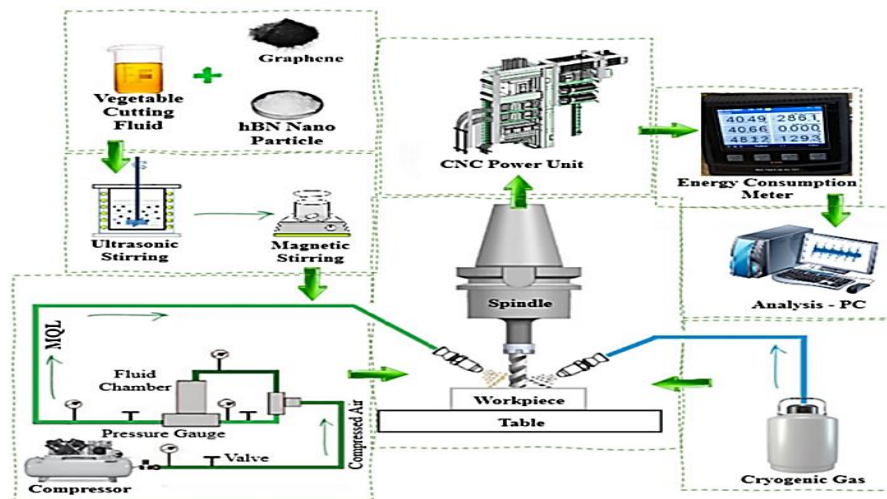
4. F_{tabel} dihitung dengan melihat nilai α , F_{hitung} didapatkan dengan rumus dibawah ini:

$$F_{hitung} = \frac{MS_b}{MS_w} \dots \dots \dots (18)$$

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

2.8 Mekanisme MQL (Minimum Quantity Lubrication)

Minimum Quantity Lubrication (MQL), atau yang sering disebut "*near-dry machining*" atau "*micro-lubrication*" adalah teknik pelumasan yang bertujuan untuk mengurangi penggunaan cairan pendingin konvensional (*cutting fluid quantity*) secara drastis dalam proses pemesinan. Berbeda dengan cara tradisional yang menggunakan cairan pendingin dalam jumlah besar (basah), sedangkan penggunaan MQL hanya memakai sedikit cairan. *Minimum quantity lubrication* (MQL) merupakan campuran udara bertekanan tinggi dan kabut minyak dalam jumlah sangat kecil (biasanya 5-50 ml/jam) langsung ke zona pemotongan (Deldoum, 2021; Sani, 2022).



Gambar 2. 11 Skema proses pemesinan fres dengan MQL

(Sumber: Yurtkuran, 2024)

Meskipun MQL di sebut "pelumasan minimum" mekanisme MQL tidak hanya berfokus pada pelumasan. MQL bekerja berdasarkan prinsip kombinasi efek pelumasan, pendinginan, dan pembersihan chip secara simultan namun dengan cara yang sangat efisien (Mia, 2020). Sistem MQL umumnya terdiri dari

reservoir minyak, pompa dosis, sistem pencampur udara, minyak, dan nosel yang mengarahkan kabut ke antar muka pahat dan benda kerja.

2.8.1 Mekanisme Kerja MQL

Mekanisme kerja MQL untuk meningkatkan kinerja pemesinan dan kualitas permukaan dapat dijelaskan melalui beberapa aspek utama:

1. Efek Pelumasan

Pelumasan adalah fungsi utama MQL. Kabut minyak yang halus menembus zona gesekan antara pahat dan chip, serta antara pahat dan permukaan benda kerja. *Droplet* minyak mikron berukuran kecil ini mampu masuk ke celah-celah terkecil dan membentuk lapisan film pelumas yang tipis namun efektif. Lapisan film ini berfungsi untuk:

- 1) Mengurangi koefisien gesek: pelumas MQL mengurangi gesekan antara pahat dan benda kerja, yang pada gilirannya mengurangi panas yang dihasilkan dan gaya potong (Maruda, 2020).
- 2) Mencegah pembentukan BUE (*built-up Edge*): dengan mengurangi gesekan dan *adhesi*, MQL membantu mencegah penempelan material benda kerja pada ujung pahat (BUE). Pembentukan BUE yang tidak stabil seringkali menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan dan keausan pahat yang cepat (Sarkar, 2023).
- 3) Meningkatkan umur pahat: pengurangan gesekan dan panas di zona potong berkontribusi pada penurunan keausan pahat, sehingga memperpanjang umur pakai pahat.

2. Efek Pendinginan

Meskipun jumlah pelumas yang digunakan sangat kecil, efek pendinginan tetap ada dan cukup signifikan. Pendinginan pada MQL terjadi melalui dua mekanisme utama:

- 1) Penguapan minyak: ketika *droplet* minyak bersentuhan dengan permukaan panas pada zona potong, mereka menguap. Proses penguapan ini menyerap panas laten dari area kontak, sehingga

memberikan efek pendinginan yang terbatas namun efektif pada titik panas tertinggi (Mia, 2020).

- 2) Aliran udara bertekanan: udara bertekanan tinggi yang membawa kabut minyak juga berperan sebagai pendingin konvektif, membantu menghilangkan panas dari zona pemotongan dan mencegah penumpukan panas berlebih (Pereira, 2020).

3. Efek Pembersihan Chip

Aliran udara bertekanan tinggi dalam sistem MQL sangat efektif dalam meniup chip dari zona pemotongan. Pembuangan chip yang efisien mencegah chip menumpuk dan menggesek permukaan benda kerja atau pahat, yang dapat menyebabkan goresan dan meningkatkan kekasaran permukaan (Debbarna, 2023). Pembersihan chip yang baik juga mengurangi risiko chip menempel pada pahat atau benda kerja, yang dapat memperburuk BUE.

