

**KAJIAN PEMODELAN DAN SIMULASI PARAMETER PENGEBORAN
PADA PROSES PENGEBORAN TULANG DALAM PEMBEDAHAN
ORTOPEDI**

(Tesis)

Oleh

**EKO WAHYU SAPUTRA
NPM 1925021010**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

ABSTRAK

KAJIAN PEMODELAN DAN SIMULASI PARAMETER PENGEBORAN PADA PROSES PENGEBORAN TULANG DALAM PEMBEDAHAN ORTOPEDI

Eko Wahyu Saputra¹, Yanuar Burhanuddin², Suryadiwansa Harun³

¹Mahasiswa Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

^{2,3}Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

Dalam pembedahan ortopedi mata bor berfungsi sebagai alat bantu membuat lubang untuk pin atau sekrup dalam upaya perbaikan fraktur atau pemasangan perangkat prostetik. Selama proses berlangsung akan menyebabkan peningkatan suhu pada area pengeboran, kenaikan suhu melampaui batas yang diijinkan akan mengakibatkan matinya sel-sel tulang akibat kehilangan suplai darah yang disebut dengan nekrosis. Untuk mencegah peningkatan suhu berlebihan maka salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan pemilihan geometri mata bor. Untuk mendapatkan nilai optimal pada geometri mata bor kemudian dilakukan pemilihan parameter *point angle* dengan nilai 87°, 105°, 118°, 120° dan 130° serta *helix angle* dengan nilai 13°, 20°, 28° dan 30°. Berdasarkan kombinasi nilai *point angle* dan *helix angle* tersebut kemudian dilakukan pengujian menggunakan software DEFORM-3D, hingga dihasilkan nilai suhu optimal dengan nilai terendah pada kombinasi *point angle* 130° dan *helix angle* 13° dengan temperatur maksimal pada suhu 38,767° C.

Kata kunci: Nekrosis, Mata Bor, *Point Angle*, *Helix Angle*, DEFORM-3D.

ABSTRACT

MODELLING AND SIMULATION STUDY OF DRILLING PARAMETERS IN BONE DRILLING PROCESS IN ORTHOPAEDIC SURGERY

Eko Wahyu Saputra¹, Yanuar Burhanuddin², Suryadiwansa Harun³

¹Master student in Mechanical Engineering Department, Lampung University

^{2,3}Lecture in Mechanical Engineering Department, Lampung University

In orthopaedic surgery, the drill bit serves as a tool to create holes for pins or screws for fracture repair or prosthetic device placement. During the process will cause an increase in temperature in the drilling area, the temperature rise beyond the allowable limit will result in the death of bone cells due to loss of blood supply called necrosis. To prevent excessive temperature increase, one way that can be done is by selecting the drill bit geometry. To obtain the optimum value for the drill bit geometry, the point angle parameter was selected with values of 87°, 105°, 118°, 120° and 130° and the helix angle with values of 13°, 20°, 28° and 30°. Based on the combination of point angle and helix angle values, testing is then carried out using DEFORM-3D software, until the optimal temperature value is produced with the lowest value in the combination of point angle 130° and helix angle 13° with a maximum temperature of 38.767°C.

Keywords: Necrosis, Drill Bit, Point Angle, Helix Angle, DEFORM-3D.

**KAJIAN PEMODELAN DAN SIMULASI PARAMETER PENGEBORAN
PADA PROSES PENGEBORAN TULANG DALAM PEMBEDAHAN
ORTOPEDI**

Oleh

EKO WAHYU SAPUTRA

(Tesis)

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
Magister Teknik**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **KAJIAN PEMODELAN DAN SIMULASI
PARAMETER PENGEBORAN PADA
PROSES PENGEBORAN TULANG DALAM
PEMBEDAHAN ORTOPEDI**

Nama Mahasiswa : **Eko Wahyu Saputra**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1925021010

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Ketua

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Anggota


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


Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.
NIP. 19700501 200003 1 001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin


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


Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph. D.
NIP. 19710817 199802 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.

Anggota Penguji : Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.

Penguji Utama I : Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D.

Penguji Utama II : Dr. Harmen, S.T., M.T.



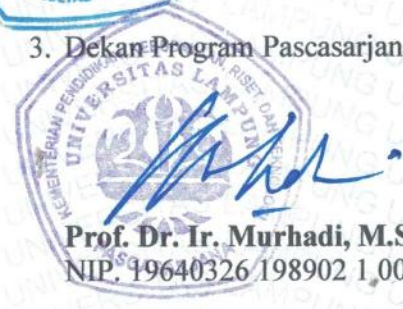
2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.,
NIP. 19750928 200112 1 002



3. Dekan Program Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 19640326 198902 1 001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : 27 Mei 2023

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

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

Bandar Lampung, 27 Mei 2023

Yang Membuat



Eko Wahyu Saputra
NPM 1925021010

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tanjung Karang pada tanggal 28 Januari 1992 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara dari padangan Bapak Sutrisyanto dan Ibu Siti Aminah. Penulis mengawali pendidikan pada tahun 1998 di SD Negeri 1 Surabaya diselesaikan pada tahun 2004, SMP Negeri 1 Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2007, dan SMA Negeri 5 diselesaikan pada tahun 2010. Pada tahun 2011, penulis mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan pendidikan S1 ke Perguruan Tinggi Universitas Lampung di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri), selama menjadi mahasiswa penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin Unila (HIMATEM) sebagai Divisi Kerohanian pada tahun periode 2013-2014.

Selama masa perkuliahan penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di awal tahun 2015 selama 40 hari di Desa Bima Sakti Kecamatan Negeri Besar, kabupaten Way Kanan mulai tanggal 21 Januari hingga 1 Maret 2015. Pada tahun 2014 tepatnya pada 1 September hingga 1 Oktober 2014 penulis mengikuti Kerja Praktik (KP) di PT. Astra Otoparts Tbk. Divisi Adiwira Plastik sub divisi produksi *plant* II, dan membuat laporan dengan judul “Analisa *Manufacturing Control Point* Untuk Mengetahui nilai Efektivitas Peralatan Menggunakan Metode

OEE Pada Departemen Plastik Injeksi”. Pada tahun 2018, penulis melakukan penelitian dengan judul “Perancangan Ulang Mesin Pres Hidrolik Sebagai Alat Penunjang Praktikum Pada Laboratorium Teknik Produksi Jurusan teknik Mesin Universitas Lampung” untuk memperoleh gelar strata-1.

Tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan Pascasarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan melakukan penelitian Tesis dengan judul “Kajian Pemodelan dan Simulasi Parameter Pengeboran pada Proses Pengeboran Tulang dalam Pembedahan Ortopedi” dibawah bimbingan Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. dan Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis,

Eko Wahyu Saputra

Ucapan Terima Kasih

Assalamu'alaikum wr. wb.

Dengan mengucap lafaz *hamdalah* penulis panjatkan puji syukur kepada Allah SWT yang tidak pernah berhenti mencurahkan kasih sayang, kemudahan, serta rahmat-Nya. Shalawat serta salam tidak lupa penulis panjatkan kepada junjungan nabi besar Muhammad SAW yang telah membimbing dan mengantarkan kita menuju zaman yang lebih baik seperti sekarang. Dengan penuh rasa syukur atas limpahan anugrah yang telah diberikan, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Kajian Pemodelan dan Simulasi Parameter Pengeboran pada Proses Pengeboran Tulang dalam Pembedahan Ortopedi” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana strata-2 pada jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

Dalam pelaksanaan dan penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan sumbangan pikiran dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M. Si. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

3. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D., selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin Universitas Lampung
4. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. selaku dosen pembimbing utama yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan, dukungan, kritik dan saran kepada penulis dalam proses penyelesaian tesis ini.
5. Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan saran dan bimbingan kepada penulis sebelum, saat, dan setelah penelitian hingga skripsi ini selesai disusun.
6. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D., selaku dosen penguji pertama atas segala kritik, saran dan bimbingan yang diberikan kepada penulis.
7. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku dosen penguji kedua yang telah bersedia memberikan kritik dan saran dalam pembuatan tesis ini.
8. Seluruh jajaran Dosen dan Staf Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan ilmunya dan semangatnya.
9. Seluruh asisten laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung.
10. Ayah, ibu dan adik-adik tercinta yang telah memberikan kasih sayang, memfasilitasi, membimbing, serta doa yang diberikan.
11. Kepada seluruh teman-teman angkatan 2011 yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terima kasih atas rasa kekeluargaan dan dukungan yang telah diberikan selama masa kuliah ini.
12. Kepada teman-teman Pasca Sarjana Teknik Mesin Angkatan 2019 terimakasih banyak atas semua dukungannya.
13. Seluruh keluarga besar HIMATEM Unila, Terimakasih banyak atas dukungan, bantuan dan saran-sarannya, salam SOLIDARITY FOREVER

14. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu secara tulus memberikan bantuan moril dan materil kepada penulis.

Akhir kata, penulis memohon maaf kepada semua pihak apabila tesis ini masih terdapat kesalahan dan kekeliruan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan. Semoga tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis,

Eko Wahyu Saputra

Motto

“ Sesungguhnya Allah tidak menyukai tiap-tiap orang yang berkhianat lagi
mengkari nikmat”

(Q.S. Al-Hajj Ayat 38)

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan lafaz *hamdalah* penulis panjatkan puji syukur kepada Allah SWT karena dengan limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyajikan Tesis yang berjudul: “Kajian Pemodelan dan Simulasi Parameter Pengeboran pada Proses Pengeboran Tulang dalam Pembedahan Ortopedi”.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan keterbatasan yang penulis miliki, oleh sebab itu penulis mengharapkan saran, kritikan serta masukan agar dapat lebih baik lagi dimasa depan.

