

**IMPLEMENTASI MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM
INOPHYLLUM*) PADA PEMESINAN BOR TULANG
KORTIKAL UNTUK MENINGKATKAN KETELITIAN
DIMENSI MENGGUNAKAN METODE *MINIMUM QUANTITY
LUBRICATION***

SKRIPSI

Oleh

**GANANG ARIF WICAKSONO
NPM 2115021069**



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

**IMPLEMENTASI MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM
INOPHYLLUM*) PADA PEMESINAN BOR TULANG
KORTIKAL UNTUK MENINGKATKAN KETELITIAN
DIMENSI MENGGUNAKAN METODE *MINIMUM QUANTITY
LUBRICATION***

Oleh:

**Ganang Arif Wicaksono
NPM 2115021069**

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

IMPLEMENTASI MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM INOPHYLLUM*) PADA PEMESINAN BOR TULANG KORTIKAL UNTUK MENINGKATKAN KETELITIAN DIMENSI MENGGUNAKAN METODE *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION*

OLEH

GANANG ARIF WICAKSONO

Proses pengeboran tulang kortikal penting dalam aplikasi ortopedi karena memengaruhi ketelitian dimensi lubang dan kualitas pemasangan implan. Penyimpangan diameter terjadi akibat gesekan dan peningkatan temperatur selama proses pengeboran. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kecepatan putar, laju pemakanan, dan jenis pelumas serta menentukan parameter optimum menggunakan metode *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) berbasis minyak nabati. Eksperimen dilakukan pada tulang kortikal sapi dengan mesin CNC *milling* pada variasi kecepatan 1000–2000 rpm, laju pemakanan 35–85 mm/min, dan tiga kondisi pelumasan (kering, minyak nyamplung, dan VCO). Analisis menggunakan *Response Surface Method* (RSM) desain *Box–Behnken* untuk mengevaluasi kesalahan diameter lubang pada permukaan atas dan bawah. Hasil *Analisis of Variance* (ANOVA) menunjukkan kecepatan putar berpengaruh signifikan terhadap kesalahan diameter. Parameter optimum pada 2000 rpm, 85 mm/min, dan minyak nyamplung menghasilkan kesalahan diameter terkecil 0,00336 mm (atas) dan 0,00303 mm (bawah). Penggunaan MQL minyak nyamplung meningkatkan kualitas lubang dengan dinding lebih halus dan burr minimal sehingga berpotensi sebagai pelumas nabati efektif dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Pengeboran tulang kortikal, parameter pengeboran, *response surface method*, *analysis of variance*, ketelitian dimensi.

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF NYAMPLUNG OIL (CALOPHYLLUM INOPHYLLUM) IN CORTICAL BONE DRILLING MACHINING TO IMPROVE DIMENSIONAL ACCURACY USING THE MINIMUM QUANTITY LUBRICATION METHOD

By

GANANG ARIF WICAKSONO

The cortical bone drilling process is crucial in orthopedic applications because it affects the accuracy of hole dimensions, for example in implant installation. Diameter deviation occurs due to friction and increased temperature during the drilling process. This study aims to analyze the effect of rotational speed, feed rate, lubricant type and determine the optimal parameters using the vegetable oil-based Minimum Quantity Lubrication (MQL) method. Experiments were conducted on bovine cortical bone with a CNC milling machine at a rotational speed of 1000–2000 rpm, a feed rate of 35–85 mm/min, and three lubrication conditions (dry, nyamplung, and VCO). Analysis using the Response Surface Method (RSM) Box–Behnken Design was used to evaluate the hole diameter error on the top and bottom surfaces. ANOVA results showed that rotational speed had a significant effect on the diameter error. The optimal parameters at 2000 rpm, 85 mm/min, and nyamplung lubricant produced the smallest diameter error of 0.00336 mm (top) and 0.00303 mm (bottom). The use of nyamplung oil with MQL improves the quality of the hole with smoother walls and minimal burrs, thus having the potential to be an effective and environmentally friendly vegetable lubricant.

Keyword: *Cortical bone drilling, drilling parameters, response surface method, optimization process, dimensional accuracy.*

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : **IMPLEMENTASI MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM INOPHYLLUM*) PADA PEMESINAN BOR TULANG KORTIKAL UNTUK MENINGKATKAN KETELITIAN DIMENSI MENGGUNAKAN METODE *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION***

Nama Mahasiswa : **Ganang Arif Wicaksono**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115021069**

Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

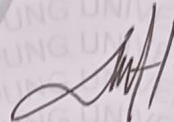
Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2



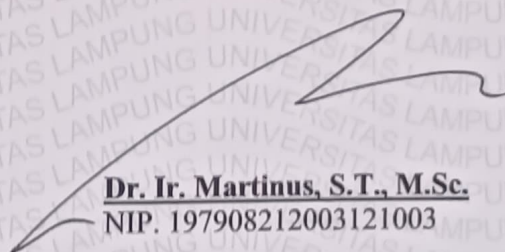
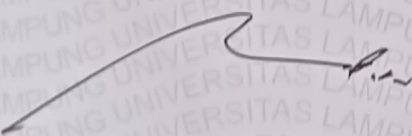
Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.d.
NIP. 197108171998021003

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

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin



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

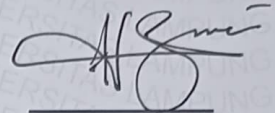
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

sin

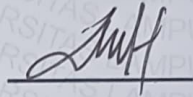
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

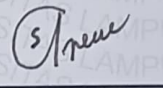
Ketua Penguji : Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D



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



Penguji Utama : Ir. Arinal Hamni, M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Maret 2026

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Ganang Arif Wicaksono
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021069
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Implementasi Minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*) Pada Pemesinan Bor Tulang Kortikal Untuk Meningkatkan Ketelitian Dimensi Menggunakan Metode “*Minimum Quantity Lubrication*“ 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, 09 April 2026



Ganang Arif Wicaksono

2115021069

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Ganang Arif Wicaksono dilahirkan di Way Halim, Bandar Lampung pada tanggal 19 Februari 2001. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara dan anak dari Bapak Purwanto dan Ibu Neni Marini. Penulis mengawali pendidikan formal di TK Taruna Jaya (2006-2007), kemudian dilanjutkan menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 2 Beringin Raya (2007-2013), SMP Negeri 14 Bandar Lampung (2013-2016), dan SMK Negeri 2 Bandar Lampung (2016-2019) dengan jurusan Teknik Pemesinan. Setelah menjalani pendidikan SMK, penulis langsung mendapat pekerjaan di PT. Great Giant Pineapple (2019-2021) sebagai operator produksi. Setelah melewati masa *gap year*, pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Divisi Kreativitas pada periode 2022/2023, dan pada periode 2023/2024 penulis menjabat sebagai Ketua Divisi Kreativitas. Penulis menjalankan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Banjar Mulya, Kec. Baradatu, Kab. Way Kanan pada bulan Januari-Februari 2024. Pada pertengahan Agustus sampai akhir Desember tahun 2024 penulis berkesempatan untuk melaksanakan Magang Industri dalam program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di PT. Tunas Dwipa Matra, Bandar Lampung dengan mengambil topik **“Pengembangan Sistem Penggerak *Bike Lift* Pada Area H2 TDM Pramuka di *Technical Service Departement* PT. Tunas Dwipa Matra”**. Pada bulan Agustus tahun 2025 penulis melakukan penelitian dibidang Manufaktur dan Proses Produksi, dan selesai pada bulan Maret tahun 2026 dengan judul **“Implementasi**

Minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*) Pada Pemesinan Bor Tulang Kortikal Untuk Meningkatkan Ketelitian Dimensi Menggunakan Metode *Minimum Quantity Lubrication*” dibawah bimbingan Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., dan Bapak Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T., serta Ibu Ir. Arinal Hamni, M.T., sebagai pembahas.

MOTTO

“Dan bahwa manusia hanya memperoleh apa yang telah diusahakannya”

(- **QS. An-Najm: 39** -)

“Tuhan tahu kita sedang tersesat, tetapi matahari masih bersinar, semua akan baik-
baik saja”

(- **Phum Viphurit** -)

“Sekarang aku hanya seorang pria yang bebas”

(- **Kuzan** -)

“Bisa gak bisa pasti bisa”

(- **Penulis** -)

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. Solawat serta salam selalu 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 doa, dukungan, serta pengorbanan tanpa hentinya yang tidak ada akan pernah bisa penulis balas sepenuhnya. Segala pencapaian ini adalah buah dari doa dan usaha kalian.

Keluarga Saya terutama Galang, Gendis, dan Genta, serta Kekasih Nindia Dwi Hapsari yang selalu memberikan semangat, dukungan motivasi serta doa yang menyertai saya selama proses penyelesaian skripsi ini.

Almameter Tercinta Universitas Lampung

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan nikmat-Nya kepada Penulis, sehingga Penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“IMPLEMENTASI MINYAK NYAMPLUNG (*CALOPHYLLUM INOPHYLLUM*) PADA PEMESINAN BOR TULANG KORTIKAL UNTUK MENINGKATKAN KETELITIAN DIMENSI MENGGUNAKAN METODE *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION*”**. 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 terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Terima kasih tak terhingga kepada orang tua tercinta Penulis yakni Ibu Neni Marini yang dengan segala pengorbanan, kerja keras, dan kasih sayang tulusnya selalu mendukung saya dalam setiap langkah, dan Bapak Purwanto dengan doa, nasihat, perjuangan, serta keteladanan beliau menjadi sumber kekuatan dan motivasi terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan dan Skripsi ini. Skripsi ini penulis persembahkan sebagai bentuk bakti dan penghormatan kepada kedua orang tua saya.
2. Galang Dimas Prasodjo, Gendis Sekar Taji, dan Genta Aji Saka, seseorang yang darahnya ikut mengalir dalam tubuh saya, terima kasih yang tak terhingga untuk

adik saya yang telah mendukung Penulis selama masa perkuliahan hingga meraih gelar Sarjana Teknik.

3. Kepada seseorang yang tidak kalah penting kehadirannya, Nindia Dwi Hapsari yang penulis cintai dan selalu penulis perjuangkan. Terimakasih telah menjadi bagian dalam proses perjalanan penulis menyusun skripsi. Berkontribusi baik menemani, mendukung dan meyakinkan penulis untuk pantang menyerah hingga penyusunan skripsi ini terselesaikan.
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung
6. Bapak Ahmad Suudi, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
8. Bapak Ir. Herry Wardono, M.Sc., IPM., ASEAN Eng., selaku dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan arahan selama dibangku perkuliahan.
9. Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Bapak Arzaq Guruh Dityamri, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan memberikan saran dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
11. Ibu Ir. Arinal Hamni, M.T., selaku dosen pembahas yang telah memberikan kritik dan masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
12. Seluruh dosen, staff, dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
13. Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Novry, Hilmul, dan Rosikul atas segala bantuan dan dedikasi yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.

14. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 yang telah kebersamai, memberi motivasi, dan semangat selama perkuliahan.
15. Teruntuk teman-teman Humklis, terima kasih atas kebersamaan, dukungan, dan cerita yang telah menjadi bagian dari perjalanan selama proses penyusunan skripsi ini.
16. Seluruh pihak yang tak dapat saya sebutkan satu persatu yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu menyelesaikan Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa laporan Skripsi atau 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, 09 April 2026
Penulis

Ganang Arif Wicaksono
NPM. 2115021069

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Pemesinan Bor	7
2.1.1 Pengeboran (<i>drilling</i>).....	7
2.1.2 Pengeboran tulang (<i>bone drilling</i>).....	8
2.2 Parameter Pemesinan Bor	10
2.2.1 Kecepatan putar	10
2.2.2 Laju pemakanan.....	11
2.2.3 Cairan pelumas	12
2.3 Mata Bor	12
2.4 Ketelitian Dimensi.....	14
2.4.1 Geometri dan kondisi mata bor	16
2.4.2 Parameter pemesinan	17
2.4.3 Kondisi material benda kerja	17
2.4.4 Stabilitas dan kekakuan mesin	17
2.4.5 Proses pemotongan dan pelumasan	18
2.5 Metode <i>Response Surface Methode</i> (RSM).....	19

2.5.1 Penggunaan <i>Response Surface Methode</i> (RSM)	19
2.5.2 <i>Box-Behnken Design</i> (BBD)	21
2.5.3 <i>Analisis Of Varian</i> (ANOVA)	21
2.6 <i>Minimum Quantity Lubrication</i> (MQL).....	23
2.7 Pelumas Nabati.....	24
2.7.1 Minyak nyamplung	25
2.7.2 VCO (<i>Virgin Coconut Oil</i>).....	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	27
3.1.1 Tempat penelitian	27
3.1.2 Waktu penelitian.....	28
3.2 Diagram Alur	29
3.3 Alat dan Bahan	30
3.3.1 Alat.....	30
3.3.2 Bahan.....	35
3.4 Prosedur Penelitian	36
3.4.1 Menetapkan angka untuk variabel dan respon.....	36
3.4.2 Menyiapkan tabel penelitian RSM <i>box-behnken</i>	37
3.4.3 Proses mekanisme pengeboran tulang kortikal.....	37
3.4.4 Prosedur pengukuran diameter lubang bor	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Data Hasil Pengukuran Diameter Pada Pengeboran Tulang Kortikal	41
4.2 Normal Plot Residual.....	44
4.3 Model Matematik Pada Diameter Atas Dan Diameter Bawah	46
4.4 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA) Untuk Kesalahan Permukaan Atas.....	47
4.5 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA) Untuk Kesalahan Permukaan Bawah	50
4.6 Plot Interaksi	53
4.6.1 Plot kontur diameter atas tanpa pelumas (kering).....	53
4.6.2 Plot kontur diameter atas dengan pelumas minyak nyamplung	55
4.6.3 Plot kontur diameter atas dengan pelumas VCO	57
4.6.4 Plot kontur diameter bawah tanpa pelumas (kering).....	58
4.6.5 Plot kontur diameter bawah dengan pelumas minyak nyamplung	60

4.6.6 Plot kontur diameter bawah dengan pelumas VCO	62
4.7 Optimasi Parameter Pengeboran	63
4.8 Kualitas Lubang Yang Dihasilkan Pasca Pengeboran.....	66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme pemotongan pada proses pengeboran	7
Gambar 2.2 Skema pengeboran ke dalam tulang kortikal dan trabekular	9
Gambar 2.3 Geometri mata bor	13
Gambar 2.4 Parameter geometris mata bor dari model matematis	14
Gambar 2.5 Pengukuran lubang hasil pengeboran dengan <i>profile projector</i> ...	15
Gambar 2.6 Keausan mata bor	16
Gambar 2.7 Mekanisme proses pengeboran lubang dengan sistem pendukung stabilitas dan peredam getaran.....	18
Gambar 2.8 Prinsip kerja sistem MQL	19
Gambar 2.9 Plot metode permukaan respon	20
Gambar 2. 10 Penggambaran titik pada BBD	21
Gambar 2.11 Skema proses pemotongan dengan MQL	23
Gambar 2.12 Dari biji hingga penghilangan getah minyak nyamplung	25
Gambar 3.1 Tempat penelitian Laboratorium Produksi SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo.....	27
Gambar 3.2 Tempat penelitian Laboratorium Metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung	28

Gambar 3.3 Diagram alur penelitian.....	29
Gambar 3.4 CNC <i>milling</i>	30
Gambar 3.5 <i>Profile projector</i>	31
Gambar 3.6 Mata bor <i>orthopedic</i>	32
Gambar 3.7 Pelumas minyak nyamplung	34
Gambar 3.8 Pelumas VCO	34
Gambar 3.9 Alur proses pemotongan spesimen uji	36
Gambar 3.10 Mekanisme pengeboran tulang dengan CNC <i>milling</i>	38
Gambar 3.11 Proses penarikan garis mikroskop <i>profile projector</i> & perataan bidang spesimen dengan plastisin.....	39
Gambar 4.1 Tampilan <i>profile projector</i> pengukuran kesalahan diameter lubang bor hasil pengeboran	43
Gambar 4.2 plot residual berdistribusi normal (diameter atas)	44
Gambar 4.3 plot residual berdistribusi normal (diameter bawah)	45
Gambar 4.4 Grafik 3D respon diameter atas tanpa pelumas (kering)	53
Gambar 4.5 Grafik 2D respon diameter atas tanpa pelumas (kering)	54
Gambar 4.6 Grafik 3D respon diameter atas dengan minyak nyamplung	55
Gambar 4.7 Grafik 2D respon diameter atas dengan minyak nyamplung	56
Gambar 4.8 Grafik 3D respon diameter atas dengan VCO	57
Gambar 4.9 Grafik 2D respon diameter atas dengan VCO	58
Gambar 4.10 Grafik 3D respon diameter bawah tanpa pelumas (kering)	59

Gambar 4.11 Grafik 2D respon diameter bawah tanpa pelumas (kering)	60
Gambar 4.12 Grafik 3D respon diameter bawah dengan minyak nyamplung .	60
Gambar 4.13 Grafik 2D respon diameter bawah minyak nyamplung	61
Gambar 4.14 Grafik 3D respon diameter bawah dengan VCO	62
Gambar 4.15 Grafik 2D respon diameter bawah dengan VCO	62
Gambar 4.16 (a) 2000 rpm, 35 mm/min, pelumas nyamplung, (b) 1000 rpm, 35 mm/min, pelumas nyamplung	67
Gambar 4.17 (a) 2000 rpm, 60 mm/min, pelumas VCO, (b) 2000 rpm, 60 mm/min, kering, (c) 2000 rpm, 85 mm/min, pelumas nyamplung	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rencana kegiatan penelitian	28
Tabel 3.2 Spesifikasi CNC <i>milling</i>	30
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>profile projector</i>	32
Tabel 3.4 Spesifikasi pahat bor	33
Tabel 3.5 Spesifikasi pelumas minyak nyamplung	34
Tabel 3.6 Spesifikasi pelumas VCO	35
Tabel 3.7 Parameter penelitian	36
Tabel 3.8 Parameter penelitian <i>box-behnken</i>	37
Tabel 3.9 Tabel data kesalahan diameter permukaan atas dan bawah.....	40
Tabel 4 1 Hasil pengukuran diameter atas dan bawah.....	41
Tabel 4.2 <i>Fit summary</i> untuk diameter permukaan atas	47
Tabel 4.3 ANOVA untuk diameter permukaan atas.....	48
Tabel 4.4 <i>Fit summary</i> untuk diameter permukaan bawah	50
Tabel 4.5 ANOVA untuk diameter permukaan bawah.....	51
Tabel 4.6 Kriteria untuk optimasi numerik	64
Tabel 4.7 Solusi optimasi pengeboran	65

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pemesinan tulang kortikal, khususnya pengeboran, sangat krusial untuk pembuatan implan, pemasangan baut ortopedi, maupun tindakan bedah lainnya. Salah satu tantangan dalam pemesinan tulang adalah menjaga ketelitian dimensi hasil pemotongan yang dapat merusak jaringan. Oleh karena itu, diperlukan sistem pelumasan efektif dan ramah lingkungan untuk mengontrol panas serta meningkatkan kualitas pemesinan. Dalam hal ini, penerapan metode *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) menjadi alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi proses pemesinan, menjaga presisi dimensi, dan mengurangi risiko kerusakan jaringan tulang secara keseluruhan (You et al., 2024).

Alternatif penggunaan pelumas nabati menjadi suatu pilihan tersendiri dalam proses pemesinan dikarenakan kualitas dan harga yang berbeda. Hal tersebut mendorong peneliti untuk melakukan suatu inovasi baru dengan eksperimen minyak nabati baru jenis *soluble oil* dari biji nyamplung. Biji nyamplung yang menjadi bahan dasar minyak nyamplung mampu menghasilkan rendemen minyak yang tinggi dengan kadar nilai mencapai 74% (Pratama et al., 2021). Penelitian implementasi minyak nyamplung menjadi pelumas nabati untuk proses pembubutan dari penelitian Ilyas et al., (2024). Hal ini menjadi perhatian bahwa minyak biji nyamplung banyak memiliki manfaat untuk menjadi suatu alternatif pelumas atau pendingin lainnya.

Minyak nyamplung telah banyak diteliti dalam penggunaan pelumas pemesinan dalam industri modern. Misalnya, sebuah studi (Milano et al., 2022) menunjukkan, campuran minyak nyamplung ini mampu memiliki koefisien gesek rendah, yaitu sekitar 0,072, bahkan lebih rendah dari beberapa pelumas yang sering digunakan seperti minyak kelapa murni (VCO) 0,1 dan pelumas sintetik yang berkisar 0,05-1,5. Dengan kemampuan mengurangi gesekan dan panas secara efektif serta memiliki koefisien gesek rendah, minyak nyamplung sangat cocok untuk diimplementasikan untuk pemesinan bor tulang kortikal dengan menggunakan metode. Hal ini mendukung peningkatan ketelitian dimensi lubang dan meminimalkan risiko kerusakan jaringan, seperti yang ditunjukkan pada penelitian di atas.

Metode pendinginan MQL makin berkembang dalam aplikasi manufaktur karena kemampuannya memberikan pelumasan dan pendinginan lokal tanpa membanjiri secara signifikan, sehingga efisien dan ramah lingkungan. MQL bekerja dengan menyemprotkan campuran udara bertekanan dan pelumas dalam jumlah minimal, langsung ke zona pemotongan, yang berfungsi mengurangi gesekan antara pahat dan benda kerja serta menurunkan suhu pemotongan secara signifikan. Pengeboran material pada penggunaan pelumas nabati pada kondisi MQL mampu meningkatkan keausan pahat dan akurasi diameter lubang, meskipun hasil terkadang tidak konsisten tergantung parameter pemotongan (Rosli & Zamiruddin, 2020).

Inovasi MQL berbasis minyak nabati seperti VCO (*Virgin Coconut Oil*) atau minyak kelapa yang didispersikan ke dalam minyak nabati meningkatkan efisiensi pemesinan dengan menurunkan torsi pengeboran dan keausan pahat secara signifikan. Studi pada pengeboran baja keras menunjukkan adanya pengurangan gaya aksial serta penurunan suhu alat. Selain itu, metode MQL pelumas nabati terbukti meningkatkan jumlah lubang yang bisa dibuat sebelum pahat aus, dan menurunkan konsumsi energi spesifik serta kekasaran permukaan pada proses *milling*. Temuan ini sangat relevan untuk aplikasi presisi tinggi seperti pengeboran tulang karena

membantu menjaga suhu rendah dan meminimalkan kerusakan termal pada jaringan biologis (Duc et al., 2020).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa pelumas nabati dengan metode MQL mampu mengurangi gaya pemotongan hingga 30% dan meningkatkan kualitas permukaan dibandingkan pelumas konvensional. Dengan demikian, penggunaan metode pendinginan MQL dengan pelumas nabati dapat menjadi teknologi vital untuk proses pengeboran material sensitif seperti tulang kortikal (Ibrahim et al., 2025). Salah satu indikator penting kualitas pengeboran pada substrat keras seperti tulang adalah penyimpangan diameter lubang. Diameter yang menyimpang dapat memengaruhi stabilitas baut tulang dan menurunkan kualitas komponen implan. Penggunaan pelumas nabati dalam metode MQL terbukti mampu memperbaiki akurasi pengeboran karena pelumas nabati dapat mengisi celah mikroskopik antar permukaan dan memberikan efek pelumasan lokal yang merata (Raflan & Feriyanto, 2024).