2.8.2 Keuntungan dan Kekurangan MQL

1. Keuntungan MQL

- 1) Ramah lingkungan: pengurangan konsumsi cairan pendingin secara drastis (hingga 90-95%) mengurangi limbah berbahaya, kebutuhan akan pengolahan limbah, dan emisi VOC (*volatile organic compounds*) (Shokouhmand, 2022).
- 2) Ekonomis: mengurangi biaya pembelian, penyimpanan, pemeliharaan, dan pembuangan *cutting fluid* konvensional. Juga mengurangi biaya terkait pembersihan komponen setelah pemesinan (Sani, 2022).
- 3) Peningkatan kualitas permukaan: dengan pelumasan yang efektif dan pengurangan BUE, MQL seringkali menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah dibandingkan pemesinan kering (Das, 2021).
- 4) Peningkatan umur pahat: pengurangan gesekan dan panas dapat memperpanjang umur pahat.

- 5) Kesehatan dan keselamatan kerja: mengurangi paparan pekerja terhadap asap minyak dan iritasi kulit yang disebabkan oleh *cutting fluid* konvensional.
- 6) Benda kerja bersih: komponen yang dimesin dengan MQL relatif lebih bersih dan kering, mengurangi atau bahkan menghilangkan kebutuhan akan operasi pencucian pasca pemesinan.

2 Kekurangan MQL

- 1) Efek pendinginan terbatas: untuk aplikasi pemesinan yang menghasilkan panas sangat tinggi (misalnya, pemesinan material keras atau pemotongan berat), efek pendinginan MQL mungkin tidak memadai dibandingkan pendinginan banjir.
- 2) Kompleksitas sistem: sistem MQL memerlukan kontrol yang presisi terhadap aliran udara dan minyak, yang bisa lebih kompleks dibandingkan sistem pendingin banjir sederhana.
- 3) Viskositas minyak: pemilihan jenis minyak sangat penting, minyak dengan viskositas yang tidak sesuai dapat menyebabkan masalah atomisasi atau kurangnya penetrasi (Mia, 2020).
- 4) Masalah pembuangan panas: pada aplikasi tertentu, panas dapat terakumulasi di benda kerja atau pahat, yang berpotensi memengaruhi integritas material atau stabilitas dimensi.

2.8.3 Aplikasi dan Tren Penelitian MQL

MQL telah sukses diterapkan dalam berbagai operasi pemesinan seperti penggilingan, pembubutan, pengeboran, dan gerinda untuk berbagai jenis material, termasuk baja, paduan aluminium, dan paduan super (Sani, 2022; Debbarma, 2023). Tren penelitian terbaru dalam MQL berfokus pada:

- 1) Pengembangan *nano fluid* untuk MQL: menggabungkan MQL dengan *nano fluid* (seperti *nano fluid* berbasis minyak nyamplung dalam penelitian ini) untuk meningkatkan efisiensi pelumasan dan pendinginan. *Nanopartikel* dapat meningkatkan konduktivitas termal dan kemampuan penetrasi pelumas, serta membentuk lapisan pelindung pada permukaan gesek (Sharma et al., 2021; Kamble et al., 2022).

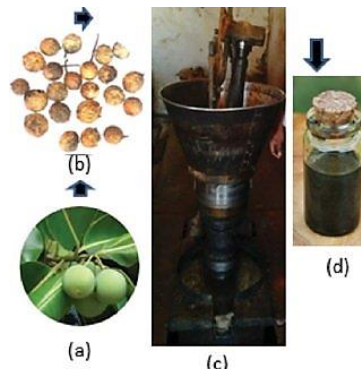
- 2) MQL internal: mengembangkan sistem MQL di mana pelumas dikirimkan melalui saluran internal pada pahat untuk memastikan pengiriman yang lebih presisi ke zona pemotongan.
- 3) Optimalisasi parameter MQL: penelitian yang lebih mendalam tentang bagaimana parameter MQL (tekanan udara, laju aliran minyak, posisi nosel) memengaruhi kinerja pemesinan.
- 4) MQL untuk material sulit dimesin: menerapkan MQL pada material yang sulit dimesin seperti paduan titanium dan paduan nikel, di mana pengelolaan panas dan gesekan sangat kritis.

Secara keseluruhan, MQL mewakili langkah signifikan menuju pemesinan yang lebih berkelanjutan. Kombinasinya dengan pelumas berbasis *bio* dan *nano fluid* menunjukkan potensi besar untuk lebih meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan dari proses manufaktur.

2.9 Pelumas Minyak Nabati

Pelumas adalah komponen krusial dalam berbagai proses mekanis dan manufaktur, termasuk pemesinan. Secara tradisional, pelumas berbasis minyak bumi (*mineral oils*) telah mendominasi pasar karena kinerjanya yang baik dan ketersediaannya. Namun, kesadaran akan masalah lingkungan, keterbatasan sumber daya fosil, dan isu kesehatan pekerja telah mendorong penelitian intensif terhadap alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (*biodegradable*). Minyak nabati adalah *trigliserida* yang diekstrak dari tumbuhan dan memiliki sifat pelumas karena struktur kimianya yang terdiri dari rantai asam lemak panjang. Contoh tumbuhan penghasil minyak nabati adalah kelapa sawit, kelapa, kedelai, bunga matahari, *rapeseed*, dan jarak menurut Salih (2021). Pada minyak nabati terdapat senyawa *trigliserida* yaitu 15 suatu ester asam lemak dengan gliserol yang tersusun oleh elemen hidrogen, karbon dan oksigen. Struktur kimia trigliserida.

Minyak nabati diekstrak dari biji, buah, atau bagian lain dari tanaman. Beberapa contoh umum meliputi minyak sawit, minyak jarak, minyak bunga matahari, minyak kedelai, dan minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*). Gambar 2.13 proses pengolahan dari biji di ekstrak menjadi minyak.



Gambar 2. 12 Proses pengolahan dari biji di ekstrak menjadi minyak

Penggunaan minyak nabati sebagai pelumas, baik murni maupun termodifikasi, telah menarik perhatian besar dalam dekade terakhir. Sifat *biodegradabilitas* dan *toksistas* rendah menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan, sejalan dengan tren global menuju praktik industri yang lebih hijau. Selain itu, minyak nabati memiliki indeks viskositas alami yang tinggi dan sifat pelumasan yang baik.