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis,

Eko Wahyu Saputra

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang dan Masalah	1
1.2. Tujuan	6
1.3. Batasan Masalah	6
1.4. Sistematika Penulisan	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Pengertian Tulang	8
2.2. Proses Pengeboran Tulang	12
2.3. Geometri Mata Bor	14
2.4. Desain Eksperimen	20
2.5. Metode Elemen Hingga	22
2.6. Konsep Perancangan	23
2.7. Konsep Pengambilan Keputusan	26
III. METODE PENELITIAN	28
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2. Perangkat Penelitian	28
3.3. Tahapan Awal Penelitian	28
3.3.1. Pengumpulan Literatur	28

3.3.2. Perumusan Diagram Alir	29
3.4. Metodologi Desain	29
3.5. Perancangan Pemodelan Tulang dan Mata Bor	30
3.5.1. Analisa Kebutuhan	31
3.5.2. Penjelasan Mengenai <i>Surgical Drill</i>	31
3.6. Konseptual Desain	34
3.6.1. Konsep Solusi	34
3.7. Perancangan Eksperimen dan Pengumpulan Data	38
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1. Evaluasi Konsep Solusi	41
4.2. Pemilihan Konsep Solusi	43
4.3. Perwujudan Desain	45
4.4. Memulai Simulasi	52
4.5. Hasil Simulasi	58
V. SIMPULAN DAN SARAN	84
5.1. Simpulan	84
5.2. Saran	84

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Tipe tulang menurut strukturnya	10
3.1 Konsep solusi	35
4.1 Tabel Penilaian	41
4.2 Tabel kecocokan alternatif kriteria	42
4.3 Penentuan geometri	46
4.4 Perwujudan desain	50
4.5 Sifat material tulang manusia	52
4.6 Parameter pengeboran	54
4.7 Hasil simulasi percobaan 5x4	59
4.8 Rata-rata total temperatur parameter geometri	61
4.9 Hasil simulasi yang dieliminasi	66
4.10 Desain faktorial penuh 2x4	69
4.11 Pengukuran nilai gaya dan torsi	78

DAFTAR TABEL

Gambar	Halaman
2.1 Tipe tulang	10
2.2 Struktur tulang manusia	11
2.3 Proses penyembuhan patah tulang femur	12
2.4 1. Skrup pengencang, 2. Pelat penyangga	13
2.5 Geometri mata bor	15
2.6 Gambaran eksperimen faktorial 2^2	21
2.7 (a) Eksperimen faktorial tanpa interaksi, (b) eksperimen faktorial dengan interaksi	21
2.8 (a) Mesh metode perbedaan hingga (b) elemen segitiga (c) elemen segi empat (\bullet) adalah titik mesh/ <i>nodes</i>	23
2.9 Diagram proses perancangan	24
3.1 Diagram alir kegiatan penelitian	29
3.2 Metodologi desain	30
3.3 Jenis mata bor tipe pendinginan tertutup	32
3.4 Sistem pendinginan pada proses pengeboran	32
3.5 a. <i>Two flute</i> b. <i>Three flute</i>	33
3.6 a. Mata bor dengan titik split b. Mata bor standar	34
3.7 Konsep 1	36
3.8 Konsep 2	36
3.9 Konsep 3	37
3.10 Konsep 4	38
4.1 Konsep varian terpilih	45
4.2 Mata bor dengan nilai <i>point angle</i> pada 87°	46
4.3 <i>Drill point style</i>	47
4.4 <i>Drill point</i>	48

4.5	Contoh desain mata bor dengan diameter 3.5 mm	49
4.6	Kurva <i>stress-strain</i> material tulang	53
4.7	Desain tulang & mata bor pada DEFORM-3D	55
4.8	Simulasi pada <i>step</i> 3000	56
4.9	Simulasi pada <i>step</i> 5768	56
4.10	Hasil simulasi dengan perubahan temperatur	57
4.11	Gambaran lengkap perubahan temperatur pengeboran	58
4.12	Grafik rata-rata suhu parameter nilai <i>point angle</i>	61
4.13	Grafik rata-rata suhu parameter nilai <i>helix angle</i>	62
4.14	Hasil simulasi percobaan 5x4	64
4.15	Grafik <i>normal probability plot</i> percobaan 5x4	65
4.16	Hasil simulasi percobaan setelah eliminasi	67
4.17	Grafik <i>normal probability plot</i> hasil eliminasi	67
4.18	Hasil uji kesamaan variasi hasil eliminasi	68
4.19	Hasil analisis varian faktorial penuh 2x4	70
4.20	Grafik <i>normal probability plot</i> percobaan 2x4	71
4.21	Hasil uji kesamaan variasi hasil percobaan 2x4	71
4.22	Efek <i>plot</i> tipe normal	72
4.23	Efek <i>plot</i> tipe pareto	73
4.24	Efek <i>plot</i> variabel	74
4.25	Interaksi <i>plot</i>	74
4.26	<i>Surface plot</i>	75
4.27	Kontur <i>plot</i>	76
4.28	Luas penampang pada ujung mata bor.....	81
4.29	Luas penampang dan temperatur	83

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Pembedahan ortopedi merupakan salah satu dari cabang ilmu kedokteran yang mempelajari tentang berbagai macam diagnosis dan pengelolaan gangguan/penyakit sistem muskuloskeletal, kerangka serta jaringan lunak (Duckworth and Blundell, 2010), saat ini penyakit yang berkaitan dengan ortopedi terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun dengan kejadian fraktur di Indonesia sebesar 1.3 juta setiap tahun (Ropyanto dkk, 2013). Peningkatan tersebut berbanding lurus dengan semakin meningkatnya usia harapan hidup dan tingginya angka kecelakaan lalu lintas yang terjadi sehingga, akan berdampak pada semakin meningkatnya pasien patah tulang yang ada di Indonesia.

Angka kecelakaan yang menyebabkan fraktur tulang di Indonesia semakin bertambah tentu membutuhkan penanganan operasi tulang yang baik. Salah satu strategi untuk penyembuhan kasus fraktur tulang adalah dengan memanfaatkan pelat penyangga yang dilengkapi baut tulang/*screw* (Hermanto dkk, 2016). Dengan metode pemasangan pelat diharapkan proses penyembuhan tulang yang patah akan menjadi lebih cepat jika dibandingkan dengan metode konvensional yakni hanya mengandalkan papan kayu atau

gypsum untuk membuat tulang tidak bergerak dari luar (Rusnaldy dkk., 2017). Pada proses penyatuan tulang yang patah dengan pemasangan pelat logam memerlukan pemasangan sekrup, sehingga diperlukan proses pengeboran diperlukan pada bagian- bagian tertentu tulang yang akan disambung.

Dari berbagai proses permesinan yang ada, pengeboran menjadi salah satu proses yang paling banyak digunakan selama proses operasi ortopedi berlangsung. Pengeboran tulang memiliki peran penting terutama sebagai langkah awal dalam memasukkan pin atau sekrup selama perbaikan fraktur atau pemasangan perangkat prostetik (Wiggins and Malkin, 1976). Selama prosedur operasi pemboran tulang ortopedi, gesekan antara permukaan bor dan tulang menyebabkan peningkatan termal di sekeliling lubang pengeboran, kenaikan suhu melampaui batas yang diijinkan akan mengakibatkan matinya sel-sel tulang akibat kehilangan suplai darah yang akan menyebabkan perlambatan dalam proses penyembuhan dimana penyakit ini disebut dengan nekrosis. Nekrosis dapat terjadi karena peningkatan suhu di zona pengeboran (Alam et al., 2013).

Osteonekrosis merupakan penyakit yang diakibatkan kehilangan suplai darah pada tulang baik permanen maupun sementara. Ada beberapa alasan yang menjadi penyebab hilangnya suplai darah ke tulang yang menjadi pemicu utama timbulnya nekrosis yakni dikarenakan trauma, yang merupakan hasil dari cedera atau non trauma yang disebabkan karena penggunaan obat, gangguan pembekuan darah atau peyalahgunaan alkohol. Trauma termal adalah bagian dari nekrosis traumatik yang disebut sebagai nekrosis termal

tulang atau termal osteonekrosis (Pandey and Panda, 2013). Kenaikan suhu tulang pada saat melakukan pengeboran hingga 47°C selama 1 menit dapat meningkatkan resiko terkena nekrosis (Eriksson and Albrektsson, 1983). Untuk menghindari masalah yang ditimbulkan terkait dengan peningkatan suhu tersebut kemudian dapat dilakukan dengan meningkatkan nilai keakuratan serta efisiensi pada proses pengeboran (Akhbar and Yusoff, 2018).

Secara umum terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi kualitas dan efisiensi dalam pengeboran tulang antara lain parameter permesinan dan spesifikasi mata bor (Ghai, 2014). Studi lain menjelaskan bahwa peningkatan suhu pengeboran dipengaruhi oleh tiga parameter utama yakni kecepatan putar, gerak makan dan diameter mata bor. Sehingga jika salah satu dari tiga parameter tersebut mengalami kenaikan maka temperatur pengeboran juga akan semakin meningkat (Xiashuang et al., 2016).

Dalam jurnal yang dibuat oleh Rosidi dengan judul "*Optimalization of bone drilling parameters using Taguchi method base on finite element analysis*" dijelaskan bahwa terdapat pengaruh parameter pengeboran yakni diameter bor, laju umpan dan kecepatan spindel terhadap pembentukan panas. Dimana diameter bor adalah 4 mm, 6 mm dan 8 mm; laju umpan adalah 80 mm/menit, 100 mm/menit dan 120 mm/menit sedangkan kecepatan spindel adalah 400 rpm, 500 rpm dan 600 rpm kemudian dilakukan optimalisasi dengan metode Taguchi dimana parameter kombinasi dapat digunakan untuk mencegah nekrosis termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis elemen hingga

yang dikombinasikan dengan metode Taguchi dapat digunakan untuk mempresiksi pembentukan suhu dan mengoptimalkan parameter pengeboran (Risidi et al., 2017).

Hasil penelitian lain yang dilakukan oleh Sui Jianbo pada jurnal yang berjudul "*Experimental study of temperature rise during bone drilling process*" dijelaskan bahwa kenaikan temperatur yang terjadi di sekitar daerah pengeboran dipengaruhi oleh geometri mata bor, parameter proses pengeboran, dan jenis tulang. Hasil penelitian ini juga menyarankan agar para peneliti selanjutnya lebih memberikan perhatian khusus terhadap penentuan geometri mata bor yakni *point angle* serta interaksi antara *helix angle* dan *chisel edge angle* (Sui et al., 2020).