Kajian terkait pemesinan tulang terhadap ketelitian diameter lubang juga telah dilakukan oleh Dityamri et al., (2024), digunakan sebagai salah satu rujukan utama dalam penelitian ini. Penelitian tersebut membahas proses pengeboran tulang kortikal dengan media pendingin berupa larutan NaCl dan *Opsite*, yang dipilih dengan mempertimbangkan aspek biokompatibilitas dan aplikasinya di bidang medis. Hasil penelitian tersebut menjadi pedoman dalam penentuan rentang parameter pemesinan, khususnya kecepatan putar dan laju pemakanan, serta dalam penerapan analisis statistik menggunakan *Response Surface Method* dan ANOVA.

Oleh karena itu, penggunaan minyak nyamplung dapat diusulkan sebagai pelumas alternatif, khususnya dalam metode *Minimum Quantity Lubrication* pada proses pemesinan bor tulang kortikal. Minyak nyamplung memiliki karakteristik pelumasan yang baik sehingga diharapkan mampu mengurangi gesekan, panas, dan ketidakstabilan proses selama pengeboran tulang kortikal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara eksperimental dan mengimplementasikan pelumas nabati berbasis minyak

nyamplung terhadap penyimpangan diameter lubang pada proses pengeboran tulang kortikal, selain itu menganalisis pengaruh kombinasi parameter pengeboran yang digunakan terhadap respon yang digydengan teknik pelumasan menggunakan metode *Minimum Quantity Lubrication* dan analisis hasil menggunakan *Response Surface Method* dengan bantuan aplikasi *Design Expert-13* (DX-13).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Seberapa besar pengaruh parameter pengeboran (kecepatan putar, laju pemakanan, dan pelumas) terhadap ketelitian diameter lubang?
2. Bagaimana kondisi parameter pengeboran yang paling optimum terhadap ketelitian diameter lubang?
3. Apakah penggunaan pelumas minyak nyamplung mampu meningkatkan kualitas lubang yang dihasilkan pasca pengeboran?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini yang akan dicapai dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menentukan pengaruh parameter pengeboran (kecepatan putar, laju pemakanan, dan pelumas) terhadap ketelitian diameter lubang.
2. Menentukan kondisi parameter optimum terhadap ketelitian diameter lubang.
3. Menentukan peningkatan kualitas lubang hasil pengeboran tulang kortikal menggunakan pelumas minyak nyamplung.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang terdapat di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada pengeboran dengan menggunakan tulang kortikal sapi.
2. Parameter dalam penelitian ini hanya kecepatan putar, laju pemakanan, dan cairan pelumas (pelumas nabati).
3. Pengujian dilakukan hanya menggunakan pelumas nabati yaitu minyak nyamplung, VCO dan tanpa pelumas (kering).
4. Metode pendinginan yang digunakan dalam penelitian ini hanya dengan sistem MQL.
5. Variasi kecepatan putar dalam penelitian ini hanya 1000, 1500, dan 2000 rpm.
6. Variasi laju pemakanan dalam penelitian ini hanya 35, 60, dan 85 mm/min.
7. Pengolahan data hasil eksperimen hanya menggunakan metode *Respon Surface Methode* (RSM).

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 yang meliputi pemesinan bor, pahat bor, ketelitian dimensi, *Minimum Quantity Lubrication*, *response surface methode*, parameter pemesinan bor, dan pelumas nabati.

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

BAB II

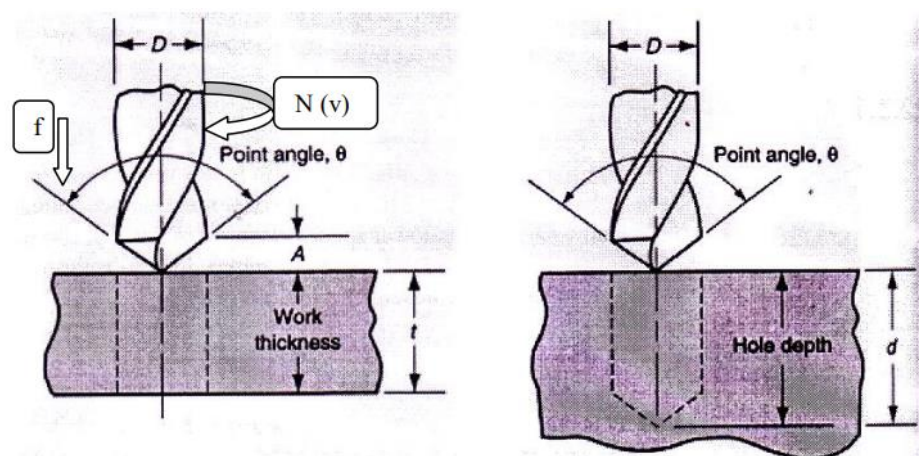
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemesinan Bor

Pemesinan bor merupakan proses pemesinan yang bertujuan untuk membuat lubang yang berbentuk silindris pada benda kerja. Hasil proses *drilling* digunakan untuk perakitan antara suatu komponen mesin dengan komponen mesin yang lainnya.

2.1.1 Pengeboran (*drilling*)

Proses *drilling* merupakan proses pemesinan yang paling banyak digunakan di industri otomotif dan manufaktur. Pengeboran (*drilling*) merupakan proses pemesinan yang digunakan untuk membuat lubang silindris dengan cara menekan mata bor yang berputar ke permukaan benda kerja.



Gambar 2. 1 Mekanisme pemotongan pada proses pengeboran
(Sumber: (Mufarrih et al., 2023))

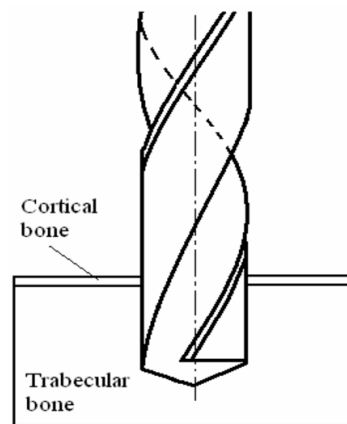
Dalam proses pengeboran, terdapat beberapa parameter yang saling berkaitan dan memengaruhi hasil lubang yang terbentuk. Kecepatan putar (v) adalah kecepatan rotasi mata bor yang menentukan seberapa cepat proses pemotongan berlangsung. Laju pemakanan (f) merupakan kecepatan masuknya mata bor ke dalam material, yang berpengaruh langsung terhadap beban potong dan gaya tekan yang diterima benda kerja. Selain itu, sudut ujung mata bor (*point angle*, θ) berperan dalam menentukan cara mata bor menembus material, memengaruhi pembentukan geram, gaya potong, serta bentuk dasar lubang. Diameter mata bor (D) menentukan ukuran lubang yang dihasilkan, sedangkan kedalaman lubang (d) menunjukkan seberapa jauh mata bor menembus material selama proses pengeboran (Mufarrih et al., 2023).

Kombinasi dari parameter-parameter ini akan menentukan kualitas lubang, seperti ketelitian diameter, kebulatan, serta muncul atau tidaknya *burr* di tepi lubang, sehingga pengaturan parameter yang tepat menjadi kunci utama dalam menghasilkan lubang yang baik, terutama pada material yang sensitif seperti tulang kortikal, dimana kesalahan kecil pada pemilihan parameter dapat berdampak langsung terhadap kerusakan struktur material dan penurunan kualitas lubang hasil pengeboran, serta mempertimbangkan kondisi tulang, jenis implan yang digunakan, dan tingkat ketelitian lubang yang dibutuhkan agar pemasangan implan dapat dilakukan secara optimal.

2.1.2 Pengeboran tulang (*bone drilling*)

Pengeboran tulang adalah salah satu jenis utama bedah ortopedi dan sering digunakan untuk membuat lubang sekrup di tempat yang diperlukan (Islam et al., 2022). Prosedur bedah yang dilakukan untuk mengatasi patah tulang tertentu biasanya disebut sebagai *osteosintesis* atau pemasangan implan. Prosedur medis yang melibatkan penggunaan bor atau alat-alat khusus untuk membuat lubang atau lubang kecil di dalam tulang. Jenis pengeboran tulang dapat bervariasi tergantung pada tujuan dan lokasi pengeboran.

Penelitian terkait pengeboran tulang telah banyak dilakukan berbagai peneliti sebagai pengembangan teknik dan pemesinan. Menurut Islam et al., (2022) salah satu aspek utama dalam pengeboran tulang adalah pengaruh panas dan penyimpangan dimensi yang dihasilkan selama proses pemotongan, karena temperatur yang terlalu tinggi dan dimensi yang terlalu menyimpang dapat menyebabkan nekrosis atau kerusakan jaringan tulang. Selain itu, penelitian oleh Dityamri et al., (2024) menekankan pentingnya optimasi parameter pemesinan untuk meminimalkan kerusakan mekanis dan termal pada tulang.



Gambar 2.2 Skema pengeboran ke dalam tulang kortikal dan trabekular (Sumber: Islam et al., 2022)

Pengeboran tulang biasanya merupakan prosedur yang memerlukan keterampilan dan peralatan medis yang tepat. Ini biasanya dilakukan oleh ahli bedah atau dokter spesialis dengan pengalaman dalam prosedur tersebut. Penting untuk diingat bahwa pengeboran tulang adalah prosedur medis yang berisiko, dan keputusan untuk melakukan pengeboran harus didasarkan pada evaluasi medis yang cermat dan pertimbangan manfaat dan risiko yang tepat (Saputra et al., 2023).

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa faktor utama dalam pengeboran tulang meliputi kecepatan putar, laju pemakanan, serta penggunaan pelumas yang semuanya berpengaruh terhadap gaya pemotongan, dan kualitas lubang yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemilihan parameter yang tepat menjadi dasar penting dalam meningkatkan keberhasilan prosedur pengeboran tulang.

2.2 Parameter Pemesinan Bor

Proses pemesinan merupakan suatu proses untuk menciptakan produk melalui tahapan-tahapan dari baku untuk diubah atau diproses dengan cara cara tertentu secara urut dan sistematis untuk menghasilkan suatu produk yang berfungsi (Mochammad & Kardiman, 2022). Parameter proses bor pada dasarnya sama dengan parameter proses pemesinan yang lain, akan tetapi dalam proses bor selain kecepatan potong, gerak makan, dan dan kedalaman potong perlu dipertimbangkan pula gaya aksial, dan momen puntir yang diperlukan pada proses bor (Rifelino et al., 2021). Parameter proses bor tersebut adalah:

2.2.1 Kecepatan putar

Kecepatan putar adalah jumlah putaran mata bor dalam satu menit (rpm). Dalam proses pengeboran, kecepatan putar memiliki hubungan langsung dengan kecepatan potong, yaitu kecepatan linier ujung mata bor yang bersentuhan dengan material. Hubungan antara kecepatan putar dan kecepatan potong dinyatakan melalui persamaan:

$$N = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

Keterangan:

- N : Kecepatan putar (rpm)
- V : Kecepatan potong (m/min)
- D : Diameter mata bor (mm)

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa untuk diameter mata bor yang tetap, peningkatan kecepatan putar akan secara langsung meningkatkan kecepatan potong. Kecepatan potong yang terlalu rendah dapat menyebabkan proses pemotongan tidak stabil dan meningkatkan gaya gesek, sedangkan kecepatan potong yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan temperatur pemotongan secara signifikan.

Peningkatan atau penurunan kecepatan putar akan menyebabkan kenaikan temperatur pemotongan akibat gesekan yang semakin besar antara pahat dan benda kerja, khususnya pada bagian *cutting edge*. Kondisi ini mempercepat terjadinya keausan pahat yang ditandai dengan penurunan

ketajaman, peningkatan gaya aksial dan torsi, serta menurunnya ketelitian diameter lubang, sehingga dalam jangka panjang umur pahat menjadi lebih pendek. Di sisi lain, kecepatan putar juga berpengaruh terhadap *Material Removal Rate* (MRR), di mana peningkatan kecepatan putar, dengan parameter lain konstan, akan meningkatkan volume material yang dihilangkan per satuan waktu. Sehingga pemilihan kecepatan putar yang tepat menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas proses, umur pahat, dan kualitas lubang.