2.9.1 Keunggulan Minyak Nabati sebagai Pelumas

Minyak nabati memiliki beberapa keunggulan signifikan yang menjadikannya pilihan menarik sebagai pelumas, terutama dalam aplikasi pemesinan:

1. Biodegradabilitas tinggi: ini adalah keunggulan utama minyak nabati. Struktur kimianya yang berbasis ester membuatnya mudah terurai secara alami oleh mikroorganisme di lingkungan, sehingga mengurangi dampak pencemaran air dan tanah (Hassan & Azhari, 2022). Ini kontras dengan minyak mineral yang persisten di lingkungan.
2. Toksisitas rendah: umumnya, minyak nabati tidak beracun atau memiliki tingkat toksistas yang sangat rendah bagi manusia dan ekosistem. Ini meningkatkan keselamatan kerja di lingkungan manufaktur dengan mengurangi risiko iritasi kulit, masalah pernapasan, dan dampak kesehatan lainnya yang sering dikaitkan dengan pelumas berbasis minyak bumi.
3. Sumber daya terbarukan: minyak nabati berasal dari tanaman, yang merupakan sumber daya terbarukan. Hal ini mengurangi

ketergantungan pada sumber daya fosil yang terbatas dan tidak terbarukan (Tjong, 2021).

4. Sifat pelumasan alami yang baik: minyak nabati memiliki struktur *trigliserida* dengan rantai asam lemak panjang yang mengandung ikatan ester. Gugus polar ester ini cenderung menempel pada permukaan logam, membentuk lapisan pelumas yang kuat dan stabil. Ini memberikan sifat lubrisitas (*lubricity*) yang sangat baik, mengurangi gesekan dan keausan pada kondisi batas (*boundary lubrication*) (Deshmukh, 2022).
5. Indeks viskositas tinggi: minyak nabati umumnya memiliki indeks viskositas (VI) yang tinggi, yang berarti viskositasnya cenderung stabil pada rentang perubahan suhu yang luas. Ini merupakan properti yang diinginkan untuk pelumas yang harus beroperasi pada suhu yang bervariasi.
6. Titik nyala tinggi: banyak minyak nabati memiliki titik nyala (*flash point*) yang lebih tinggi dibandingkan minyak mineral sejenis, yang meningkatkan keamanan dalam operasi pemesinan dengan mengurangi risiko kebakaran.

2.9.2 Keterbatasan dan Modifikasi Minyak Nabati

Meskipun memiliki banyak keunggulan, minyak nabati juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diatasi untuk aplikasi pelumasan industri yang lebih luas:

1. Stabilitas oksidatif yang rendah: kehadiran ikatan rangkap pada rantai asam lemak membuat minyak nabati rentan terhadap oksidasi termal dan oksidasi udara, terutama pada suhu tinggi. Oksidasi dapat menyebabkan pembentukan gum, polimerisasi, peningkatan viskositas, dan korosi (Tjong, 2021).
2. Stabilitas hidrolitik yang rendah: ikatan ester pada *trigliserida* dapat terhidrolisis (bereaksi dengan air) pada kondisi suhu dan kelembaban tinggi, menghasilkan asam lemak bebas yang bersifat korosif.

3. Titik tuang (*pour point*) tinggi: beberapa minyak nabati memiliki titik tuang yang relatif tinggi, yang berarti mereka cenderung membeku atau menjadi sangat kental pada suhu rendah, membatasi penggunaannya di lingkungan dingin.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian telah berfokus pada modifikasi kimia minyak nabati dan penambahan aditif. Modifikasi meliputi:

1. Epoksidasi, *hidrogenasi*, *transesterifikasi*: proses-proses ini dapat mengubah struktur ikatan rangkap atau gugus ester untuk meningkatkan stabilitas oksidatif dan hidrolitik serta menurunkan titik tuang.
2. Aditivasi: penambahan aditif antioksidan, extreme pressure (EP), anti-wear (AW), penurun titik tuang, dan agen dispersi dapat secara signifikan meningkatkan kinerja pelumasan minyak nabati (Deshmukh, 2022).

2.9.3 Tren Penelitian Pelumas Minyak Nabati

Tren penelitian terkini dalam pelumas minyak nabati meliputi:

1. Pengembangan pelumas *hybrid*: kombinasi minyak nabati dengan aditif nano (*nano fluida*) untuk memaksimalkan sifat pelumasan, pendinginan, dan stabilitas (Sharma, 2021).
2. Aplikasi dalam MQL: fokus pada penggunaan minyak nabati dan turunannya dalam sistem MQL untuk mencapai pemesinan yang lebih hijau dan efisien (Sani, 2022).
3. Penilaian daur hidup *life cycle assessment* (LCA): Mengevaluasi dampak lingkungan penuh dari produksi hingga pembuangan pelumas berbasis minyak nabati.

Dengan terus berkembangnya penelitian dan teknologi, pelumas minyak nabati, khususnya minyak nyamplung, memiliki potensi besar untuk menjadi solusi yang dominan dalam industri manufaktur yang berkelanjutan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini akan menggunakan pendekatan eksperimental dengan dukungan metode statistik untuk mengoptimalkan parameter kekasaran permukaan plat tulang kortikal dengan proses pemesinan fres. Desain eksperimen akan didasarkan pada *response surface methodology* (RSM), khususnya desain *box-behnken design* (BBD), untuk memodelkan hubungan antara parameter pemesinan dan kekasaran permukaan, serta untuk mengidentifikasi kondisi optimal.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

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

- 1 Proses pemotongan pemesinan frais dilakukan di Laboratorium Proses Produksi, Jurusan Teknik Mesin, SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo.