Penelitian yang hampir serupa juga dilakukan oleh Akbar dalam jurnal "*Multi-objective optimization of surgical drill bit to minimize thermal damage in bone-drilling*" penelitian ini fokus dalam optimalisasi mata bor guna mereduksi kerusakan termal yang mungkin terjadi melalui simulasi pengeboran. Untuk analisis kerusakan termal tulang, suhu dan diameter osteonekrosis ditetapkan sebagai respon, sedangkan *point angle*, *helix angle*, dipilih sebagai parameter perancangan. Mata bor yang telah dioptimalkan kemudian dibandingkan dengan mata bor bedah dalam simulasi pengeboran tulang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain mata bor yang telah dioptimalisasikan sebelumnya secara efektif mengurangi suhu tulang maksimum hingga 15,2% dan diameter osteonekrosis sebesar 10,5% dimana penelitian ini juga menunjukkan bahwa penerapan metode elemen hingga

(FEM) layak digunakan dalam mempelajari masalah klinis dalam penelitian pengeboran tulang dan menemukan solusi optimal sebelum uji klinis (Akhbar and Yusoff, 2019).

Berbagai hasil penelitian mengenai optimalisasi proses pengeboran tulang semakin memberikan pemahaman yang komperhensif mengenai cara penanggulangan kenaikan suhu pengeboran tulang guna mencegah terjadinya nekrosis. Salah satu cara dalam penangulungan tersebut adalah dengan mendesain geometri mata bor yang memiliki bentuk seoptimal mungkin sehingga dapat berkontribusi menurunkan suhu tulang saat dilakukan operasi pengeboran. Dari kajian sebelumnya diketahui bahwa optimalisasi desain mata bor secara efektif dapat mengurangi suhu tulang maksimum hingga 15,2% dengan *point angle*, *helix angle*, sebagai parameter perancangannya.

Selain dari pada itu dalam kaitannya terhadap kajian pemodelan dan simulasi khususnya pada penerapan metode elemen hingga diketahui dapat memberikan pengaruh yang positif terhadap kajian serta studi dalam mempelajari masalah yang mungkin ditimbulkan selama proses pengeboran sekaligus dapat memberikan solusi terhadap permasalahan tersebut. Salah satu media yang dapat melakukan analisis terhadap penerapan metode elemen hingga melalui kajian terhadap pemodelan dan simulasi yang dirancang untuk menganalisis berbagai proses pembentukan dan perlakuan sehingga dapat mengurangi biaya serta waktu dalam melakukan desain produk adalah DEFOM 3D (Jeffreey, 2000).

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan investigasi lanjutan mengenai pengaruh geometri terhadap kenaikan suhu pengeboran tulang, hingga optimalisasi berbagai parameter perancangan dalam mendesain mata bor yakni *point angle*, *helix angle*, dengan nilai variasi yang lebih beragam melalui kajian pemodelan dan simulasi menggunakan DEFORM 3D sebagai media analisis.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan parameter optimal dalam penentuan geometri mata bor tulang.
2. Menganalisis kenaikan temperatur yang terjadi pada proses pengeboran tulang.

1.3. Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan yang terjadi berkaitan dengan penelitian, ada beberapa hal yang menjadi batasan yaitu:

1. Proses pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan bantuan *software* DEFORM 3D.
2. Material pahat yang digunakan dalam simulasi adalah *stainless steel* AISI 316.
3. Optimalisasi hanya berfokus pada kombinasi nilai parameter geometri.
4. Hasil penelitian berupa kenaikan nilai temperatur saat proses pengeboran.

1.4. Sistematika Penulisan

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

1. BAB I. PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, tujuan, batasan masalah hipotesis dan sistematika penulisan laporan Tesis.

2. BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan teori mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian, yaitu: proses permesinan, pengenalan geometri mata bor, pengenalan simulasi menggunakan DEFORM 3D

3. BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan tempat dan waktu penelitian, bahan penelitian, peralatan, dan prosedur pengujian.

4. BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan hasil dan pembahasan dari data-data yang diperoleh saat melaksanakan proses pengujian.

5. BAB V. PENUTUP

Berisikan tentang hasil kesimpulan serta saran-saran yang ingin disampaikan untuk penelitian yang akan datang.

6. DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan dalam melakukan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Tulang

Tulang merupakan salah satu jaringan tubuh yang memiliki beberapa fungsi utama dalam kehidupan manusia antara lain sebagai kerangka tubuh sehingga manusia dapat berdiri tegak, serta tempat melekatnya ligamentum, tendon, dan muskulus. Tulang memberikan perlindungan terhadap organ-organ dalam, seperti tulang kranial melindungi otak, melindungi jantung dan paru-paru, tulang pelvis melindungi uterus, ovarium, dan intestinum. Bila muskulus yang melekat pada tulang berkontraksi, maka akan menggerakkan sendi-sendi sehingga manusia dapat melakukan aktivitas sehari-hari.

Tulang merupakan tempat penyimpanan utama kalsium tubuh. Pertukaran kalsium berlangsung secara dinamis dengan lingkungan ekstraseluler. Konsentrasi cairan tubuh manusia dikontrol secara ketat dan pelepasan kalsium tulang sangat penting dalam mengontrol konsentrasi kalsium. *Bone marrow* yang terdapat di dalam tulang kancellous (*cancellous*) merupakan tempat produksi sel-sel darah. Apabila dilihat dari strukturnya, maka tulang dibagi menjadi beberapa tipe, yaitu: tulang *immature (woven)* dan tulang *mature (lamellar)*.

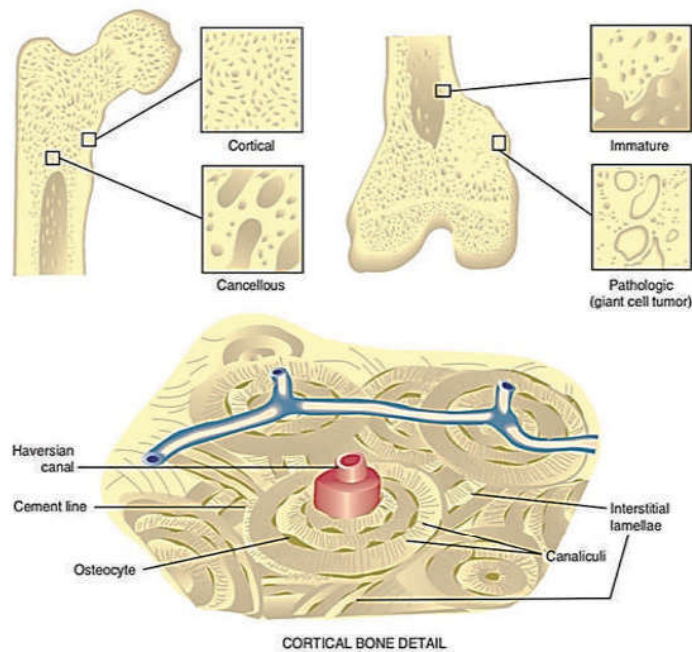
Pada tulang *immature* (woven), serabut-serabut kolagen tersusun secara acak dan tidak membentuk *lamella*, sehingga tulang lebih lemah dan lebih fleksibel bila dibandingkan dengan tulang *lamellar*. Susunan yang iregular memiliki karakteristik isotropik, yaitu mempunyai sifat dan kekuatan yang sama pada semua arah, tergantung dari arah beban yang diberikan.

Pada tulang *mature* (lamellar) ini merupakan komponen dari tulang kortikal dan kanelos dengan serabut kolagen yang tersusun sesuai dengan orientasi gaya beban yang diterima tulang, sehingga tulang lamellar memiliki karakteristik anisotropik. Osteoblas meletakkan matriks kolagen pada bungkus lapisan tipis mikroskopik yang disebut *lamella*. Di dalam setiap *lamella* serabut-serabut kolagen berjalan paralel satu dengan lainnya. Tulang kortikal merupakan 80% pembentuk sistem tulang skeleton dewasa yang meliputi tulang panjang.

Tulang kortikal lebih padat dan memiliki elastisitas modulus young (sekitar 20 GPa) lebih tinggi dibandingkan dengan tulang kanelos (sekitar 1 GPa). Tulang kortikal juga lebih resisten terhadap gaya bengkok (*bending*) dan puntir (*torsion*). Tulang kanelos didapatkan pada daerah tulang panjang dan pada bagian sentral tulang panjang. Tulang kanelos juga kurang padat, kurang elastis (lebih rapuh/*brittle*) dan kurang kuat dibandingkan dengan tulang kortikal.

Tabel 2.1 Tipe tulang menurut strukturnya

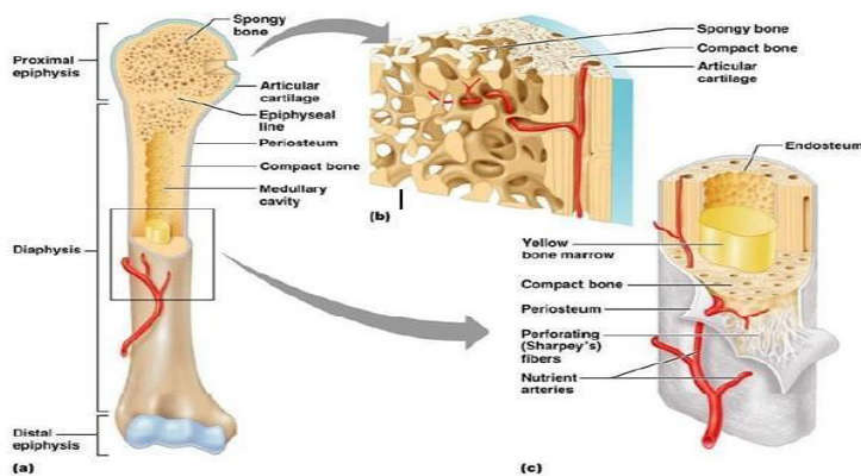
Gambaran mikroskopik	Subtipe	Karakteristik
Lamellar	Kortikal	<ul style="list-style-type: none"> • Orientasi struktur sesuai dengan aksis gaya • Kuat
	Kanselos	Lebih elastis dari tulang kortikal
Woven	Immature	<ul style="list-style-type: none"> • Orientasi struktur tidak sama dengan arah gaya
	Patologi	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur acak • Lemah • Fleksibel



Gambar 2.1. Tipe tulang (Wahyudin, 2018)

Tulang dianggap sebagai jenis jaringan ikat yang terdiri dari bahan yang dikalsinasi. Ada dua jenis jaringan tulang dalam tubuh manusia, yaitu tulang kortikal yang merupakan lapisan keras bagian luar dan tulang kanselus yang merupakan lapisan spons bagian dalam. Periosteum adalah jaringan ikat

osteogenik yang menutupi permukaan luar tulang sedangkan sumsum tulang terletak di dalam tulang itu sendiri. Sebagian besar bagian dalam tulang berlubang. Endosteum adalah sel serupa osteogenik yang melapisi permukaan bagian dalam tulang. Periosteum dan endosteum mengandung sistem vaskular yang memasok tulang dengan nutrisi dan oksigen untuk pertumbuhan dan perbaikan tulang (Mahdy and Essam, 2016).