2.2.2 Laju pemakanan

Laju pemakanan adalah kecepatan gerak maju mata bor ke dalam benda kerja selama proses pengeboran. Laju pemakanan dapat dinyatakan dalam satuan mm/rev (*feed per revolution*) maupun mm/min. Hubungan antara kedua satuan tersebut dinyatakan dengan persamaan:

$$V_f = f \cdot N \quad (2)$$

Keterangan

- V_f : laju pemakanan (mm/min)
- f : *feed per revolution* (mm/rev)
- N : Kecepatan putar (rpm)

Dari hubungan ini dapat dipahami bahwa laju pemakanan dalam mm/min dipengaruhi langsung oleh kecepatan putar, sedangkan *feed per revolution* menggambarkan seberapa besar material yang dipotong mata bor dalam satu putaran. Laju pemakanan yang terlalu besar atau kecil akan meningkatkan beban potong pada mata bor, sehingga kontak antara pahat dan benda kerja menjadi lebih berat, keausan pahat berlangsung lebih cepat, serta risiko deformasi material meningkat. Selain itu, laju pemakanan berpengaruh langsung terhadap umur pahat dan MRR, dimana peningkatan *feed* akan meningkatkan volume material yang dihilangkan per satuan waktu. Namun, parameter yang tidak sesuai dapat mempercepat umur pahat dan menurunkan kualitas lubang, sehingga pemilihan laju pemakanan yang tepat menjadi kunci keseimbangan antara produktivitas, dan kualitas hasil pengeboran.

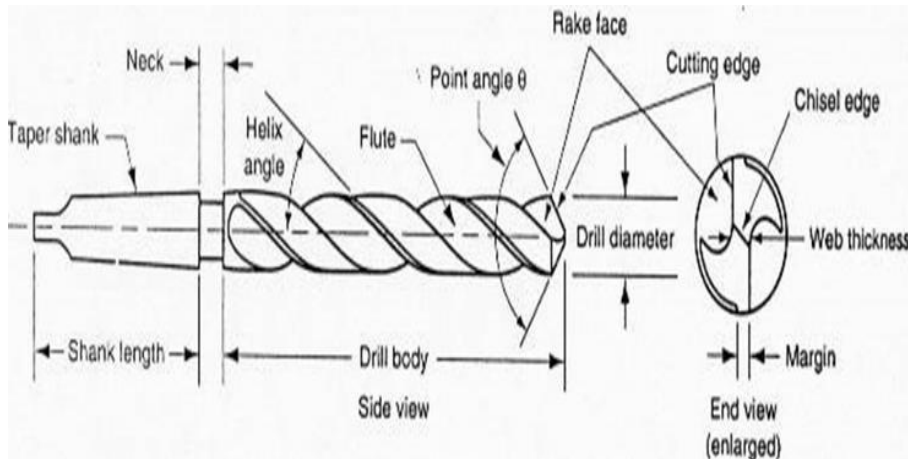
2.2.3 Cairan pelumas

Cairan pelumas pada proses pengeboran berfungsi untuk mengurangi gesekan antara pahat dan benda kerja, menurunkan temperatur pemotongan, serta membantu pembuangan geram dari zona potong. Dalam penelitian ini, jenis pelumas yang digunakan adalah minyak nyamplung, minyak kelapa (VCO), dan kondisi tanpa pelumas (kering). Perbedaan kondisi pelumasan ini secara langsung memengaruhi keausan pahat, umur pahat, serta kestabilan proses pengeboran.

Penggunaan pelumas, khususnya dengan metode MQL, membentuk lapisan *film* tipis pada antarmuka pahat dan benda kerja yang berfungsi mengurangi kontak langsung, gesekan, dan temperatur pemotongan, sehingga keausan pahat dapat ditekan dan umur pahat menjadi lebih panjang dibandingkan kondisi kering.

2.3 Mata Bor

Mata bor adalah salah satu jenis perkakas tangan atau mesin yang digunakan untuk menghasilkan lubang atau celah pada benda kerja seperti logam, kayu, plastik, atau bahan lainnya. Mata bor bekerja dengan cara memutar mata bor pada ujungnya, yang berfungsi untuk menghapus material dan membentuk lubang sesuai dengan diameter mata bor yang digunakan, sehingga geometri pahat dan kondisi pemotongan sangat berpengaruh terhadap kualitas lubang yang dihasilkan dan keausan dan ketajaman pahat juga dapat mempengaruhi kestabilan proses pengeboran dan ketelitian dimensi lubang.



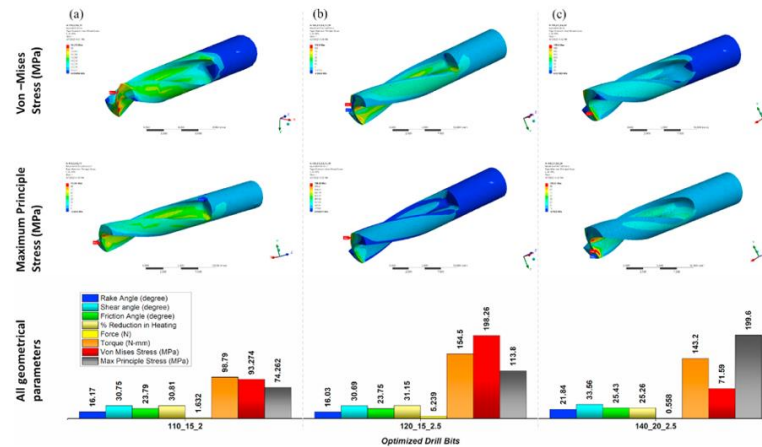
Gambar 2.3 Geometri mata bor
(Sumber: Darmanto et al., 2021)

Mata bor umumnya terbuat dari baja dengan ujung yang tajam dan keras, yang memungkinkan mereka untuk mengebor benda kerja dengan efisien. Mata bor dapat memiliki berbagai ukuran dan tipe, termasuk mata bor rata, mata bor spiral, mata bor senter, dan banyak lagi. Jenis mata bor yang digunakan tergantung pada jenis material yang akan dikerjakan dan jenis lubang yang ingin dibuat. Ada beberapa kelas pahat gurdi (mata bor) untuk jenis pekerjaan yang berbeda. Bahan benda kerja dapat juga mempengaruhi kelas dari mata bor yang digunakan, tetapi pada sudut-sudutnya bukan pada mata bor yang sesuai untuk jenis pengerjaan tertentu.

Mata bor (*drill bit*) merupakan komponen utama dalam pengeboran tulang kortikal, terutama pada proses yang menerapkan metode MQL dengan minyak nyamplung. Material, geometri, dan kondisi keausan pahat bor sangat berpengaruh terhadap hasil dimensi lubang. Usia dan penggunaan berulang dapat menyebabkan aus pada *cutting edge*, meningkatkan gaya dorong (*thrust*) dan temperatur pengeboran, yang selanjutnya menurunkan ketepatan dimensi lubang (Alam et al., 2023). Oleh sebab itu, pemilihan geometri dan materi pahat bor menjadi kritikal untuk menjaga toleransi presisi lubang pada tulang kortikal.

Geometri mata bor seperti sudut *rake*, sudut point, dan *helix angle* berdampak signifikan terhadap gaya dan temperatur selama pengeboran. Penelitian Vaidya et al., (2023) merekomendasikan sudut *rake* optimal 20° - 30° untuk

mengurangi gaya potong, serta *point angle* 130°-140° untuk aplikasi pada kortikal, yang dapat menurunkan *thrust* dan *torque*, serta mempermudah pembuangan *chip* tanpa terjadi *clogging*. Dengan MQL menggunakan minyak nyamplung, pelumasan minimal diharapkan pada interaksi mata bor dan tulang, sehingga mempertahankan geometri optimal tersebut.



Gambar 2.4 Parameter geometris mata bor dari model matematis

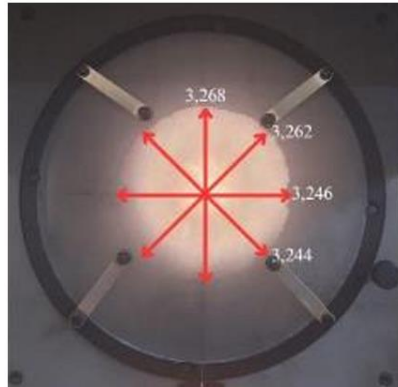
(Sumber: Vaidya et al., 2023)

Keausan dan kekasaran mata bor berdampak langsung pada integritas biologis dan ketelitian dimensi. *Drill* aus meningkatkan gaya potong, menghasilkan temperatur tinggi, bahkan dapat menyebabkan nekrosis termal pada sekitar lubang. Dicegahnya keausan berlebihan sangat relevan dengan strategi pemeliharaan mata bor saat menggunakan minyak nyamplung, pelumasan optimal dengan MQL dapat memperlambat keausan dan menjaga temperatur tetap stabil agar dimensi lubang tetap dalam toleransi sempit.

2.4 Ketelitian Dimensi

Ketelitian dimensi pengeboran pada tulang kortikal sangat krusial terutama untuk aplikasi medis dan implantasi. Pengaruh parameter pengeboran seperti kecepatan putar, laju makan, dan jenis pendingin terhadap nilai *circularity* atau kesalahan diameter lubang bor pada tulang kortikal mengindikasikan bahwa parameter tersebut menghasilkan lubang dengan bentuk paling mendekati

ideal, jadi karakteristik geometrik lubang bor sangat dipengaruhi oleh parameter proses (Dityamri et al., 2024).



Gambar 2.5 Pengukuran lubang hasil pengeboran dengan *profile projector* (Sumber: Dityamri et al., 2024)

Secara umum, ketelitian lubang ditentukan dengan membandingkan diameter lubang hasil pengeboran terhadap diameter nominal yang direncanakan. Pengukuran dilakukan pada beberapa arah, seperti horizontal, vertikal, dan diagonal, agar hasilnya mewakili kondisi lubang secara menyeluruh. Selisih antara diameter aktual dan diameter nominal disebut sebagai kesalahan diameter, di mana nilai selisih yang semakin kecil menunjukkan ketelitian lubang yang semakin baik (Ibrahim et al, 2021). Selain itu, pengukuran dilakukan menggunakan alat ukur yang memiliki ketelitian tinggi seperti profile projector agar mampu mendeteksi penyimpangan kecil, terutama pada material yang sensitif terhadap deformasi. Dengan cara ini, ketelitian lubang dapat dinilai secara objektif dan bisa digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter pemesinan terhadap kualitas lubang yang dihasilkan. Rumus untuk menentukan kesalahan diameter:

$$\Delta D = D_{rata-rata} - D_{aktual} \quad (3)$$

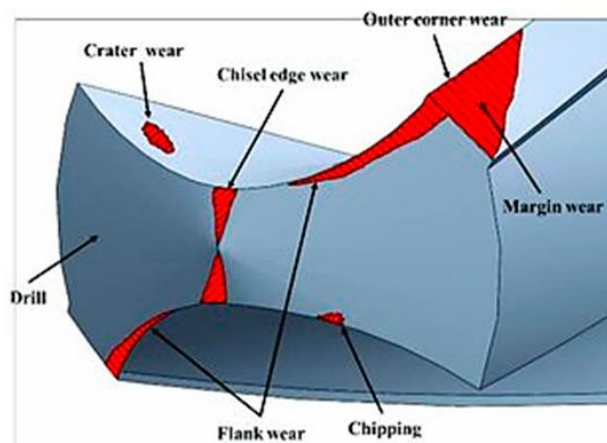
Keterangan:

- ΔD : kesalahan diameter (mm)
- $D_{rata-rata}$: diameter rata-rata hasil pengukuran (mm)
- D_{aktual} : diameter nominal mata bor (mm)

Hubungan antara parameter pemesinan dan ketelitian dimensi sangat erat karena masing-masing parameter memengaruhi proses pembentukan lubang. Kecepatan putar yang lebih tinggi cenderung menghasilkan pemotongan yang lebih stabil dan halus sehingga kesalahan diameter dapat dikurangi. Laju pemakanan yang terlalu besar dapat meningkatkan gaya potong dan menurunkan ketelitian lubang akibat deformasi material. Sementara itu, penggunaan pelumas membantu mengurangi gesekan dan panas, sehingga proses pengeboran menjadi lebih stabil dan dinding lubang lebih terjaga. Oleh karena itu, kombinasi parameter yang tepat sangat menentukan ketelitian dimensi lubang yang dihasilkan (Naibaho et al., 2023). Penyimpangan diameter pada lubang hasil pengeboran bukanlah fenomena yang terjadi secara terpisah; melainkan, ia merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor yang saling mempengaruhi. Berikut adalah pembahasan mengenai faktor tersebut:

2.4.1 Geometri dan kondisi mata bor

Mata bor dengan sudut yang tidak optimal (baik terlalu besar dan terlalu kecil) dapat menyebabkan distribusi gaya yang tidak merata. Kondisi ini mendorong terjadinya pergeseran arah potong sehingga lubang yang terbentuk tidak konsisten dengan desain awal. Seiring dengan waktu penggunaan, pahat atau mata bor akan mengalami keausan. Kondisi ini dapat mengubah profil mata bor dan menyebabkan peningkatan gesekan saat pemesinan, yang berdampak langsung pada penyimpangan diameter.