Gambar 3. 1 Tempat penelitian (Lab. Produksi, SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo)

2. Proses pengambilan data dari penelitian ini dilakukan di Laboratorium Metrologi Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 3. 2 Tempat penelitian Laboratorium Metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung)

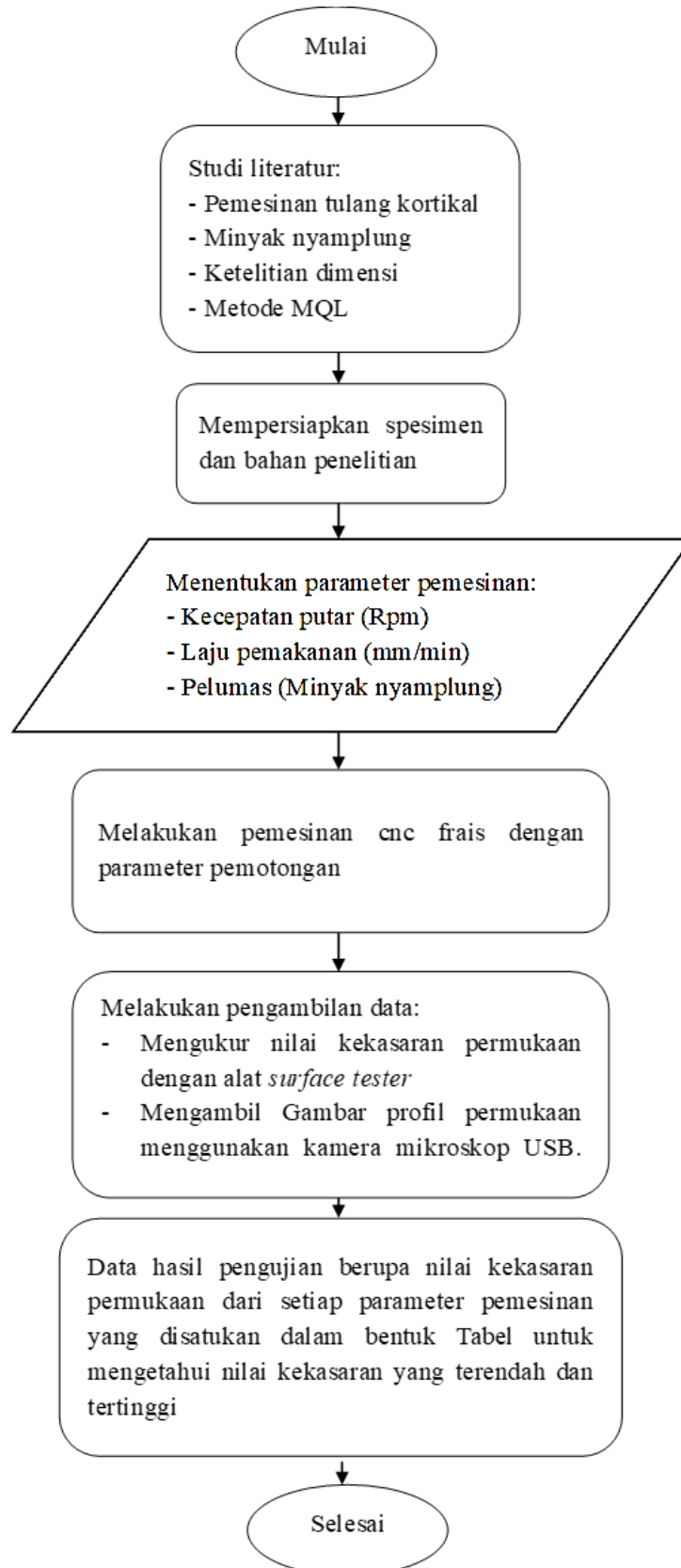
3.2.1 Waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan skema yang terjadwal seperti terlampir dibawah ini.

Tabel 3. 1 Rencana kegiatan penelitian

JADWAL RENCANA KEGIATAN PENELITIAN		
NO	KEGIATAN	WAKTU PELAKSANAAN
1	Penyelesaian proposal tugas akhir	Agustus
2	Seminar proposal tugas akhir	September
3	Pelaksanaan penelitian tugas akhir	November
4	Pengolahan data dan penulisan skripsi tugas akhir	Januari
5	Seminar hasil skripsi	Februari
6	Ujian skripsi	April

3.3 Diagram Alur



3.4 Variabel Penelitian

Variabel bebas yang akan divariasikan dalam penelitian ini adalah parameter pemesinan fres, yaitu:

1. Parameter Pemesinan Freis

Parameter ini akan divariasikan dalam tiga level.

Tabel 3. 2 Parameter pemotongan

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

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

3.4.1 Variabel Terikat (*Output/Respons*)

Variabel terikat yang akan diukur dan dianalisis adalah:

- 1 Kekasaran permukaan (*surface roughness*, Ra): Akan diukur setelah setiap jalur potong dari pemesinan. Pada nilai Ra yang di dapatkan dimasukkan kedalam tabel variabel Ra.

Tabel 3. 3 Parameter *box-behnken design* untuk menghasilkan respon

STD	Run	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Respon
		Kecepatan putar	Laju pemakanan	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	660	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 Material Penelitian

1. Spesimen uji

Bahan penelitian ini berupa tulang kortikal sapi jantan dewasa yang diperoleh dari Rumah Potong Hewan dan sebagian dari sapi hasil pemotongan hewan qurban, dengan kisaran umur $\pm 2-3$ tahun. Tulang kebanyakan diambil dari bagian kaki belakang karena memiliki ketebalan tulang kortikal yang cukup untuk proses pengeboran. Setelah dipisahkan dari daging dan sumsum, tulang dibersihkan menggunakan air mengalir hingga tidak berbau amis, kemudian dikeringkan sebelum dibuat menjadi spesimen pada gambar 3.2.



Gambar 3. 3 Spesimen uji

Tulang tersebut di potong dan di bentuk menjadi spesimen pada alat dengan ukuran panjang 70 mm dan lebar 20 mm. Dari total 8 tulang yang di miliki, di peroleh hasil sebanyak 15 bahan spesimen tulang kortikal. Setiap satu spesimen terdapat dua bagian area yang digunakan untuk penelitian. Sehingga lebih efisien dalam melakukan pengujian pememsinan terhadap tulang kortikal.