Gambar 2.2. Struktur tulang manusia (Mahdy and Essam, 2016).

Nekrosis termal adalah kematian sel akibat beban termal yang berlebihan, menggambarannya sebagai akibat dari hilangnya suplai darah ke tulang, yang menyebabkan kematian jaringan tulang dan selanjutnya tulang mengalami kegagalan. Ada beberapa penelitian tentang ambang suhu untuk nekrosis termal. Kerusakan termal pada tulang tergantung pada tingkat suhu dan lama dampaknya. Pemanasan hingga 53°C selama 1 menit menyebabkan cedera tulang yang lebih besar, kemudian pada suhu rata-rata 47°C selama 1 menit dapat dijadikan sebagai ambang batas terjadinya *thermal necrosis* tulang manusia (Holler Christian, 2015)

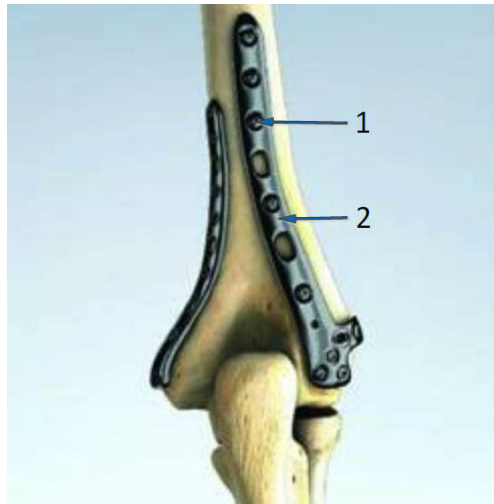
2.2 Proses Pengeboran Tulang

Proses penyembuhan tulang dibagi menjadi beberapa cara yakni cara konvensional dimana tulang yang mengalami patah tulang akan dibungkus menggunakan gips atau kayu agar tidak bergerak. Yang kedua adalah dengan melakukan proses pembedahan tulang dengan menggabungkan tulang yang rusak dengan menggunakan skrup agar tulang cepat melakukan penyembuhan. Fiksasi fragmen tulang dengan sekrup dan pelat membutuhkan pengeboran tulang. Oleh karena itu, mata bor bedah banyak digunakan oleh ahli bedah. Umumnya mata bor bedah untuk pemboran tulang manusia terbuat dari *stainless steel* martensitik untuk instrumen bedah dan memiliki geometri tertentu. Baik material maupun geometri, serta parameter pemotongan selama proses pemboran mempengaruhi kinerja mata bor di ruang operasi. Selain itu faktor manusia juga memegang peranan penting bagi penentuan kualitas lubang bor terutama bergantung pada keterampilan staf medis.



Gambar 2.3. Proses penyembuhan patah tulang femur (Wahyudin, 2018)

Dalam bedah ortopedi posisi patah tulang yang berbeda akan menentukan jenis perawatan yang akan dilakukan, namun langkah dasarnya relatif sama. Selama persiapan operasi, pasien harus melakukan tahapan *X-ray* untuk menentukan lokasi dan derajat dari patah tulang. Selanjutnya, anestesi lokal atau anestesi umum akan dilaksanakan.



Gambar 2.4: 1. Skrup pengencang, 2. Pelat penyangga (Yali Hou et al., 2015)

Selama operasi, ahli bedah akan memilih posisi yang tepat untuk memotong posisi fraktur dan kemudian menggunakan *periosteal detacher* (alat bedah) untuk mengelupas *periosteum* (jaringan ikat yang melapisi tulang) untuk lubang pengeboran. Selanjutnya, ahli bedah mengebor lubang dengan bor dan mengontrol pengeboran yakni kecepatan makan (*feed rate*) selama pengeboran berlangsung. Setelah menyelesaikan pengeboran, sekrup pengencang dan pelat digunakan untuk memperbaiki patah tulang, diikuti dengan penutupan luka dan pemulihan pasca operasi.

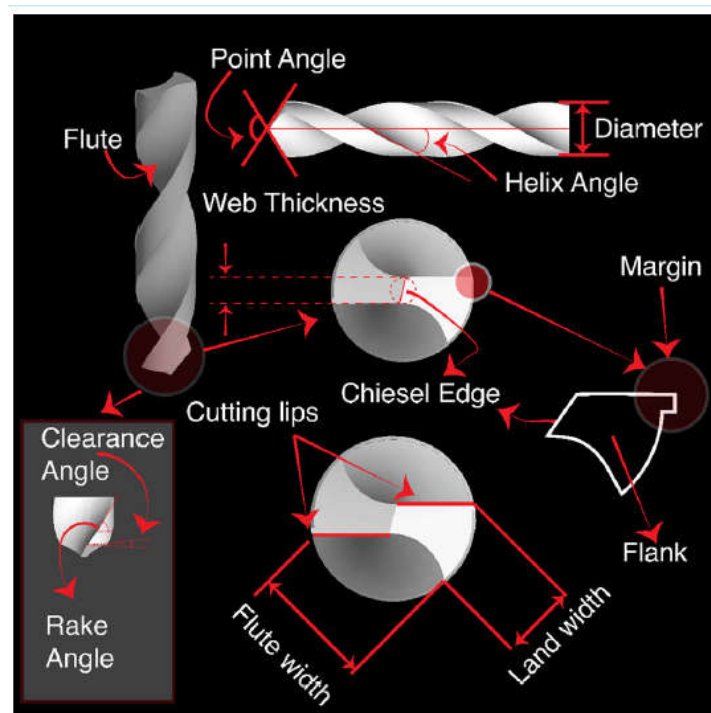
Kualitas pengeboran tulang menentukan pemulihan pasca operasi pasien. Dahulu operasi pengeboran tulang biasanya menggunakan satu kali cara pengeboran terus menerus yang membutuhkan ahli bedah yang memiliki pengalaman. Apalagi sangat sulit untuk membuat lubang secara akurat selama pengeboran proses. Saat ini, ahli bedah sering menggunakan dua kali pengeboran yakni dengan cara: pra-pengeboran dan *reaming* sekunder. Pra-pengeboran akan meningkatkan akurasi lokasi lubang dan batas kenaikan suhu jaringan tulang sampai batas tertentu. Sementara itu, *reaming* sekunder memberikan hasil yang akurat titik referensi lokasi, mencegah tergelincir dan malposisi selama pengeboran tulang secara efektif.

2.3 Geometri Mata Bor

Bor secara umum digunakan sebagai alat bantu untuk melubangi suatu benda. Pada mesin bor dapat dilakukan pekerjaan yang lainnya seperti, memperluas lubang serta pengeboran tirus pada bagian tertentu pada lubang. Dalam pelaksanaannya pengeboran sesungguhnya adalah suatu poros yang berputar, dimana pada bagian ujungnya (bagian bawah) disambungkan mata bor yang yang kemudian dapat membuat lubang terhadap benda kerja.

Proses pengeboran (*drilling*) adalah proses permesinan untuk membuat lubang bulat pada benda kerja. *Drilling* biasanya dilakukan memakai pahat silindris yang memiliki dua ujung potong yang disebut *drill*. Pahat diputar pada porosnya dan diumpankan pada benda kerja yang diam sehingga menghasilkan lubang berdiameter sama dengan diameter pahat. Lubang yang

dihasilkan dapat berupa lubang tembus (*through holes*) dan tak tembus (*blind holes*). (Al Huda, 2008). Karena mekanisme pengeboran tulang mirip dengan pengeboran logam maka mekanisme pemotongan dalam pengeboran tulang dapat dianalisis dengan mengacu pada teori fundamental dari mekanika penghilangan material yang menganalisis gerakan relatif antara alat potong dan benda kerja. Oleh karena itu, geometri mata bor secara langsung mempengaruhi mekanika pengeboran tulang. Mata bor dapat dibagi menjadi tiga bagian; *drill point*, *body*, dan bagian lain. Bagian pada *drill point* antara lain adalah *point angle*, *chisel edge*, *web thickness*, *rake angle*, dan *clearance angle*. Bagian *body* terbentuk berdasarkan *helix angle* dan *flute*. Fitur lain dikategorikan sebagai bagian lain-lain, yaitu, margin bor, diameter, material, serta pendinginan internal



Gambar 2.5. Geometri mata bor (Ali Akbar, 2020)

- *Point angle*

Point angle adalah sudut antara dua tepi pemotongan (*cutting edges*), yang mana digunakan sebagai titik pusat pengeboran. Sehingga dengan kemampuannya sebagai titik pusat pengeboran dapat mengurangi kemungkinan tergelincir pada permukaan benda kerja. Perbedaan nilai *point angle* akan menentukan jenis material yang akan dikerjakan. Misalnya pada nilai 118° digunakan untuk segala jenis tipe pengeboran. Sementara sudut yang lebih tinggi yakni 130° keatas digunakan untuk mengerjakan bahan yang lebih keras misalnya baja paduan tinggi, keras atau ringan. Sementara *point angle* yang lebih kecil digunakan untuk pengerjaan material yang lebih lunak misalnya, tulang serat, dan kayu. Penentuan nilai *point angle* yang paling tepat untuk digunakan pada proses pengeboran tulang masih diperdebatkan hingga kini. Sehingga belum ada nilai pasti mengenai nilai *point angle* yang paling cocok.