Gambar 2.6 Keausan mata bor
(Sumber: Islam et al., 2022)

Ketidakpresisian dalam pemasangan mata bor pada *chuck* dan ketidaksejajaran antara sumbu mata bor dengan sumbu mesin bor juga dapat mengakibatkan penyimpangan. Perbedaan kecil saja dalam keterpusatan (*concentricity*) dapat menghasilkan lubang yang tidak bulat sempurna.

2.4.2 Parameter pemesinan

Kecepatan putar (v) yang tinggi ditambah dengan laju pemakanan (f) yang tidak sesuai dapat meningkatkan gaya pemotongan (*cutting force*) dan menyebabkan vibrasi atau getaran selama proses pengeboran. Gaya dinamis ini akan mengakibatkan fluktuasi posisi mata bor terhadap benda kerja, sehingga menghasilkan lubang dengan deviasi yang signifikan. *Feed rate* yang terlalu tinggi meningkatkan gaya dorong, yang kemudian menyebabkan ketidakseragaman dalam distribusi material yang dipotong.

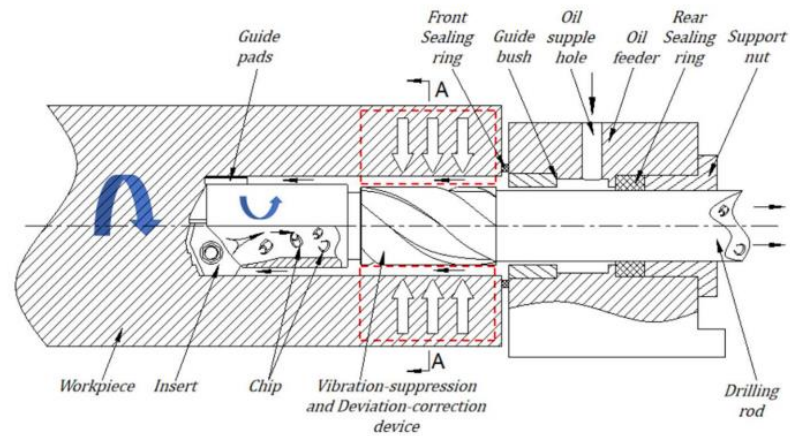
2.4.3 Kondisi material benda kerja

Material benda kerja yang memiliki sifat anisotropik atau tidak homogen (misalnya, adanya inklusi atau ketidakseragaman struktur mikro) akan menghasilkan beban pemotongan yang bervariasi sepanjang proses pengeboran. Variabilitas ini dapat memicu terjadinya deviasi pada lubang, terutama jika material mengalami deformasi plastis secara tidak merata selama pemotongan. Selama proses pengeboran, panas yang dihasilkan akibat gesekan antara mata bor dan benda kerja dapat menyebabkan ekspansi termal pada material. Jika tidak diimbangi dengan pendinginan yang memadai (misalnya, menggunakan MQL atau teknik pendinginan lainnya), ekspansi termal ini akan menambah deviasi dimensi lubang yang terbentuk.

2.4.4 Stabilitas dan kekakuan mesin

Mesin bor atau mesin pengeboran yang kurang kaku atau mengalami getaran berlebih akan sangat berpengaruh terhadap stabilitas posisi mata bor. Getaran (*chatter*) selama proses pengeboran menjadi salah satu penyebab utama penyimpangan diameter, karena getaran menyebabkan

fluktuasi posisi pahat yang mengakibatkan lubang tidak terbentuk secara konsisten.



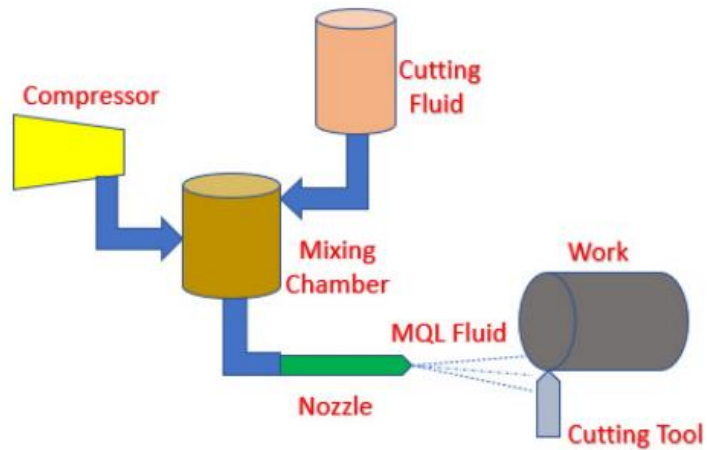
Gambar 2. 7 Mekanisme proses pengeboran lubang dengan sistem pendukung stabilitas dan peredam getaran

(Sumber: (Wang et al., 2025))

Penggunaan komponen pendukung seperti *guide pads* dan *guide bush* pada pengeboran bertujuan untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas mesin guna meminimalisir getaran (*chatter*) yang dapat menyebabkan fluktuasi posisi pahat (Wang et al., 2025). Dengan adanya perangkat pendukung tersebut, penyimpangan diameter dan pergeseran antara mata bor dan benda kerja dapat diredam, sehingga ketelitian dimensi lubang yang dihasilkan tetap konsisten dan sesuai dengan standar kualitas yang diinginkan.

2.4.5 Proses pemotongan dan pelumasan

Teknik pendinginan dan pelumasan seperti metode *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) atau penggunaan pelumas nabati sebagai pelumas dapat membantu mengurangi akumulasi panas, mengurangi gaya gesekan, serta menstabilkan proses pemotongan sehingga mampu meningkatkan kualitas permukaan hasil pemesinan dan memperpanjang umur mata bor yang digunakan serta mengurangi potensi kerusakan material akibat gesekan dan suhu tinggi selama proses pemotongan berlangsung.



Gambar 2. 8 Prinsip kerja sistem MQL

(Sumber: (Naibaho et al., 2023))

Penggunaan pelumas nabati dalam MQL mengurangi suhu pemotongan dan secara tidak langsung menurunkan deviasi diameter lubang. Pelumasan yang efektif memastikan bahwa gaya pemotongan tidak mengalami lonjakan tiba-tiba, yang sering menjadi penyebab utama penyimpangan.

2.5 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).

2.5.1 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.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (4)$$

Dimana:

Y : variabel respon

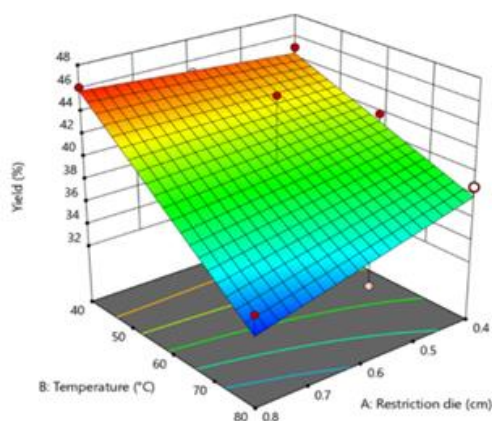
X_i : variabel bebas/faktor ($i = 1, 2, 3, \dots, k$)

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:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + E \quad (5)$$

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.

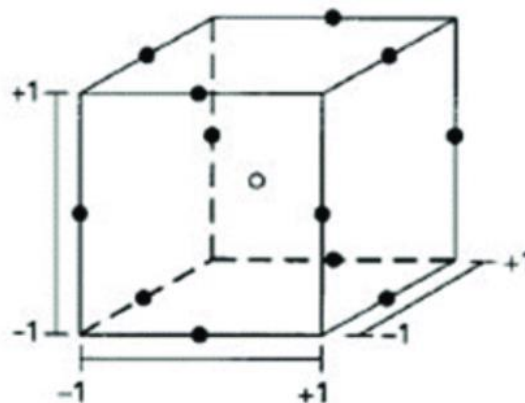


Gambar 2. 9 Plot metode permukaan respon

(Sumber: Saelee et al., 2022)

2.5.2 *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).



Gambar 2. 10 Penggambaran titik pada BBD

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

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.

2.5.3 *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.

1. Jumlah kuadrat (*Sum of Square*)

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

$$SS = x^2 - \frac{G^2}{N} \quad (6)$$

Dengan: 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:

$$V_{SS} = n - 1 \quad (7)$$

Dengan: 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.

$$MS_b = \frac{SS_b}{V_{SS_b}} \quad (8)$$

$$MS_w = \frac{SS_w}{V_{SS_w}} \quad (9)$$

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

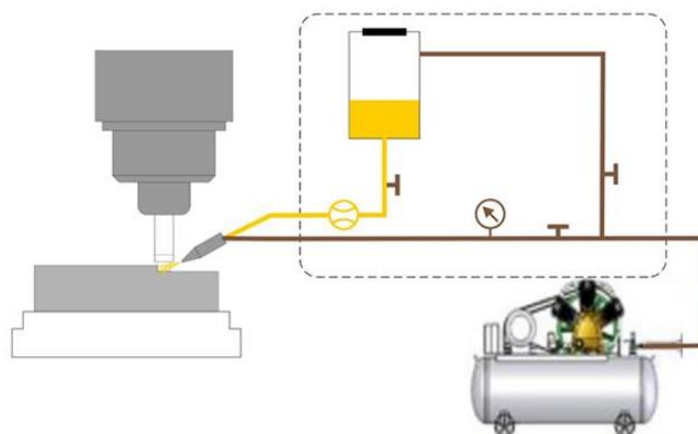
$$F_{hitung} = \frac{MS_b}{MS_w} \quad (10)$$

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

2.6 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. Metode suplai di MQL ada dua macam, yaitu *External MQL supply* dan *Internal MQL supply* (Yanis et al., 2022).

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).



Gambar 2.11 Skema proses pemotongan dengan MQL

(Sumber: Yanis et al., 2022)

MQL umumnya menggunakan minyak nabati seperti minyak jagung, kelapa, jatropha, atau minyak ester yang ditingkatkan dengan nabati 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 (Naveed & Arslan, 2021). Berbagai keuntungan penggunaan MQL dari studi atau penelitian terbaru:

1. Pengurangan konsumsi fluida hingga lebih dari 50% dibandingkan *flood cooling*, sehingga mengurangi biaya dan limbah cairan.
2. Pengurangan suhu pemotongan sekitar 10% saat MQL digunakan, berkat aplikasi langsung ke zona pemotong, yang mengurangi *fatigue termal* dan memperpanjang umur alat.
3. Peningkatan umur alat dan kualitas permukaan: *wear* lebih rendah, *burr* berkurang, dan kebulatan dimensi lebih baik, sebagaimana terbukti pada bahan baja dan tulang.
4. Lingkungan kerja lebih bersih: sedikit kontaminasi mesin, penggunaan energi lebih efisien, dan lebih mudah dalam pengelolaan daur ulang *chip/cairan* (Kazeem et al., 2022).