2. Pelumas nabati Nyamplung

Pelumas nabati, yang digunakan pada penelitian ini adalah minyak nyamplung dan VCO (Virgin Coconut Oil). Kedua jenis pelumas nabati ini dipilih karena memiliki kemampuan pelumasan yang cukup baik untuk membantu mengurangi gesekan yang cukup baik untuk membantu mengurangi gesekan

dan panas selama proses frais, sehingga diharapkan dapat meningkatkan kualitas kekasaran permukaan tulang kortikal



Gambar 3. 4 Pelumas minyak nyamplung



Gambar 3. 5 Pelumas VCO (Virgin Coconut Oil)

Pelumas nabati, yang digunakan pada penelitian ini adalah minyak nyamplung dan VCO (Virgin Coconut Oil). Kedua jenis pelumas nabati ini dipilih karena

memiliki kemampuan pelumasan yang cukup baik untuk membantu mengurangi gesekan yang cukup baik untuk membantu mengurangi gesekan dan panas selama proses frais, sehingga diharapkan dapat meningkatkan kualitas kekasaran permukaan tulang kortikal

Tabel 3. 4 Spesifikasi pelumas minyak nyamplung

Spesifikasi	
Warna	Bening
Isi bersih	2 liter
Tingkat kekentalan	119,5 mm ² /s
Viskositas	43,5 mm ² /s. pada suhu 29 °C
Titik Nyala	150°C
Kandungan Resin	10-30%
Prinsip	Disemprotkan
Koefisien gesek	0,072

Tabel 3. 5 Spesifikasi pelumas VCO

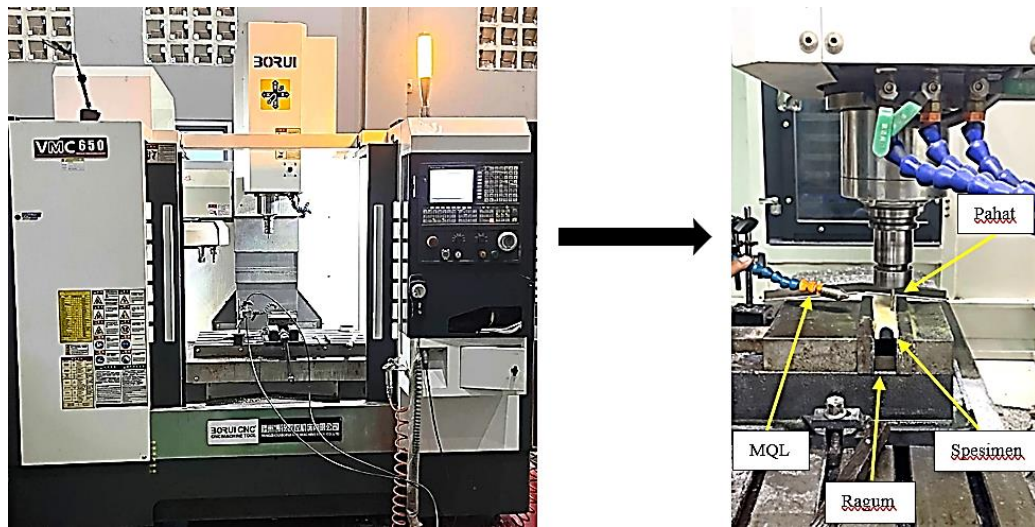
Spesifikasi	
Warna	Bening
Isi bersih	2 liter
Tingkat kekentalan	1,4088 mm ² /s hingga 1,5701 mm ² /s
Viskositas	26,59 mm ² /s pada suhu 40°C
Titik Nyala	177°C hingga 232°C
Kandungan asam laurat	47-54%
Kadar air	0,1-0,2%
Prinsip	Disemprotkan
Koefisien gesek	0,1

3.6 Alat kerja

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin CNC *milling*

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. Selain itu mesin ini juga berguna untuk menghaluskan atau meratakan benda kerja sesuai dengan dimensi yang dikehendaki.



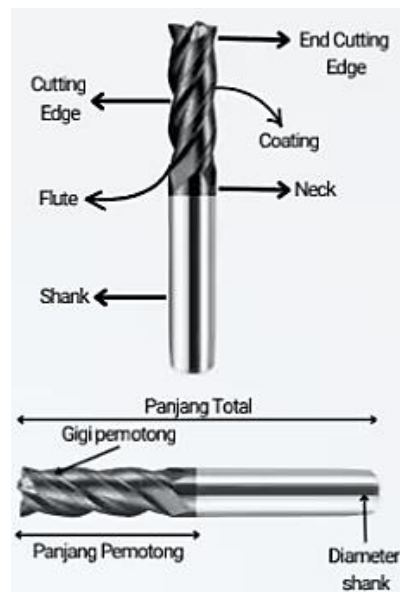
Gambar 3. 6 Mesin CNC *milling*

Tabel 3. 6 Spesifikasi CNC *milling*

Spesifikasi CNC <i>milling machine</i> GUT VMC 930E (controller SINUMERIK 808D)	
Dimensi keseluruhan L x W x H	310 cm / 240 cm / 265 cm
Beban maks. meja kerja	1000 kg
Kecepatan spindel maks.	10000 rpm (<i>belt type</i>)
Spindel	BT-40
Daya motor utama	11 kW
Kecepatan perjalanan X/Y/Z	+1.0 m / 0.6 m / 0.6 m
Kecepatan umpan	1-10000 mm/min
Kecepatan rapat	36 mm/min

2. Pahat *End mill* HSS

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 3. 7 Pahat *end mill* rahang empat

Tabel 3. 7 Spesifikasi pahat *endmill*.

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>)

3. Surface roughness tester

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.