- *Chisel edge* dan *web thicknes*

Web thicknes adalah inti dan pusat mata bor yang saling berhubungan dengan *flutes*, sedangkan *chisel edge* menghubungkan ujung *web* pada *cutting lips*. Ketebalan *web* yang semakin besar akan meningkatkan *chisel edge*. Nilai *web* akan menentukan kekuatan serta kekakuan (*rigidity*) mata bor, sedangkan *chisel edge* digunakan untuk penentuan posisi pemotongan pada mata bor. Ketebalan *web* diukur dalam rasio persentase untuk diameter mata bor (%) dan dapat dibagi menjadi tiga kategori: ringan (14–16%), sedang (17–22%), dan berat (25–40%).

Penggunaan *web* ringan dan sedang adalah digunakan untuk pengeboran tujuan umum sedangkan *web* pada kategori berat diadopsi dalam pengeboran berat. *Chisel edge* memiliki kontribusi yang sangat tinggi terhadap nilai *thrust force* selama proses pengeboran berjalan sehingga sangat berpengaruh terhadap nilai temperatur.

- *Clearance (Relief) Angle*

Clearance angle adalah sudut yang berada pada sisi *flank* atau sayap dimana berfungsi sebagai pembuat jalur keluarnya puing-puing tanpa pengaruh dari sisi bor dan dinding tulang, sehingga memungkinkan untuk melakukan pemotongan tepi juga menembus tulang. Pada pemakaian secara umum sudut *clearance* berada antara 8° hingga 15° . Pada nilai sudut *clearance* yang tidak memadai akan menyebabkan bor macet atau pecah karena gaya pemotongan yang terlalu tinggi pada pengeboran tulang. Sebaliknya sudut yang berlebihan dapat meningkatkan suhu bor karena *cutting lips* yang tidak cukup memadai dalam mengevakuasi material sehingga menimbulkan panas dalam lubang bor.

- *Helix dan rake angle*

Sudut *helix* adalah sudut antara *drill axis* (sumbu utama mata bor) dengan *drill land* (bagian sisi ulir), yang digunakan untuk mengevakuasi puing-puing tulang dari lubang pengeboran. Sudut ini menentukan sudut antara ulir dan sumbu bor yang disebut sudut *rake*. Sudut *rake* akan meningkat dengan bertambahnya sudut *helix*. Sudut *helix* terbagi menjadi

tiga kategori: lambat, yang berada antara sudut 12° sampai 22° , kategori umum yakni antara 28° sampai 32° dan sudut cepat 34° hingga 38° . *Helix* cepat digunakan untuk pengeboran dengan bahan lembut, *helix* umum cocok diaplikasikan ke semua jenis bahan. Sudut *helix* cepat lebih disukai peneliti dalam pengeboran tulang karena kemampuannya dapat mengeluarkan *chips* dengan lebih cepat sehingga dapat mencegah penyumbatan namun penggunaannya belum cukup optimal dalam pengaplikasiannya dalam pengeboran tulang karena kurangnya *rigidity* (kekakuan).

- *Flute*

Flute adalah alur berbentuk *helix* yang berada disekeliling bor yang berfungsi menghilangkan puing-puing tulang dari lubang bor. *Flute* yang lebih luas dan lebih dalam akan mengevakuasi lebih banyak serpihan tulang akan tetapi dapat melemahkan mata bor karena, akan menghasilkan inti *web* yang juga lebih kecil. *Web* yang lebih kecil akan memiliki kekakuan yang rendah. Dalam pengeboran tulang serpihan tulang akan bercampur dengan lemak dan darah, yang membuatnya sulit untuk dievakuasi. Oleh karenanya *flute* harus cukup lebar dan dalam untuk mengeluarkan campuran tersebut dari dalam lubang pengeboran. Jumlah *flute* dapat berpengaruh secara signifikan terhadap proses pengeboran, variasi jumlah *flute* terdiri dari satu hingga empat buah *flute*.

- Diameter

Dalam pengeboran tulang, diameter bor berada dalam kisaran antara 0,5 hingga kisaran 14 mm dapat digunakan sebagai mata bor orthopedi tergantung pada aplikasi dan jenis operasi yang dilakukan. Diameter mata bor secara signifikan mempengaruhi kinerja pengeboran tulang. Karena meningkatkan *chisel edge*, *drill flute*, and *web thickness*. Banyak studi telah melaporkan peningkatan hasil pengeboran berupa nilai tegangan normal, gaya bor, torsi, daerah osteonekrosis, serta suhu pengeboran seiring dengan bertambahnya nilai diameter bor.

- Material

Mata bor yang digunakan dalam pengeboran tulang harus dibuat dengan bahan yang tahan lama dan tidak berkarat seperti *stainless steel* atau vitallium. *Stainless steel* adalah bahan standar untuk bor bedah tetapi memiliki beberapa kerugian (generasi panas tinggi, tahan aus rendah, dan kekuatan rendah). Metode pelapisan dapat menjadi alternatif lain untuk meningkatkan kinerja mata bor. Beberapa peneliti berhasil menurunkan suhu pengeboran dengan menggunakan pelapis *Diamond Like Carbon* (DLC) partikel DLC ini memiliki keunggulan yakni bahan dari material tersebut tidak berbahaya kepada manusia.

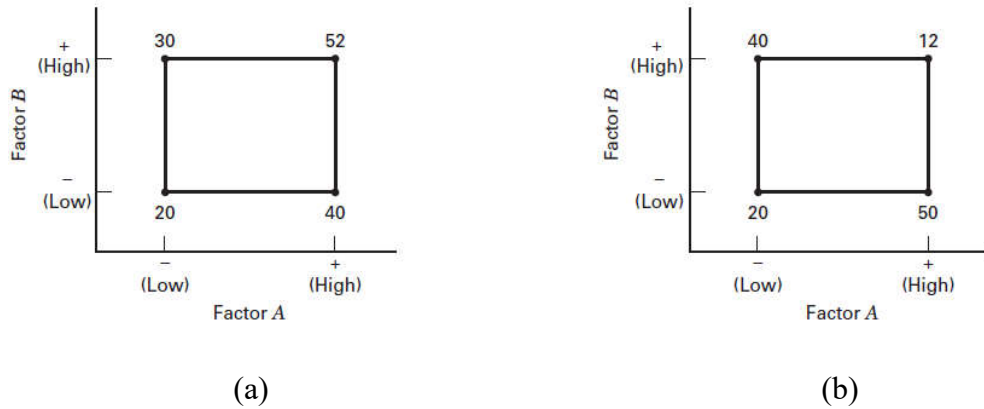
- Margin

Margin adalah tepi silinder pada ujung tepi mata bor, yang memberikan jarak antara mata bor dan lubang bor. Kesenjangan ini mencegah energi berlebihan pada gesekan yang mungkin akan terjadi.

2.4 Desain Eksperimen

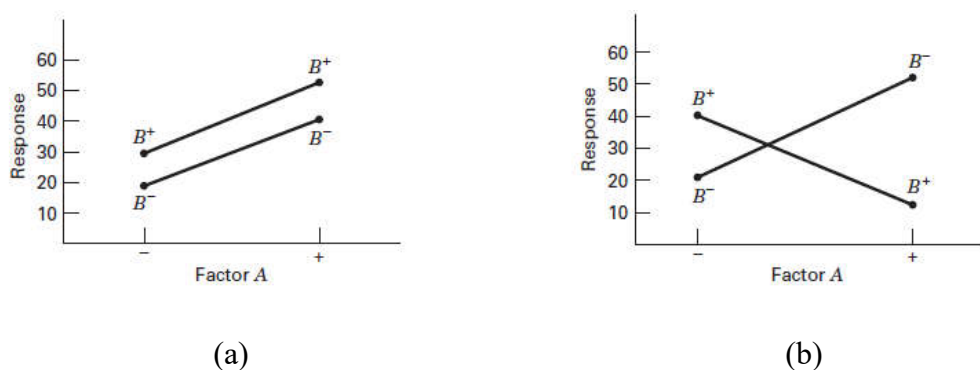
Desain Eksperimen merupakan metode yang biasa digunakan untuk meningkatkan dan memperbaiki performa suatu proses, biasanya dalam sistem kualitas. Desain eksperimen dapat didefinisikan sebagai suatu uji atau rentetan uji dengan mengubah-ubah variabel input (faktor) suatu proses sehingga dapat diketahui penyebab perubahan output (respon). Untuk melaksanakan suatu eksperimen diperlukan langkah-langkah sistematis, antara lain: mengenali permasalahan, memilih variabel level dan faktor, memilih metode desain eksperimen. Pemilihan metode eksperimen harus disesuaikan dengan permasalahan yang ada. Pada percobaan faktorial, selain dapat diketahui masing-masing pengaruh faktor, juga dapat diketahui pengaruh gabungan (interaksi) dari faktor yang dicobakan (Zaki, 2014).