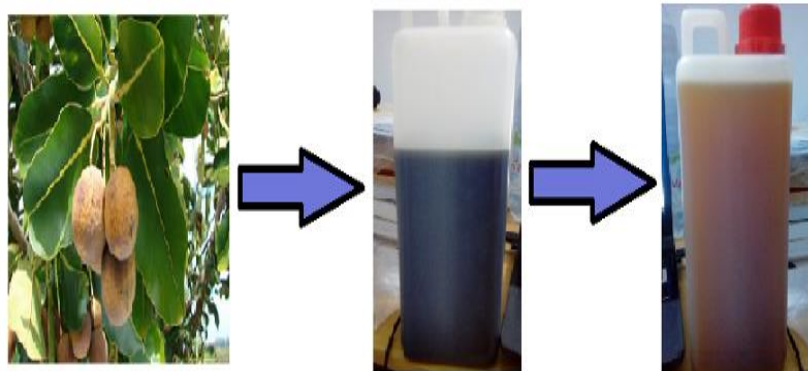
Dalam bidang manufaktur konvensional komponen yang diproduksi secara massal seperti suku cadang otomotif (mesin, transmisi, rem, dll), dalam volume besar cairan pemotong (pendingin) digunakan untuk meningkatkan produktivitas dan akurasi mesin. Belakangan ini, efek negatif dari cairan pemotongan atas orang-orang dan lingkungan telah menjadi masalah serius sehingga pengurangan pendingin sangat diperlukan (Naibaho et al., 2023).

2.7 Pelumas Nabati

Pelumas nabati merupakan alternatif ramah lingkungan yang berasal dari minyak tumbuhan, dan semakin banyak digunakan dalam aplikasi pemesinan karena sifat biodegradabilitasnya, kestabilan termal, serta kemampuan membentuk film pelumas yang baik.

2.7.1 Minyak nyamplung

Salah satu pelumas nabati yang potensial adalah minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*). Minyak ini dikenal memiliki viskositas dan indeks viskositas yang tinggi, sehingga mampu membentuk lapisan film pelumas yang stabil dan tahan terhadap tekanan pada zona *boundary lubrication*.



Gambar 2.12 Dari biji hingga penghilangan getah minyak nyamplung
(Sumber: Wulandari et al., 2020)

Selain itu, minyak nyamplung memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendukung penggunaannya sebagai pelumas pada proses pemesinan. Minyak ini mengandung asam lemak tak jenuh seperti asam oleat dan linoleat yang cukup tinggi, sehingga memiliki sifat pelumasan alami (*lubricity*) yang baik. Kandungan tersebut membantu mengurangi gesekan langsung antara pahat dan benda kerja serta menurunkan potensi keausan. (Milano et al., 2022).

2.7.2 VCO (*Virgin Coconut Oil*)

VCO merupakan pelumas nabati yang meski alami dan ramah lingkungan, tetap memiliki performa tribologis yang baik. Pada pengujian *four-ball*, tipe VCO "*green*" membentuk film pelumas yang stabil dengan nilai koefisien gesek rendah ($0,0823 \pm 0,0012$) dan daya dukung beban yang cukup tinggi, meskipun laju keausannya sedikit lebih besar daripada pelumas komersial. Jadi potensi VCO dalam menjaga lapisan *boundary lubrication* cukup efektif, meski kestabilan oksidasi

dan performa temperatur rendah perlu ditingkatkan saat aplikasi lebih intensif (Mizera et al., 2023).

Jenis *coolant* yang digunakan pada proses pengeboran tulang menyesuaikan kebutuhan yang diperlukan oleh benda kerja. Secara umum, bahan dasar *coolant* dapat berasal dari bahan kimia dan bahan alami. *Coolant* dari bahan kimia seperti namanya mengandung bahan-bahan kimia, sedangkan *coolant* alami berasal dari bahan alami. Saat ini dalam proses produksi di Indonesia baik skala besar maupun kecil menggunakan cairan dromus sebagai cairan pendingin. Cairan dromus berasal dari bahan mineral yang tidak dapat diperbaharui sehingga nantinya akan habis jika digunakan secara terus menerus (Pratama et al., 2021).

MQL pada proses pengeboran tulang kortikal, minyak nyamplung digunakan karena kemampuannya dalam meningkatkan efisiensi pelumasan, mempercepat pelepasan panas dari area pemotongan, serta mengurangi keausan pada alat potong. Pelumas yang terbentuk oleh minyak nyamplung berfungsi sebagai penghalang gesekan antara alat dan benda kerja, sehingga tidak hanya memperpanjang umur pahat, tetapi juga menjaga kestabilan suhu di zona pemotongan (Ilyas et al., 2024).

BAB 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:

- Proses pengujian pemesinan proses pengeboran dilakukan di Laboratorium Produksi, Jurusan Teknik Mesin, SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo.



Gambar 3. 1 Tempat penelitian Laboratorium Produksi SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo

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



Gambar 3.2 Tempat penelitian Laboratorium Metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung)

3.1.2 Waktu penelitian

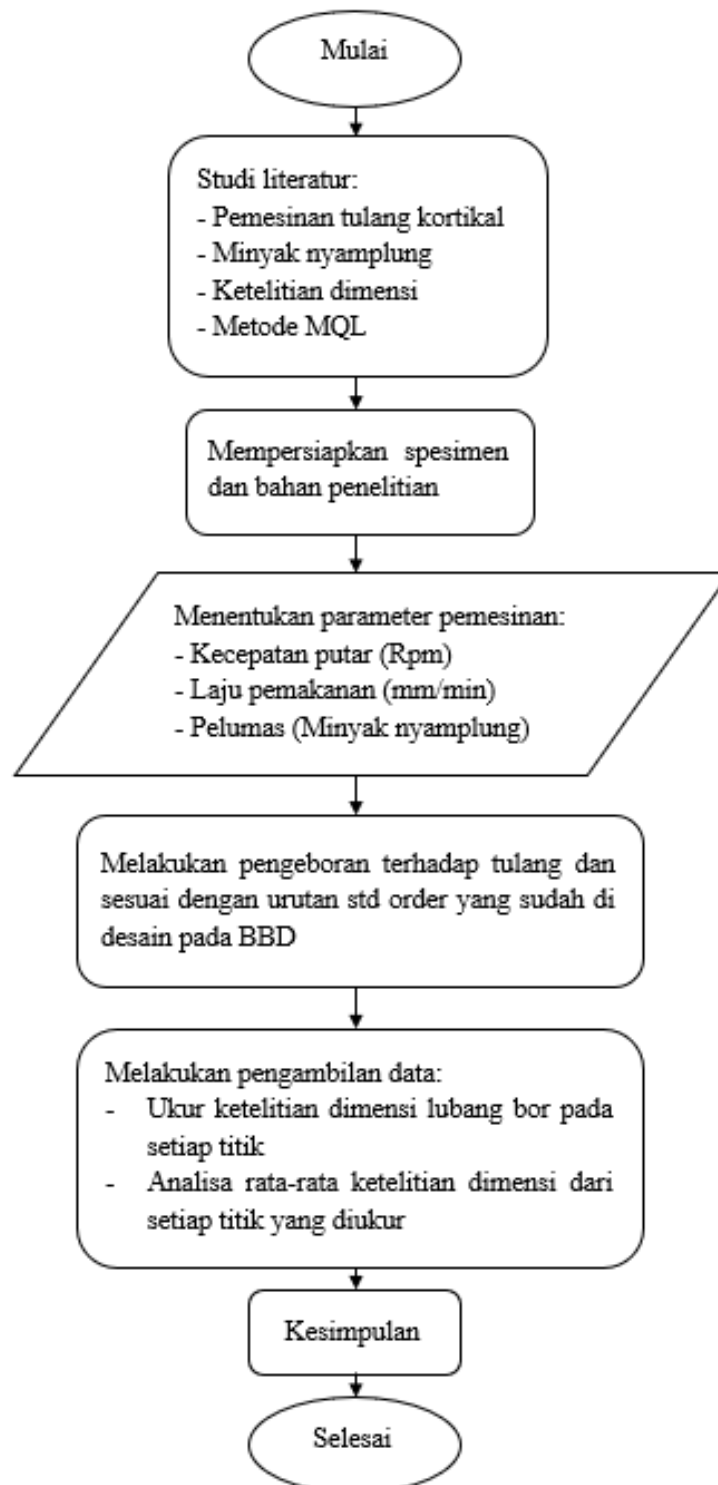
Penelitian ini dilaksanakan dengan skema yang terjadwal seperti terlampir dibawah ini.

Tabel 3.1 Rencana kegiatan penelitian

JADWAL RENCANA KEGIATAN PENELITIAN									
WAKTU PELAKSANAAN									
NO.	KEGIATAN	AGUSTUS	SEPTEMBER	OKTOBER	NOVEMBER	DESEMBER	JANUARU	FEBRUARI	MARET
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 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.3 Diagram alur penelitian

3.3 Alat dan Bahan

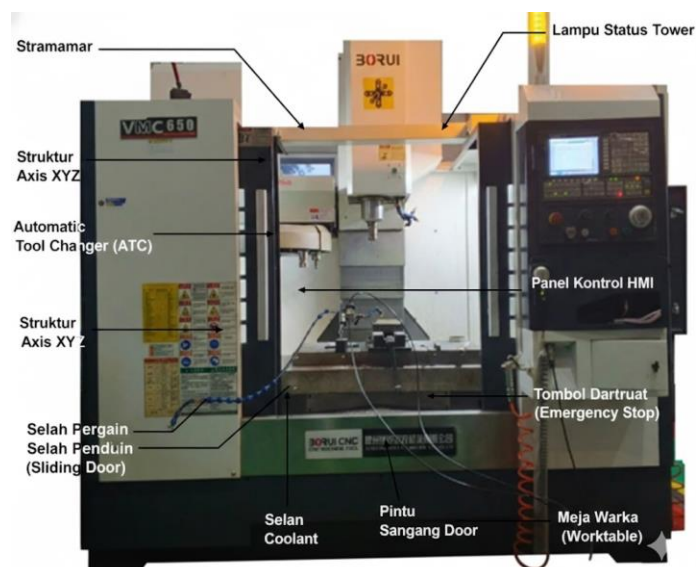
Alat dan bahan yang akan digunakan penulis dalam penelitian ini dilaksanakan terdiri dari alat utama dan alat pendukung lainnya yaitu sebagai berikut:

3.3.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

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. Proses *milling* dalam mesin ini merupakan proses pengeboran dan pemotongan material.