Gambar 3. 8 *Surface roughness tester*

Tabel 3. 8 Spesifikasi *surface roughness tester*

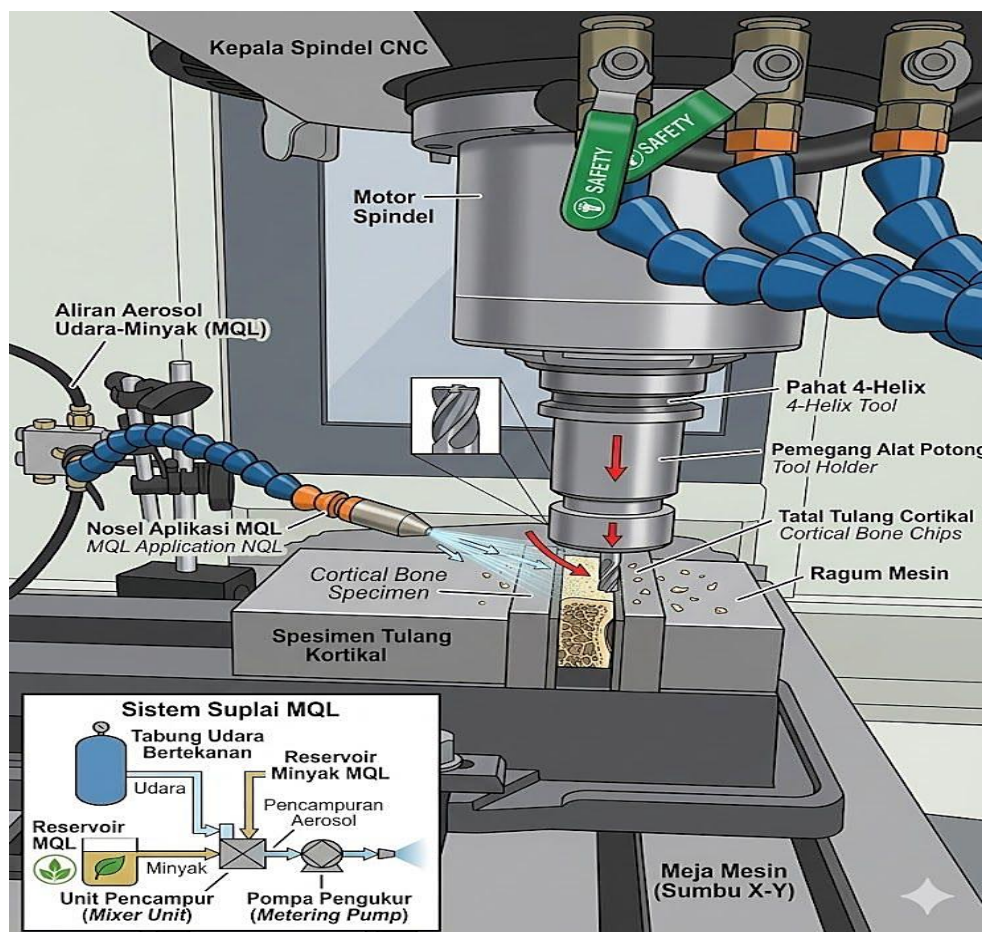
Spesifikasi	
Model	Mitutoyo SJ-210– <i>Portable Roughness Surface Tester</i>
Nomor Kalibrasi	KA660772
Tahun	1986
Ketelitian	0,01 μm
<i>Measuring speed</i>	.01, .02, .03 in/s / .25, .50, .75 mm/s
<i>Returning speed</i>	.039 in /s / 1 mm/s
<i>Detector Z-Range</i>	1000, 14400, 4000 μin / 100, 25, 360 μm
<i>Detector Z-Range Resolution</i>	.08, .20, .80 μin / .002, .006, .02 μm
<i>Skid radius of curvatuve</i>	40 mm
<i>Skid force</i>	<i>Less than 400 mN</i>
<i>Detector type</i>	<i>Differential Inductance</i>
<i>Display unit</i>	2,05×2,59×6,9” / 52,1×65,8×160 mm
<i>Drive unit</i>	4,5×9×1” / 115×23×26 mm
<i>Mass</i>	1,1 lbs. / 5 kg

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 .

3.7. Prosedur Pemesinan Frais

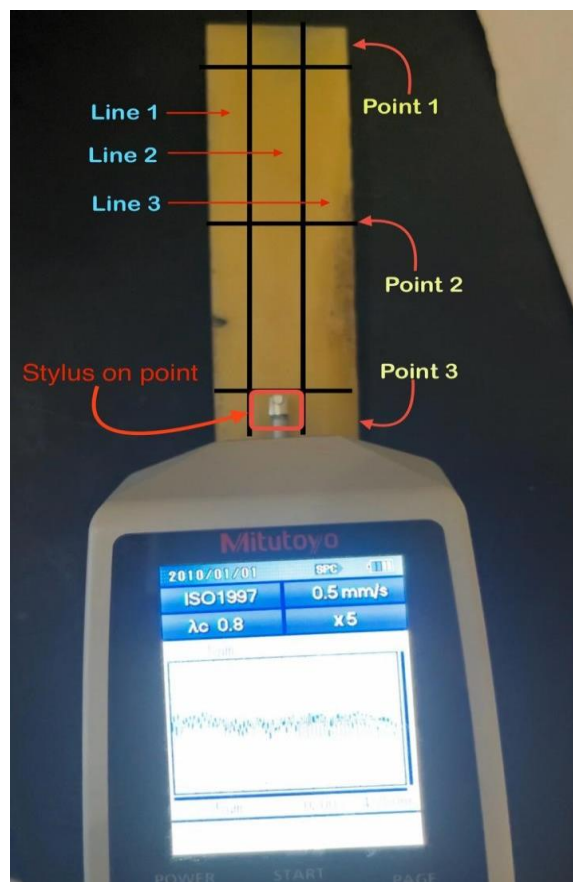
Setelah mesin di *set-up*, maka proses pengefraisan tulang kortikal dapat dilakukan menggunakan pelumas berbasis minyak nyamplung. Pelaksanaan penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kekasaran pada permukaan benda kerja menggunakan *surface roughness tester*. Pada proses permesinan ini menggunakan pahat *End mill* HSS 10mm untuk semua parameter pemesinan yang digunakan.