Banyak percobaan melibatkan studi tentang efek dari dua faktor atau lebih. Secara umum, desain faktorial paling efisien untuk jenis eksperimen ini. Dengan desain faktorial, keseluruhan kombinasi yang mungkin terjadi dari berbagai faktor dapat diselidiki. Efek dari suatu faktor didefinisikan sebagai perubahan respons yang dihasilkan oleh suatu perubahan dalam tingkat faktor. Ini sering disebut efek utama karena mengacu faktor utama yang menarik dalam percobaan. Percobaan faktorial dua faktor dengan kedua faktor desain pada dua tingkat dapat mengilustrasikan kombinasi antar faktor yang saling mempengaruhi variabel respon seperti terlihat pada gambar berikut:



Gambar 2.6. Gambaran eksperimen faktorial 2^2 (Montgomery, 2013)

Dalam beberapa percobaan, mungkin terdapat perbedaan respon yakni antara satu faktor tidak sama pada semua tingkat faktor lainnya. Ketika ini terjadi, ada sebuah interaksi antar faktor tersebut. Seperti pada gambar 2.6.(a) jika dilihat nilai dari faktor A dan faktor B secara keseluruhan terlihat kesesuaian antara variabel tinggi dan rendah disetiap sisinya. Sedangkan pada 2.6 (b) terlihat faktor B nilai variabel tinggi yang harusnya lebih tinggi dari 50 akan tetapi berada pada posisi rendah yakni 12. Hal tersebut mengindikasikan adanya interaksi antar faktor sehingga dapat digambarkan sebagai berikut:



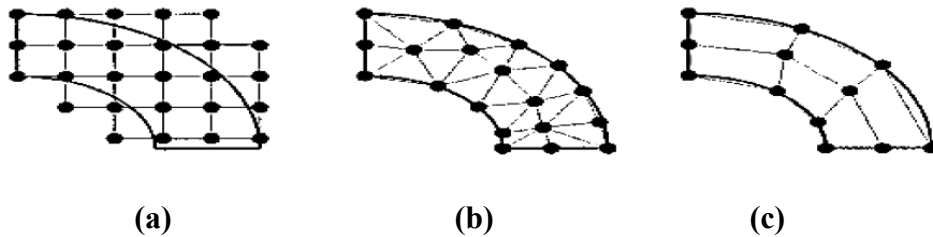
Gambar 2.7. (a) Eksperimen faktorial tanpa interaksi, (b) eksperimen faktorial dengan interaksi (Montgomery, 2013)

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan masalah matematik dari suatu gejala. Tipe masalah teknik dan matematik fisik yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non struktur. Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi: analisa tegangan/*stress*, buckling, analisa getaran. problem non struktur meliputi: perpindahan panas dan massa. mekanika fluida, distribusi dari potensial listrik. Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti persoalan pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji. Penyelesaian analisis dari suatu persamaan differensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi pemasalahan ini. (Susatio,2004).

Dengan menghitung solusi pada elemen-elemen dan selanjutnya menggabungkan keseluruhan solusi elemental, solusi total dari permasalahan diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen tentunya solusi elemen harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik noda dan antarmuka (*interface*) elemen. Dengan metode elemen hingga, solusi yang diperoleh adalah fungsi interpolasi setiap elemen.

Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik mesh.



Gambar 2.8. (a) Mesh metode perbedaan hingga (b) elemen segitiga (c) elemen segi empat (•) adalah titik mesh/*nodes* (Isworo, 2018)

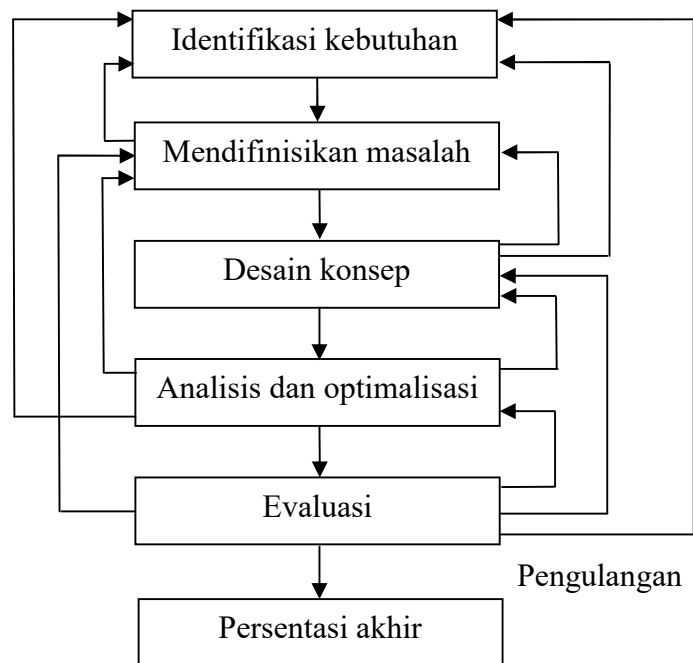
Deform 3D adalah sebuah proses simulasi yang dirancang untuk menganalisis bentuk tiga-dimensi (3D) dengan mengaplikasikan metode elemen hingga. Deform 3D dapat menjadi alat praktis dan efisien untuk memprediksi aliran material. Aplikasi yang ada pada Deform 3D meliputi: penempatan, ekstrusi, *machining*, pemadatan, *rolling*, boring. Didasarkan pada metode elemen hingga, Deform telah terbukti akurat dan kuat dalam aplikasi industri selama lebih dari dua dekade. Software ini mampu memprediksi deformasi, besar aliran bahan dan perilaku termal dengan hasil yang presisi. (Jeffrey, 2000)

2.6 Konsep Perancangan

Perancangan adalah suatu proses yang bertujuan untuk menganalisis, menilai dan memperbaiki serta menyusun suatu sistem yang paling optimal dengan memanfaatkan informasi yang diperoleh sebelumnya (Rusdi, 2017). Menurut Budynas-Nisbett pada 2008 menyebutkan bahwa perancangan adalah suatu

konsep untuk merumuskan suatu rencana dalam usaha menyelesaikan masalah dengan cara yang paling optimal. Jika pemecahan masalah harus dilakukan dengan penciptaan suatu benda yang memiliki realitas fisik maka produk harus dapat difungsikan dengan baik, aman, kompetitif, dapat digunakan dengan baik sehingga dapat diproduksi dan dipasarkan.

Proses perancangan dimulai dengan identifikasi kebutuhan serta pengambilan keputusan untuk melakukan tindakan atas identifikasi masalah yang telah dilakukan sebelumnya. Setelah itu, dilakukan kembali proses pengulangan dan revisi kembali terhadap keputusan tersebut apakah telah sesuai dengan yang telah dirumuskan sebelumnya.



Gambar 2.9. Diagram proses perancangan

Pendefinisian masalah dilakukan secara spesifik terhadap keseluruhan objek yang akan dirancang. Pendefinisian ini dapat melingkupi karakteristik, dimensi, dan batasan terhadap objek yang akan dibuat. Karakteristik serta batasan dapat mencakup kecepatan, batasan suhu, variabel dimensi ataupun berat objek. Setelah keseluruhan informasi tentang objek yang akan dibuat dianggap cukup, maka tahap selanjutnya adalah menggabungkan keseluruhan informasi tersebut kedalam suatu bentuk nyata keseluruhan konsep yang dianggap dapat mewakili solusi terhadap permasalahan yang telah didefinisikan sebelumnya yang disebut dengan desain konsep. Saat keseluruhan informasi terhadap konsep telah terpenuhi dan dianggap lengkap tahap selanjutnya adalah penyempurnaan dalam skema analisis dan optimalisasi untuk menilai keseluruhan sistem sudah bekerja dengan baik atau tidak. Jika dirasa belum memuaskan skema sebelumnya dapat direvisi, ditingkatkan, atau diabaikan.

Dalam diagram proses perancangan terlihat bahwa proses perancangan adalah proses yang berulang dimana terdapat banyak tahapan yang harus terus dievaluasi untuk kemudian dapat melangkah pada fase sebelumnya atau mundur dan mengulang kembali guna mendapatkan bentuk ataupun sistem optimal terhadap desain yang ingin dibuat. Tahapan evaluasi merupakan fase signifikan untuk menentukan keberhasilan suatu desain karena melibatkan prototipe dengan berbagai bentuk pengujian untuk mengetahui apakah produk dapat memenuhi seluruh aspek yang diinginkan seperti kehandalan, nilai ekonomis, pemeliharaan, suku cadang dll.

Pada tahap akhir perancangan, proses persentasi akhir menjadi penting untuk meyakinkan kepada konsumen apakah solusi yang dibuat oleh perancang dapat diterima utamanya dari segi penjualan. Karena persentasi akhir adalah pekerjaan menjual, jika perancang tidak mampu menjelaskan keunggulan atau solusi baru yang ditawarkan tidak lebih baik dari yang telah ada sebelumnya maka upaya yang dihabiskan untuk merancang akan terbuang sia-sia.

2.7 Konsep Pengambilan Keputusan

Penggunaan metode SAW (*Simple Additive Weighting*) merupakan konsep dimana pengambilan keputusan didasarkan pada alternatif terbaik dari sejumlah alternatif berdasarkan bobot penelitian yang sudah ditentukan. Konsep pengambilan keputusan ini merupakan metode untuk membantu dalam tahap pengambilan keputusan dengan melakukan pendekatan sistematis terhadap permasalahan yang ada melalui proses pengumpulan data serta informasi dengan mempertimbangkan faktor-faktor penilaian tertentu saat pengambilan keputusan. Untuk menjalankan proses penilaian dengan beberapa kriteria, dibutuhkan suatu sistem penilaian yang efektif untuk mendapatkan keputusan yang paling tepat dengan melakukan evaluasi terhadap masing-masing solusi sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan. Langkah pertama yang dapat dilakukan untuk melakukan penilaian ini adalah dengan membuat matriks keputusan X , seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.1)$$

Selanjutnya membuat normalisasi matriks keputusan menggunakan persamaan 2.2 sebagai berikut :

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\text{Max } x_{ij}} & \text{jika } j \text{ adalah atribut keuntungan} \\ \frac{i}{\text{Max } x_{ij}} & \dots\dots\dots(2.2) \\ \frac{i}{x_{ij}} & \text{jika } j \text{ adalah atribut biaya (cost)} \end{cases}$$

Dari hasil normalisasi tersebut kemudian akan dikali dengan bobot masing-masing kriteria yang telah ditetapkan untuk mendapatkan matriks keputusan akhir penelitian, yakni mendapatkan alternatif solusi yang paling mendekati permasalahan yang ada.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dimulai dari bulan Januari 2022 hingga September 2022. Adapun tempat penelitian berada di Laboratorium CNC Universitas Lampung.

3.2 Perangkat Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua buah perangkat komputer. Adapun *software* yang digunakan pada masing-masing komputer dalam proses pembuatan desain mata bor adalah Autodesk Inventor 2015, sedangkan untuk proses simulasi digunakan perangkat lunak DEFORM-3D. Untuk selanjutnya menggunakan *software* Minitab 17 sebagai alat bantu dalam analisis data.