Gambar 3.4 CNC *milling*

Tabel 3.2 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

Lanjutan Tabel 3.2

<i>Range of spindle speed</i>	1 – 10000 rpm
<i>Voltage</i>	220V / 380V
<i>Weight (t)</i>	4
<i>Rapid feed speed</i>	20000 – 24000 mm/min
<i>Positioning accuracy</i>	$\pm 0,0075$
<i>Table travel (x) (mm)</i>	650
<i>Table travel (z) (mm)</i>	500
<i>Spindle taper</i>	BT40
<i>CNC control system</i>	GSK

2. *Profile projector*

Profile projector adalah alat ukur pembanding optik yang digunakan untuk memproyeksikan gambar suatu objek ke layar. Berguna untuk mengukur bagian kecil atau kompleks, atau untuk melakukan pengukuran dengan perbesaran tinggi, sehingga detail dimensi dan penyimpangan geometri dan profil lubang dapat diamati dengan lebih jelas dan akurat dibandingkan alat ukur yang umum digunakan serta meminimalkan kesalahan pembacaan akibat kontak langsung antara alat ukur dan benda uji



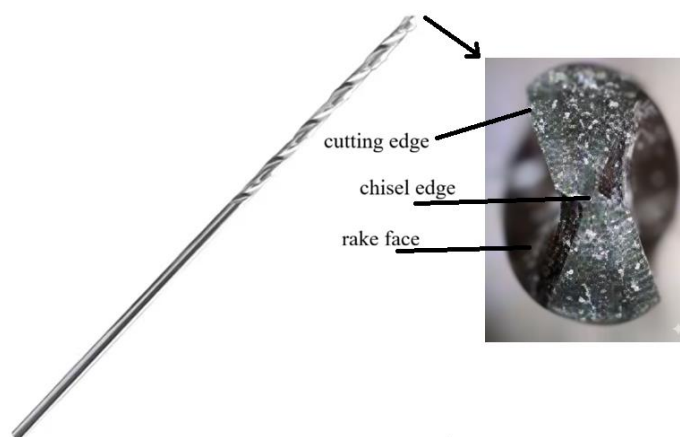
Gambar 3.5 *Profile projector*

Tabel 3.3 Spesifikasi *profile projector*

Spesifikasi	
Model	Mitutoyo PJ3000 <i>Profile Projector</i>
Type	PJ3000
Tahun	1986
Ketelitian	1 μ m (linier) dan 1 menit (sudut)
Diameter layar	300 mm
Lensa proyeksi	<i>zoom</i> 10x, 20x, 30x, & 50x
Akurasi proyeksi	Kontur: $\pm 0,1\%$, Permukaan $\pm 0,15\%$
Kepala mikrometer	25 mm (0,005 mm)
<i>Power supply</i>	220 V
Dimensi	452x754x1118 mm (PxLxT)
<i>Weight</i>	85kg

3. Pahat bor

Pahat bor adalah salah satu jenis perkakas tangan atau mesin yang digunakan untuk menghasilkan lubang atau celah pada benda kerja seperti logam, kayu, plastik, atau bahan lainnya. Pahat bor bekerja dengan cara memutar mata bor pada ujungnya, yang berfungsi untuk menghapus material dan membentuk lubang sesuai dengan diameter mata bor yang digunakan. Pada aplikasi medis, mata bor dirancang khusus agar mampu meminimalkan kerusakan jaringan.

Gambar 3.6 Mata bor *orthopedic*

Pemilihan pahat bor berbahan *stainless steel* dengan diameter 3,2 mm pada pengeboran tulang kortikal didasarkan pada standar ISO 13485 yang digunakan acuan standar mutu, khususnya untuk proses yang berkaitan dengan aplikasi material implan, yang menyesuaikan ukuran *plot hole* untuk pemasangan baut. Diameter 3,2 mm cukup kecil untuk mengurangi tekanan dan getaran saat pengeboran, namun tetap mampu menjaga kestabilan arah dan keakuratan lubang.

Tabel 3.4 Spesifikasi pahat bor

Spesifikasi	
Panjang	150 mm
Panjang <i>flute</i>	36 mm
Sudut mata bor	50°
Diameter	3,2 mm
Jenis material	<i>Surgical Grade Stainless Steel 316L</i>
Kategori	Set ortopedi
Standar keamanan	ISO 13485
Tipe	Instrumen ortopedi
Masa simpan	3 tahun
<i>Power source</i>	Manual
Nomor model	TW-136

4. Pelumas nabati

Pelumas nabati pada pengeboran tulang kortikal, 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 pengeboran, sehingga diharapkan dapat meningkatkan kualitas lubang dan ketelitian diameter.



Gambar 3.7 Pelumas minyak nyamplung

Tabel 3.5 Spesifikasi pelumas minyak nyamplung

Spesifikasi	
Warna	Coklat bening
Isi bersih	2 liter
Bentuk	Cair
Prinsip	Disemprotkan
Viskositas (40°C)	29,995 cst
Koefisien gesek	0,072
Titik nyala	112°C



Gambar 3. 8 Pelumas VCO

Tabel 3. 6 Spesifikasi pelumas VCO

Spesifikasi	
Warna	Coklat bening
Isi bersih	2 liter
Bentuk	Cairan
Prinsip	Disemprotkan
Viskositas (40°C)	25,82 cst
Koefisien gesek	0,1
Titik nyala	225°C

3.3.2 Bahan

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 direndam 24 jam dan dikeringkan sebelum dibuat menjadi spesimen.

Tulang kortikal kemudian dipotong dan dibentuk menjadi spesimen berupa plat dengan ukuran panjang 70 mm dan lebar 20 mm. Dari total 8 tulang yang diperoleh, dihasilkan sebanyak 15 spesimen plat tulang kortikal. Setiap satu spesimen digunakan untuk dua kali pengujian dengan membagi area pengujian menjadi dua bagian yang sama, sehingga pemanfaatan material menjadi lebih efisien dan kondisi material tetap seragam. Pada setiap satu kali pengujian dilakukan proses pengeboran sebanyak 10 lubang, sehingga satu spesimen menghasilkan total 20 lubang bor. Metode ini diterapkan untuk memperoleh jumlah data yang mencukupi dan konsisten dalam analisis kesalahan diameter lubang hasil pengeboran.



Gambar 3.9 Alur proses pemotongan spesimen uji

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian tugas akhir yang digunakan ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Menetapkan angka untuk variabel dan respon

Parameter yang digunakan saat proses pengeboran berlangsung yaitu:

Tabel 3.7 Parameter penelitian

No	Faktor	Level		
	Nama	Nilai terendah	Nilai tengah	Nilai tertinggi
		-1	0	1
1	Kecepatan putar (rpm)	1000	1500	2000
2	Laju pemakanan (mm/min)	35	60	85
3	Pelumas	VCO	Nyamplung	Kering

Pemilihan besaran parameter pada penelitian ini didasarkan pada hasil dan rekomendasi penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Dityamri et al., (2024), yang mengkaji proses pengeboran tulang dengan variasi kecepatan putar sebesar 500, 1000, dan 1500 rpm, serta menggunakan laju pemakanan yang relatif sama dengan penelitian ini. Hasil penelitian tersebut menunjukkan kondisi optimum didapat pada kecepatan putar 1500 rpm, laju pemakanan 35 mm/min dan parameter yang berpengaruh adalah laju pemakanan.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini mengembangkan rentang kecepatan putar dengan menggunakan nilai yang lebih tinggi, yaitu 1000, 1500, dan 2000 rpm, dengan tujuan untuk melihat kecenderungan penurunan kesalahan diameter pada parameter pemesinan dan mendekati kondisi pemesinan yang lebih stabil.

3.4.2 Menyiapkan tabel penelitian RSM *box-behnken*

Adapun tabel penelitian untuk RSM *box-behnken* adalah sebagai berikut:

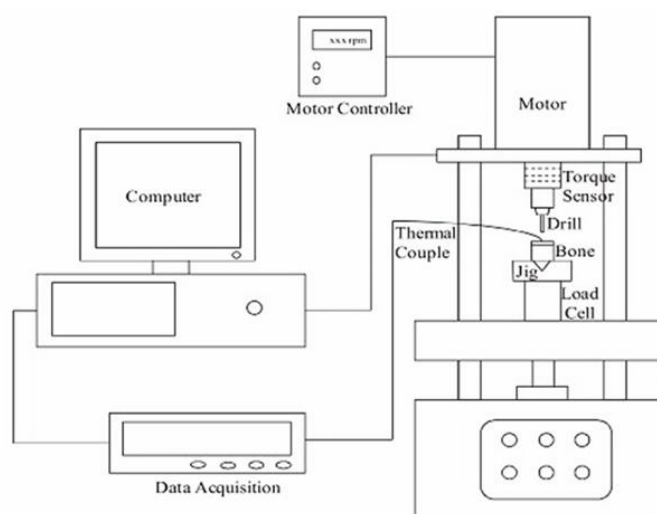
Tabel 3.8 Parameter penelitian *box-behnken*

No	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
	Kecepatan putar (rpm)	Laju pemakanan (mm/min)	Pelumas
1	1500	35	VCO
2	1500	60	Nyamplung
3	2000	60	Kering
4	2000	85	Nyamplung
5	1000	60	Kering
6	1500	60	Nyamplung
7	1500	60	Nyamplung
8	2000	60	VCO
9	1500	35	Kering
10	2000	35	Nyamplung
11	1000	60	VCO
12	1500	85	Kering
13	1000	85	Nyamplung
14	1000	35	Nyamplung
15	1500	85	VCO

3.4.3 Proses mekanisme pengeboran tulang kortikal

Setelah mesin di *set-up*, maka proses pengeboran material tulang kortikal dapat dilakukan menggunakan pelumas nabati. Adapun mekanisme dan langkah-langkah dalam melakukan pengeboran tulang kortikal adalah sebagai berikut:

1. Persiapan pada mesin CNC *miling*.
2. Memasang tulang kortikal pada ragum di mesin CNC *miling* dengan posisi pengeboran tegak lurus.
3. Menentukan parameter bor.
4. Melakukan pengeboran pada tulang kortikal sesuai dengan urutan yang telah di tentukan.
5. Mengamati dan menganalisa kondisi spesimen tulang kortikal saat pengeboran.
6. Selesai.



Gambar 3.10 Mekanisme pengeboran tulang dengan CNC *milling*

3.4.4 Prosedur pengukuran diameter lubang bor

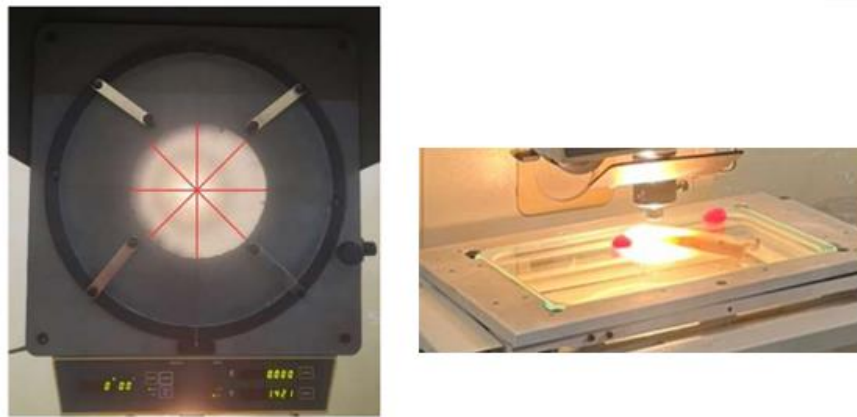
Setelah tulang selesai dibor langkah berikutnya adalah melakukan pengukuran kesalahan diameter lubang bor, langkah pengukuran dapat diilustrasikan sebagai berikut :

1. Sebelum dilakukan pengukuran, dilakukan perataan bidang menggunakan plastisin agar spesimen tidak bergerak atau berpindah posisi pada saat pengukuran
2. Mengukur kesalahan diameter lubang bor menggunakan alat *profile projector* (menarik garis sumbu x dan y sebanyak 4 kali pada permukaan atas dan 4 kali pada permukaan bawah). Dilakukan penarikan garis pada *profile projector* dengan menarik garis

sebanyak 4 kali penarikan, yang didapat dari sumbu x dan sumbu y dengan sudut sebesar 45°.

$$\Delta D = D_{rata-rata} - D_{aktual} \quad (11)$$

Kemudian didapatkan nilai diameter terbesar dan juga diameter terendah dari pengukuran lubang, hasil pengukuran diameter terbesar dan terendah akan dihitung nilai rata-rata kesalahan diameternya dan dikurangi diameter aktual atau diameter mata bor untuk mendapatkan hasil kesalahan diameter lubang.



Gambar 3.11 Proses penarikan garis mikroskop *profile projector* & perataan bidang spesimen dengan plastisin

3. Standar toleransi diameter lubang bor mengacu pada standar ISO 286-2 untuk batas penyimpangan dimensi, yaitu kisaran $\pm 0,05$ mm dari diameter nominal. Apabila penyimpangan hasil pengukuran melebihi batas toleransi, maka dianggap terjadi penyimpangan yang signifikan.
4. Mengumpulkan data hasil penelitian berupa nilai kesalahan diameter permukaan atas dan bawah. Nilai yang didapat dari hasil pengukuran kemudian dimasukkan kedalam Tabel dibawah ini, untuk dilakukan analisis data menggunakan RSM sebanyak 15 kali percobaan karena menggunakan *Box-Behnken Design* dengan bantuan aplikasi *Design Expert-13*.