Gambar 3. 9 Ilustrasi mekanisme proses pemesinan CNC *Milling* menggunakan teknik MQL

3.8 Prosedur pengukuran kekasaran

Setelah proses pemesinan dilakukan maka dilakukan metode pengukuran menggunakan *surface roughness tester* untuk mencari nilai kekasaran, pada metode pengukuran ini alat *surface roughness tester* diletakkan pada permukaan benda uji (spesimen) dengan menyesuaikan *stylus* (berupa jarum) diatur sehingga berada dalam posisi *point* (titik) yang sudah di tentukan pada permukaan alat uji yang dimana terdapat 3 *point* (titik) area yang akan di ukur pada pembacaan skala kekasaran terhadap permukaan alat uji (spesimen).



Gambar 3. 10 Ilustrasi mekanisme metode pengukuran menggunakan alat *surface roughness tester*

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) pengambilan data kekasaran menggunakan *surface roughness tester* sebanyak 3 kali.

Tabel. Parameter penelitian dengan metode RSM *box-behnken* adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 9 Tabel metode RSM *box-behnken design*

STD	Run	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
		Kecepatan putar	Laju pemakanan	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	660	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

Jumlah eksperimen yang dibutuhkan RSM *box-behnken* untuk 3 faktor dengan 2 level adalah 15 kali pengujian (termasuk titik pusat).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Berdasarkan hasil eksperimen, faktor C parameter ini dipilih berdasarkan hasil *fit summary* dengan nilai *lack of fit* yang signifikan. Pada data tabel ANOVA faktor C (pelumas) menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap respon, hal ini dapat dilihat hasil nilai *P-value* $< 0,05$ yaitu sebesar 0,0032.
2. Penelitian menunjukkan bahwa model *Linier* adalah model matematis yang paling *valid* (direkomendasikan) untuk memprediksi kekasaran permukaan karena memiliki nilai *sequential p-value* 0,0198 ($< 0,05$) dengan hasil distribusi residual yang normal. Model matematik yang diperoleh untuk kekasaran permukaan tulang pada proses frais tulang kortikal adalah model regresi linier $Ra = 0,621 - 0,000099(A) - 0,0009(B) - 0,172(C)$.

5.2 Saran

1. Pada proses pemesinan frais tulang kortikal dengan pelumas minyak nyamplung dilakukan pengujian parameter yang berbeda

DAFTAR PUSTAKA

- Rusmana, N. I. (2020). Simulasi Pengaruh Rangsangan Mekanik Terhadap Kerapatan Tulang Akibat Perubahan Usia Berbasis *Finite Element Method* (FEM) (*Doctoral dissertation*, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Sharif, N., Gilani, S. Z., Suter, D., Reid, S., Szulc, P., Kimelman, D., ... & Lewis, J. R. (2023). *Machine Learning For Abdominal Aortic Calcification Assessment From Bone Density Machine-Derived Lateral Spine Images. EBioMedicine*, 94.
- Rathod, D. K., Chakravarthy, C., Suryadevara, S. S., Patil, R. S., & Wagdargi, S. S. (2023). *Stress Distribution Of The Zygomatic Implants In Post-Mucormycosis Case: A Finite Element Analysis. Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 22(3), 695-701.
- Liu, Y. L., Tang, X. T., Shu, H. S., Zou, W., & Zhou, B. O. (2024). *Fibrous Periosteum Repairs Bone Fracture And Maintains The Healed Bone Throughout Mouse Adulthood. Developmental cell*, 59(9), 1192-1209.
- Khan, S., Siddique, R., Huanfei, D., Shereen, M. A., Nabi, G., Bai, Q., ... & Bowen, H. (2021). *Perspective Applications And Associated Challenges Of Using Nanocellulose In Treating Bone-Related Diseases. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 616555.
- Farehan, A. (2024). Optimasi Variasi Media Pendingin Dari Minyak Nabati Terhadap Kekasaran Permukaan Baja AISI 1045 Pada Proses Bubut CNC Menggunakan Metode Taguchi (*Doctoral dissertation*, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung).

- Pulungan, M. A., Sebayang, A. R., & Pinem, M. I. (2025). Karakterisasi Dan Investigasi Tribologi Biopelumas Campuran Minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*) Dan Minyak Mimba (*Azadirachta Indica*). *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 6(2), 11-20.
- Pratama, A., Saputra, H., Fahmi, S., Akbar, M. F., & Irwati, D. (2025). Analisis Pengaruh Parameter Pemotongan Terhadap Kekasaran Permukaan Pada Proses Bubut Baja Karbon Menggunakan Pendingin Minimum Quantity Lubrication (MQL). *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 5(4), 9921-9929.
- Saputra, Anggi, Zaldy Kurniawan, and Yudi Oktriadi. "Variasi Parameter Proses Terhadap Pengujian Material Removal Rate Dengan Mesin CNC Bubut Pada Proses Finishing Baja SKD-11 Menggunakan RSM." *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana* 11.01 (2024): 31-36.
- Dwivedi, P., Maheshwari, S., & Siddiquee, A. N. (2025). *Fabrication Techniques and Characterisation for Zinc-Based Biodegradable Implants. In Biodegradable Metallic Materials: Design, Development and Characterization* (pp. 187-200). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Das, S. C., Paul, D., Grammatikos, S. A., Siddiquee, M. A., Papatzani, S., Koralli, P., & Petousis, M. (2021). *Effect Of Stacking Sequence On The Performance Of Hybrid Natural/Synthetic Fiber Reinforced Polymer Composite Laminates. Composite Structures*, 276, 114525.
- Kumar, N., Saraber, P., Ding, Z., & Kusumbe, A. P. (2021). *Diversity Of Vascular Niches In Bones And Joints During Homeostasis, Ageing, And Diseases. Frontiers In Immunology*, 12, 798211.
- Sethi, C., Singh, S., Chauhan, P. S., & Raj, B. (2024). *Bone Fracture Detection Using Machine Learning. In Distributed Intelligent Circuits and Systems* (pp. 77-109).
- Lea, M. A., Elmalky, M., Sabou, S., Siddique, I., Verma, R., & Mohammad, S. (2021). *Revision Pedicle Screws With Impaction Bone Grafting: A Case Series. Journal Of Spine Surgery*, 7(3), 344. K