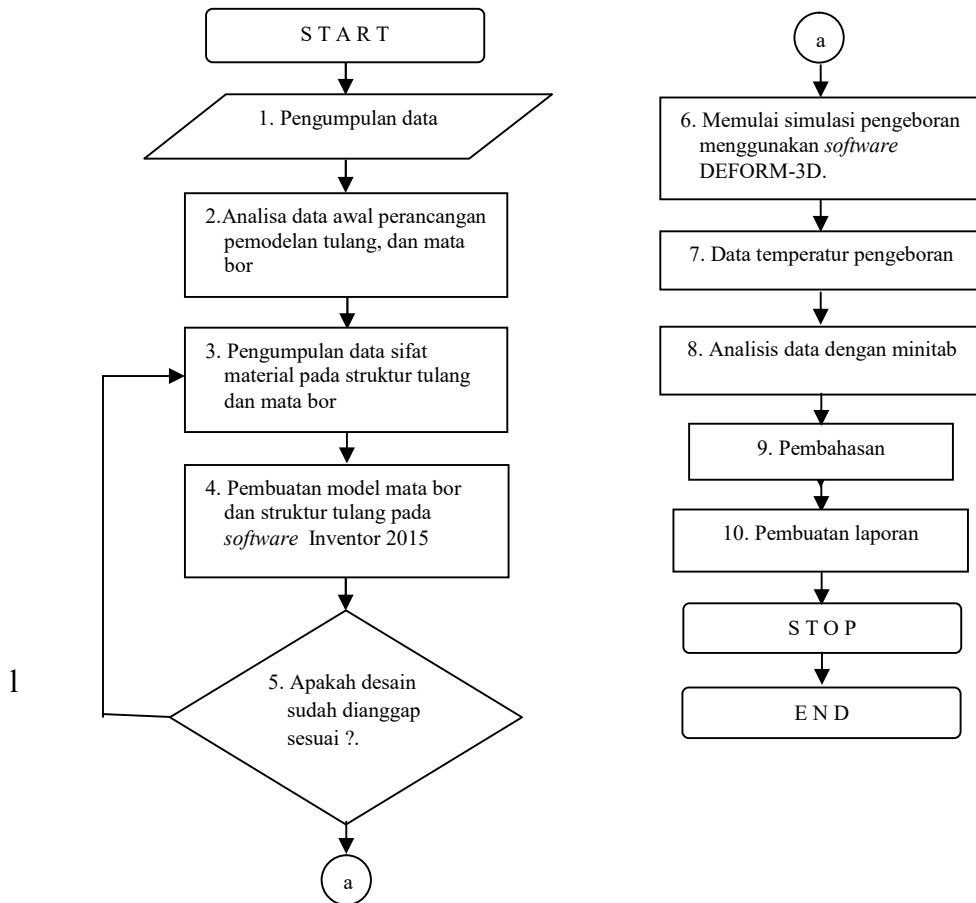
3.3 Tahapan Awal Penelitian

3.3.1 Pengumpulan Literatur

Pada bagian ini dilakukan pencarian sebanyak mungkin literatur yang dapat dijadikan rujukan dalam pengerjaan tugas akhir ini, literatur yang dimaksud meliputi dokumen cetak, artikel, jurnal, gambar maupun video yang berkaitan erat dengan tema tugas akhir.

3.3.2 Perumusan Diagram Alir

Berikut merupakan gambar diagram alir perancangan simulasi pengeboran tulang pada *software* DEFORM 3D.

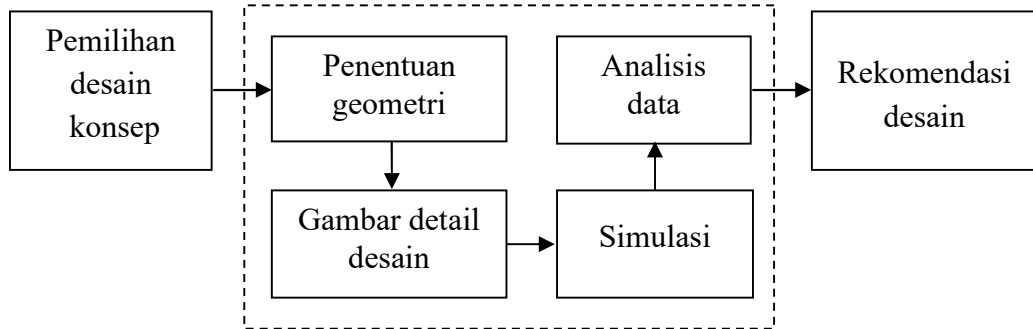


Gambar 3.1. Diagram alir kegiatan penelitian

3.4 Metodologi Desain

Untuk melakukan analisis terhadap beberapa desain konsep yang telah dipilih kemudian diperlukan langkah-langkah guna meminimalisir waktu, biaya, serta bentuk desain yang paling optimal. Pengoptimalisasian dapat dilakukan

dengan cara memperbaiki bentuk desain dengan mengacu pada parameter desain konsep.



Gambar 3.2. Metodologi desain

Gambar 3.2 adalah bagan yang menjelaskan proses pembuatan desain bor orthopedi, mulai dari pemilihan desain konsep hingga dihasilkan rekomendasi desain sebagai bagian akhir dari proses penelitian. Dikarenakan pada penelitian ini tidak terdapat proses pembuatan produk maka pembahasannya akan berfokus pada proses pembuatan desain, simulasi pengeboran, analisis data kenaikan temperatur, dan juga optimalisasi desain menggunakan beberapa perangkat lunak yang telah ditentukan.

3.5 Perancangan Pemodelan Tulang dan Mata Bor

Pada tahap ini informasi yang dibutuhkan untuk membuat model tulang dan mata bor telah dikumpulkan sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan terhadap desain produk yang akan dihasilkan.

3.5.1 Analisa Kebutuhan

Ortopedi merupakan cabang ilmu kedokteran yang mempelajari, mendiagnosis dan melakukan pengobatan bagi gangguan muskuloskeletal (otot, tulang belakang, tulang, dan sendi). Dalam praktiknya dokter ortopedi biasanya dibantu berbagai macam peralatan dalam proses pembedahan. Salah satu instrumen yang digunakan dalam proses pembedahan tersebut adalah *surgical drill* yang berfungsi untuk membuat lubang di dalam tulang sebagai tempat menempel pin, pelat, atau skrup.

3.5.2 Penjelasan Mengenali *Surgical Drill*

Dari berbagai penjelasan yang telah ada sebelumnya diketahui bahwa *surgical drill* digunakan sebagai alat bantu untuk melakukan proses pembedahan utamanya dalam pengeboran tulang. Dalam penggunaannya terdapat dua jenis penggerak yang umum digunakan dalam proses operasi ortopedi, yaitu *electric surgical drills* yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga utama penggerak baik menggunakan instalasi listrik langsung ataupun dengan menggunakan baterai, yang kedua adalah *pneumatik surgical drill* yang menggunakan udara berkompresi untuk menggerakkan mata bor.

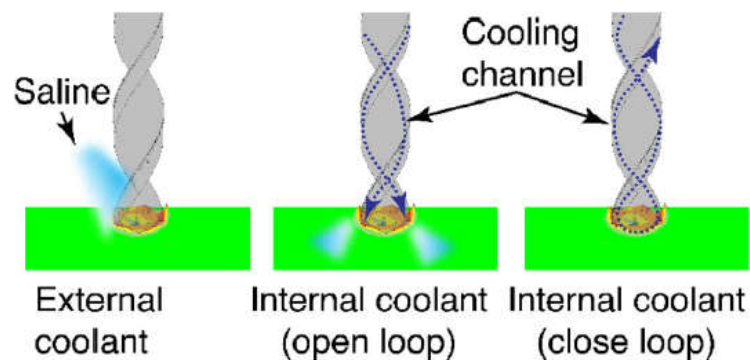
Dalam proses pembedahan terdapat suatu proses yang berpengaruh pula terhadap kenaikan temperatur pengeboran salah satunya adalah jenis pendingin yang digunakan, misalnya menggunakan cairan pendingin atau udara bertekanan. Dalam sistem pendingin internal, cairan

pendingin atau udara bertekanan mengalir melalui saluran di dalam poros mata bor. Terdapat dua tipe sistem pendingin internal yaitu tipe terbuka dan tertutup. Untuk jenis pendinginan tertutup berarti bahwa aliran fluida sampai pada ujung mata bor dan kembali lagi ke wadah pendingin sehingga tidak terjadi kontak antara pendingin dan tulang.



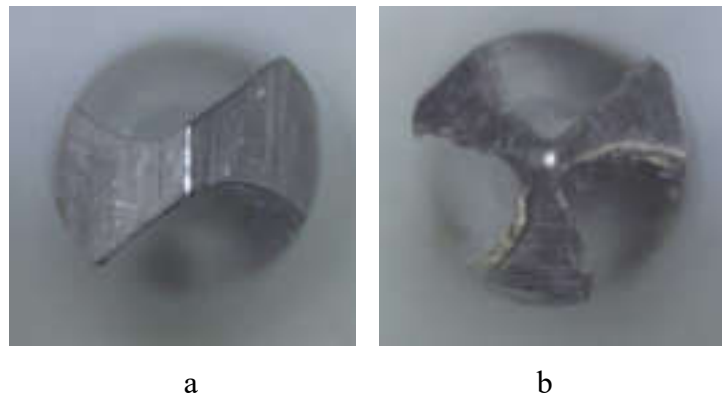
Gambar 3.3. Jenis mata bor tipe pendinginan tertutup
(Bruketa, et al., 2019)

Sedangkan jenis pendinginan terbuka berarti bahwa pendinginan mengalir melalui saluran, hingga keluar ke ujung mata bor dan menyentuh tulang. Untuk pendinginan eksternal proses pendinginan diterapkan pada permukaan mata bor dan tulang.