Tabel 3.9 Tabel data kesalahan diameter permukaan atas dan bawah

Std	Run	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Respon 1	Respon 2
					Kesalahan diameter atas (mm)	Kesalahan diameter bawah (mm)
9	1	1500	35	VCO		
13	2	1500	60	Nyamplung		
8	3	2000	60	Kering		
4	4	2000	85	Nyamplung		
7	5	1000	60	Kering		
14	6	1500	60	Nyamplung		
15	7	1500	60	Nyamplung		
6	8	2000	60	VCO		
11	9	1500	35	Nyamplung		
2	10	2000	35	Nyamplung		
5	11	1000	60	VCO		
12	12	1500	85	Nyamplung		
3	13	1000	85	Nyamplung		
1	14	1000	35	Kering		
10	15	1500	85	VCO		

5. Data hasil pengukuran dimasukkan kedalam Tabel 3.9 setelah dilakukan pengumpulan data, kemudian dilakukan analisis data menggunakan bantuan aplikasi DX-13 guna melihat pengaruh dari beberapa faktor yang paling signifikan, normal plot residual, dan nilai parameter optimum terhadap kesalahan diameter pada lubang bor.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Dapat ditentukan dari parameter pengeboran yang digunakan yaitu kecepatan putar, laju pemakanan dan pelumas terhadap ketelitian diameter lubang, kecepatan putar merupakan parameter yang berpengaruh signifikan. Hasil analisis ANOVA menunjukkan faktor A-kecepatan putar nilainya kurang dari 0,05 yang menunjukkan hasil ini signifikan secara statistik dengan nilai 0,0008 untuk diameter atas dan 0,0007 untuk diameter bawah. Dibandingkan dengan faktor B-laju pemakanan sebesar 0,9397 untuk diameter atas dan 0,9017 untuk diameter bawah dan faktor C-pelumas 0,0824 untuk diameter atas dan 0,0894 untuk diameter bawah nilainya lebih dari 0,05 yang artinya menunjukkan hasil tidak signifikan.
2. Kondisi optimum yang diperoleh dari hasil penelitian adalah parameter dengan kecepatan putar 2000 rpm, laju pemakanan 85 mm/min, dan menggunakan pelumas minyak nyamplung. Berdasarkan kondisi optimum yang diperoleh, dapat ditentukan bahwa penggunaan pelumas nabati dapat meningkatkan ketelitian dimensi dengan menggunakan parameter yang sesuai.
3. Berdasarkan hasil pengamatan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan pelumas minyak nyamplung mampu meningkatkan kualitas lubang hasil pengeboran tulang kortikal pasca pengeboran. Secara

visual, lubang yang dihasilkan menunjukkan bentuk yang lebih rapi dan simetris. Dengan demikian, pelumas minyak nyamplung, dapat dianggap efektif dalam meningkatkan kualitas lubang pengeboran tulang kortikal dibandingkan tanpa penggunaan pelumas.

5.2 Saran

Adapun saran guna mendapatkan hasil yang lebih baik lagi dalam penelitian selanjutnya, yaitu, pada penelitian ini, nilai kekasaran permukaan lubang tidak dapat diukur karena pada waktu pengujian *stylus* tidak dapat membaca nilai kekasaran permukaan, padahal nilai kekasaran permukaan lubang dapat mewakili hasil ketelitian dimensi lubang. Pada penelitian selanjutnya untuk melihat kekasaran permukaan pada lubang bor harus dilakukan uji kekarasan permukaan dengan *stylus* yang lebih kecil agar dapat membaca hasil kekasaran permukaan pada lubang.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriansyah, A., & Yanis, M. (2021). Analisis Parameter Pemesinan pada Proses *Side Milling* Baja AISI 1045 Menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM). *Jurnal Rekayasa Mesin*, 21(1), 25–31. <https://doi.org/10.36706/jrm.v21i1.88>
- Alam, K., Qamar, S. Z., Iqbal, M., Piya, S., Al-Kindi, M., Qureshi, A., Al-Ghaithi, A., Al-Sumri, B., & Silberschmidt, V. V. (2023). *Effect of drill quality on biological damage in bone drilling*. *Scientific Reports*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33381-y>
- Basalamah, S., & Widodo, E. (2021). *Response Surface Model with Comparison of OLS Estimation and MM Estimation*. *Indonesian Journal of Statistics and Its Applications*, 5(2), 273–283. <https://doi.org/10.29244/ijisa.v5i2p273-283>
- Darmanto, S., Purwadi, D., Hartono, H., Ridwan, M., Ariwibowo, D., Umardani, Y., & Yuniarto, Y. (2021). Aplikasi Mesin Bor Di Industri Pande Besi. *Jurnal Pengabdian Vokasi*, 2(1), 1–4. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpv/article/view/9326>
- 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>
- Duc, T. M., Long, T. T., & Van Thanh, D. (2020). *Evaluation of minimum quantity lubrication and minimum quantity cooling lubrication performance in hard drilling of Hardox 500 steel using Al₂O₃ nanofluid*. *Advances in Mechanical*

- Engineering*, 12(2), 1–12. <https://doi.org/10.1177/1687814019888404>
- Gamero-Salinas, J., & López-Fidalgo, J. (2025). *Response Surface Methodology using desirability functions for multiobjective optimization to minimize indoor overheating hours and maximize useful daylight illuminance*. *Scientific Reports*, 15(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96376-x>
- Hussain, A. (2023). *Investigation of the effects of machining parameters on hole quality in drilling mild steel AISI 1045*. *Journal of Materials and Manufacturing*, 2(October), 20–27. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10401152>
- Ibrahim, G. A. (2019). The Analisis Kekasaran Permukaan Dan Kebulatan Pada Pemesinan *Drill* Paduan Magnesium Menggunakan Metode *Taguchi*. *Machine : Jurnal Teknik Mesin*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.33019/jm.v5i1.736>
- Ibrahim, G., Hamni, A., Burhannudin, Y., Warsito, A., & Dityamri, A. (2025). Kesalahan Diameter Lubang Pada Pengeboran Tulang Kortikal. 22, 310–316. <https://doi.org/10.71452/590802>
- Ilmiah, J., & Pendidikan, W. (2022). 2693-Article Text-7447-1-10-20221102. 8 (November), 95–101.
- Ilyas, B. S. K. B. W., 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. <https://doi.org/10.36815/majamecha.v6i2.3500>
- Islam, A., Kamarrudin, N. S., Daud, R., Noor, S., & Mohd, F. (2022). *A Review of Surgical Bone Drilling and Drill Bit Heat*. *Metals*, 12(11), 1900.
- Kazeem, R. A., Fadare, D. A., Ikumapayi, O. M., Adediran, A. A., Aliyu, S. J., Akinlabi, S. A., Jen, T. C., & Akinlabi, E. T. (2022). *Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations—A Review*. *Lubricants*, 10 (4). <https://doi.org/10.3390/lubricants10040069>
- 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>
- Milano, J., Shamsuddin, A. H., Silitonga, A. S., Sebayang, A. H., Siregar, M. A., Masjuki, H. H., Pulungan, M. A., Chia, S. R., & 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(November), 1578–1590. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.059>
- 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>
- Mufarrih, A., Harijono, A., Amrullah, U. S., Qosim, N., & Emzain, Z. F. (2023). *Analisa Kebulatan pada Proses Drilling Material KFRP*. *Jurnal Mesin Nusantara*, 5(2), 201–212. <https://doi.org/10.29407/jmn.v5i2.19472>
- Naibaho, R., Sianturi, R. L., & Napitupulu, A. (2023). *Perancangan dan Optimasi Performa Sistem Minimum Quantity Lubrication (MQL) pada Proses Pemesinan Keras dengan Kontroler berbasis Arduino*. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 4(2), 31–34. <https://doi.org/10.55338/saintek.v4i2.901>
- Nasution, A. R., Wahyudi, F. S., Siregar, C. A., Affandi, A., & Fuadi, Z. (2023). *Pengaruh sudut twist drill terhadap kekasaran dan kebulatan pada proses pemesinan drilling*. *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.24853/sintek.17.1.1-6>
- 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. A., Kurniaty, ; Ika Hasyim, U. H., & Fitriyano, G. (2021). Pemanfaatan Biji Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*) Sebagai Bahan Baku Biodiesel Berdasarkan Proses Produksi Dan Penambahan Katalis. *Jurnal Konversi*, 10(2), 7–12.
- Raflan, R., & Feriyanto, D. (2024). Analisis Pengaruh *Nanofluida Heat Transfer Oil* (HTO) / SiO₂ Dengan Metode *Taguchi* Pada Pembubutan *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) Baja ST 37. *AME (Aplikasi Mekanika Dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 10(2), 95–107. <https://doi.org/10.32832/ame.v10i2.825>
- Rifelino, R., Rahim, B., & Indrawan, E. (2021). *Optimization of CNC Turning Parameters Using Taguchi Method*. *Teknomekanik*, 4(1), 42–48. <https://doi.org/10.24036/teknomekanik.v4i1.11072>
- Rosli, N., & Zamiruddin, N. E. H. (2020). *Application of Minimum Quantity Lubrication for Various Machining Processes – A Mini Review*. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 4(2), 40–47. <https://doi.org/10.15282/jmmst.v4i2.5137>
- Saelee, M., Sivamaruthi, B. S., Tansrisook, C., Duangsri, S., Chaiyasut, K., Kesika, P., Peerajan, S., & Chaiyasut, C. (2022). *Response Surface Methodological Approach for Optimizing Theobroma cacao L. Oil Extraction*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/app12115482>
- Saputra, E. W., Burhanuddin, Y., & Harun, S. (2023). Pemodelan dan simulasi pengeboran pada proses pengeboran tulang dalam pembedahan ortopedi. *ARMATUR: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur*, 4(1), 68–75. <https://doi.org/10.24127/armatur.v4i1.3359>
- Silitonga, S., & Indra, A. (2025). Analisis Variasi Media Pendingin Dan Parameter Pengeboran Terhadap Keausan Mata Bor Pada Proses Pengeboran Plat Baja ST37. 2(4), 390–401.
- Szpisják-Gulyás, N., Al-Tayawi, A. N., Horváth, Z. H., László, Z., Kertész, S., &

- Hodúr, C. (2023). *Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review*. *Acta Alimentaria*, 52(4), 521–537. <https://doi.org/10.1556/066.2023.00235>
- 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>
- Vaidya, P. V., Dutta, A., Rooj, S., Talukdar, R., Bhombe, K., Seesala, V. S., Syed, Z. Q., Bandyopadhyay, T. K., & Dhara, S. (2023). *Design modification of surgical drill bit for final osteotomy site preparation towards improved bone-implant contact*. *Heliyon*, 9(6), e16451. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16451>
- Wang, Y., Chen, T., & Yu, D. (2025). *Research on Vibration-Damping and Deflection Correction of BTA Deep Hole Drilling Tool Systems Based on Dynamic Pressure Lubrication and Squeeze Film Theory*. *Machines*, 13(11), 986. <https://doi.org/10.3390/machines13110986>
- 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(August). <https://doi.org/10.1063/5.0015792>
- Yanis, M., Akhmad, A. A., Barlin, B., Firdaus, A., & Yuliasari, N. (2022). Penerapan alat *minimum quantity lubrication* pada pemberian cairan pemotongan sebagai upaya pemesinan ramah lingkungan. *Jurnal Inovasi Hasil Pengabdian Masyarakat (JIPEMAS)*, 5(2), 199. <https://doi.org/10.33474/jipemas.v5i2.13957>
- You, J., Zhou, X., Xu, X., Li, T., & Liu, Y. (2024). *Research progress in bone cutting technology for dental implant sites preparation: A review*. *MCB Molecular and Cellular Biomechanics*, 21(2), 1–24. <https://doi.org/10.62617/mcb284>.