- Singh, N., Kumar Singh, N., Pandit, D., & Saxena, K. K. (2022). Recent Trends In *Bio-Materials And Advances In Design Of Spinal Fusion Implants. Advances In Materials And Processing Technologies*, 8(sup4), 2122-2141.
- Murab, S., Hawk, T., Snyder, A., Herold, S., Totapally, M., & Whitlock, P. W. (2021). *Tissue Engineering Strategies For Treating Avascular Necrosis Of The Femoral Head. Bioengineering*, 8(12), 200.
- Putra, L. W., Juswandi, J., Hidayat, A., Fachrul, M., & Kido, M. I. (2022). Pengembangan Mesin *Tool Grinding Endmill*. *Jurnal Tematis (Teknologi, Manufaktur dan Industri)*, 3(2), 14-28.
- Caesarendra, W. (2024). *Bone Drilling: A Review with a Lab Case Study of Bone Layer Classification Using Vibration Signal and Long Short-Term Memory*.
- Cardoso, C. E., Almeida, J. C., Rocha, J., & Pereira, E. (2025). *Application Of Box-Behnken Design To Optimize The Phosphorus Removal From Industrial Wastewaters Using Magnetic Nanoparticles. Environmental Science And Pollution Research*, 1-13.
- Ghasemi, S. M., Ghaderpoori, M., Moradi, M., Taghavi, M., & Karimyan, K. (2020). *Application Of Box-Behnken Design For Optimization Of Malachite Green Removal From Aqueous Solutions By Modified Barley Straw*.
- Nurul, N. B. (2025). *Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-Y Dan Uji Aplikasinya Sebagai Katalis Pada Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi Bio Crude Oil (BCO)*.
- Budiana, B., Nakul, F., Wivanius, N., Sugandi, B., & Yolanda, R. (2020). Analisis Kekasaran Permukaan Besi ASTM36 dengan menggunakan Surfptest dan Image""J. *Journal of Applied Electrical Engineering*, 4(2), 49-54.
- Aminy, A. Y., & Aji, A. A. (2021). Optimasi Kualitas Pembubutan Aluminium 6061 Akibat Perubahan Sudut Potong Pahat HSS. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, 25(2), 124-131.

- Fahri, Fahrizal. Optimasi Kekasaran Permukaan Baja SKD11 pada Proses CNC Milling dengan Menggunakan Metode Taguchi. Diss. Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, 2021.
- Habiby, M., N., A., Puspitasari, P., Aminnudin, Pramono, D., D., Fikri, A., A., Ghazali, M., J. (2025) "Influence of Different Nanoparticles on Thermophysical Properties and Wear Resistance of Corn Oil-Based Cutting Fluid in MQL-CNC Milling Machining" *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology* Vol. 9, No. 1, July 2025, pp. 75-89.
- Hamni, A., Pratama, A., & Ibrahim, G. A. (2022). Implementasi *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) Pada Pembuatan Ulir Luar Material *Magnesium*. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, 14(01), 1-8.
- 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), 1085.
- Hu, Shuguo, et al. "Nanoparticle-Enhanced Coolants In Machining: Mechanism, Application, And Prospects." *Frontiers Of Mechanical Engineering* 18.4 (2023): 53.
- Kusuma, M. A., & Putri, N. A. (2020). Asam Lemak Virgin Coconut Oil (VCO) Dan Manfaatnya Untuk Kesehatan. *Jurnal Agrinika: Jurnal Agroteknologi dan Agribisnis*, 4(1), 93-107.
- 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.
- Mahyudin, F. (2020). *Orthopaedic Tissue Engineering: Inovasi Tata Laksana Penyakit Muskuloskeletal*. Airlangga University Press.
- Manikanta, J. E., Abdullah, M., Ambhore, N., & Kottedda, T. K. (2025). *Analysis of Machining Performance In Turning With Trihybrid Nanofluids And Minimum Quantity Lubrication*. *Scientific Reports*, 15(1), 12194.

- Mufarrih, A. M., Moh Nasir Hariyanto, and Nanang Qosim. "Analisa Kekasaran Permukaan Titanium Grade 2 pada Proses Frais." *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha* 8.2 (2020): 53-61.
- Naveed, M., et al. "State-Of-The-Art And Future Perspectives Of Environmentally Friendly Machining Using Biodegradable Cutting Fluids." *Energies* 14.16 (2021): 4816.
- Nugraha, Dicky Aprilian, Rika Dwi Hidayatul Qoryah, and Mahros Darsin. "Pengaruh Metode Minimum Quantity Lubrication (MQL) Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan." *Rekayasa* 13.2 (2020): 125-129.
- Pawlus, Pawel, Rafal Reizer, and Wiesław Żelasko. "Influence Of The Traverse Speed Of The Stylus Tip On Changes In The Areal Texture Parameters Of Machined Surfaces." *Materials* 17.20 (2024): 5052.
- Rizza, Muhammad Akhlis, and Indra Pratama. "Pengaruh Parameter Pemotongan Pada Proses Frais Terhadap Kekasaran Permukaan Material Aluminium 6061." *Jurnal Teknik Ilmu dan Aplikasi* 2.2 (2021): 49-56.
- Rusmana, N. I. (2020). Simulasi pengaruh rangsangan mekanik terhadap kerapatan tulang akibat perubahan usia berbasis *Finite Element Method* (FEM) (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Sharif, N., Sharif, N., Alzahrani, K. J., Halawani, I. F., Alzahrani, F. M., Díez, I. D. L. T., ... & Dey, S. K. (2023). *Molecular Epidemiology, Transmission And Clinical Features Of 2022-mpox outbreak: A systematic review. Health science reports*, 6(10), e1603.
- Zhang, X., Li., Zhou, Z., Liu, B., Zhang, Y., Yang, M., ... & Ali, H. M. (2023). *Vegetable Oil-Based Nanolubricants In Machining: From Physicochemical Properties To Application. Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1), 76.