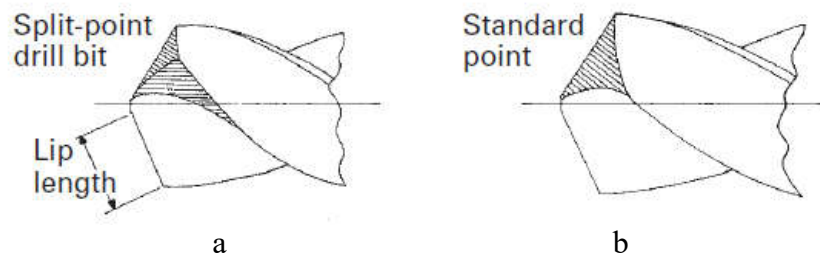
Gambar 3.4. Sistem pendinginan pada proses pengeboran
(Ali Akbar and Wani Sulong, 2020)

Kemudian terdapat pula perbedaan dari segi geometri mata bor, yakni dari segi alur. Alur sendiri keberadaannya berputar disekeliling mata bor yang berfungsi untuk memberikan jalan keluar bagi material yang sudah tidak terpakai untuk keluar dari lubang. Jika tidak ada alur maka mata bor tidak dapat memotong dengan cepat sebagaimana jika terdapat alur didalamnya. Terdapat dua jenis alur yang biasa digunakan dalam proses pengeboran tulang yakni beralur dua (*two flute*) dan beralur tiga (*three flute*) seperti terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5. a. *Two flute* b. *Three flute*
(Hoeller Christian., 2015)

Selain itu untuk mengurangi peningkatan panas yang berasal dari gesekan antar mata bor dan tulang, terdapat hal penting yang harus diperhatikan pula yakni pemilihan desain pada bagian sisi/*flank* mata bor. Terdapat dua jenis bagian *flank* yang biasa digunakan yakni mata bor dengan peningkatan sudut *clearance* di permukaan mata bor yang disebut dengan *split*. Atau dengan mata bor standar yakni tanpa peningkatan sudut *clearance* (tanpa *split*).



Gambar 3.6. a. Mata bor dengan titik split b. Mata bor standar
(Natali et al., 1996)

3.6 Konseptual Desain

Pada fase ini beberapa konsep desain produk mulai dikembangkan dengan berbekal informasi yang telah dikumpulkan sebelumnya, tentang analisis kebutuhan serta batasan untuk kemudian dituangkan kedalam berbagai macam bentuk solusi.

3.6.1 Konsep Solusi

Konsep solusi dikembangkan berdasarkan berbagai pilihan-pilihan terhadap kemungkinan bentuk serta berbagai macam alternatif desain yang memungkinkan untuk menjadi solusi terhadap kebutuhan. Sesuai dengan tujuan penelitian yakni menyelidiki bentuk desain optimal dengan mempertimbangkan peningkatan suhu seminimal mungkin. Terdapat beberapa alternatif konsep solusi yang dapat digunakan tertuang pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.1 Konsep solusi

No.	Fungsi	Alternatif Desain		
1	Pendinginan	Internal tipe terbuka	Internal tipe tertutup	Eksternal
2	Jenis Alur	beralur dua (<i>two flute</i>)	beralur tiga (<i>three flute</i>)	
3	Desain sisi/ <i>Flank</i>	Mata bor dengan <i>split</i>	Mata bor standar	

Tabel 3.1 merupakan gabungan dari kumpulan berbagai alternatif solusi yang mungkin akan digunakan. Pada fungsi pendinginan terdapat tiga alternatif yang dapat digunakan, perbedaan yang mencolok antara ketiga konsep tersebut adalah adanya lubang pada mata bor yang akan dibuat. Konsep ini khusus pada pendinginan internal dimana yang membedakan hannya, jika pada tipe terbuka lubang akan tembus hingga ujung mata bor sedangkan untuk tipe tertutup lubang hanya berfungsi sebagai tempat sirkulasi bagi pendingin dan tidak tembus hingga ujung mata bor. Berbeda dengan tipe eksternal yang mengandalkan pendinginan dari udara luar sehingga tidak memerlukan lubang. Sedangkan untuk alur dapat disesuaikan dengan penggunaan alur berjumlah dua maupun tiga. Untuk bagian sisi dapat mempertimbangkan penggunaan sisi standar ataupun dengan *split* (peningkatan sudut *clearance*). Berdasarkan uraian di atas kemudian terbentuk beberapa konsep alternatif solusi antara lain sebagai berikut :

- Konsep 1



Gambar 3.7. Konsep 1
(Bruketa, et al., 2019)

Gambar 3.7 merupakan gabungan beberapa konsep yakni pendinginan tipe internal terbuka dengan alur berjumlah dua serta desain sisi/*flank* standar. Keunggulan dari konsep ini adalah penggunaan cairan pendingin dapat diaplikasikan pada proses pengeboran tulang sehingga kenaikan suhu dapat ditekan, namun penggunaan pendingin pada prosesnya akan meningkatkan biaya pembuatan baik dari segi pembuatan mata bor ataupun keseluruhan biaya pada perakitan keseluruhan peralatan.

- Konsep 2



Gambar 3.8. Konsep 2
(Hoeller Christian., 2015)

Konsep 2 mewakili gabungan dari desain pendinginan tipe eksternal dengan jumlah alur tiga dengan sisi/*flank* bertipe standar. Dalam

beberapa penelitian yang dilakukan seperti dikutip dari laporan Hoeller Christian pada 2015 dikatakan bahwa desain alur tiga memiliki keunggulan pada akurasi saat pengeboran karena ujungnya yang lancip memungkinkan mata bor lebih tepat sasaran juga mengurangi resiko pergeseran atau penyimpangan arah yang mungkin terjadi saat pengeboran berlangsung. Namun dari sisi temperatur pengeboran belum ada perbedaan yang cukup signifikan dari penggunaan desain mata bor beralur dua dan beralur tiga.

- Konsep 3

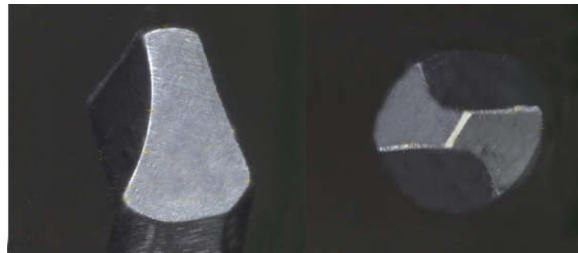


Gambar 3.9. Konsep 3

Konsep 3 menggambarkan gabungan dari alternatif pendinginan tipe eksternal dengan jumlah alur dua (*two flute*) dan desain sisi/*flank* bertipe *split*. Menurut jurnal yang ditulis oleh Colin Natali pada 1996 sisi/*flank* pada mata bor merepresentasikan luas area yang memungkinkan terjadi gesekan sehingga dapat membangkitkan panas, untuk itu perlu mengurangi kontak dengan peningkatan *clearance angle* sepanjang permukaan. Sehingga memungkinkan mata bor untuk menurunkan pembangkitan panas berlebih. Menurut

Mohd Faizal pada 2020 belum ada nilai pasti berapa derajat optimal untuk penentuan *clearance angle* tetapi dari beberapa penelitian yang telah dilakukan beberapa menyarankan nilai antara 12-15° hingga 18-24°

- Konsep 4



Gambar 3.10. Konsep 4
(Hoeller Christian., 2015)

Gambar 3.10 mencerminkan gabungan dari beberapa konsep desain yakni pendinginan tipe eksternal, jumlah alur dua dan tipe sisi standar. Konsep ini umum diterapkan pada desain mata bor karena desainnya yang sederhana, serta kemampuan untuk mengurangi pembangkitan panas yang cukup baik.

3.7 Perancangan Eksperimen dan Pengumpulan Data

Perancangan eksperimen dapat diartikan sebagai serangkaian percobaan terencana yang dilakukan guna mendapatkan informasi sebanyak-banyaknya dalam membantu memecahkan persoalan penelitian. Dalam pelaksanaan desain penelitian dapat dibuat sesederhana mungkin sehingga dapat

menghemat waktu, biaya serta bahan baku. Eksperimen penelitian dapat melibatkan dua atau lebih faktor yang saling berkaitan. Desain faktorial dapat digunakan untuk menyelidiki hasil dari keseluruhan kemungkinan penelitian pada level serta kombinasi keseluruhan faktor yang diselidiki. Penggunaan desain faktorial memiliki kelebihan antara lain dapat lebih efisien dalam pengelolaan data yang ada, hasil lebih lengkap yakni berupa informasi mengenai pengaruh utama juga pengaruh interaksi, selain itu terdapat data mengenai kombinasi antar faktor.

Percobaan dengan menggunakan desain faktorial umumnya mempunyai beberapa fungsi yakni mengukur pengaruh variabel, menentukan variabel yang paling berpengaruh, serta mengukur interaksi antar variabel keseluruhan terhadap hasil yang didapat. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi percobaan dengan rincian terdapat 5 level *point angle* yakni 87° , 105° , 118° , 120° dan 130° . Terdapat 4 level *helix angle* yaitu 13° , 20° , 28° dan 30° dengan 20 *run*. Selain itu akan dilakukan pengulangan sebanyak 2 kali setiap percobaan, sehingga total keseluruhan simulasi adalah 40 kali percobaan.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini parameter optimal geometri mata bor berada pada nilai *point angle* 130° dan *helix angle* 13° dengan temperatur terendah sebesar 38.767° C .
2. Pada batasan *point angle* 87° - 130° dan *helix angle* 13° - 30° temperatur pengeboran dapat dihitung menggunakan persamaan: $87.85 - 0.3790 * \textit{point angle} - 1.678 * \textit{helix angle} + 0.01302 \textit{point angle} * \textit{helix angle}$.
3. Variabel geometri yang paling berpengaruh terhadap kenaikan temperatur pengeboran adalah interaksi antara nilai *point angle* dan *helix angle*.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat menambahkan acuan parameter lain berupa nilai gaya dan torsi selama pengeboran.

2. Dapat dilakukan simulasi dengan mempertimbangkan variabel lain seperti kondisi pemotongan, material mata bor, dan kondisi pendinginan.
3. Menyempurnakan kembali sifat material tulang yang telah ada sebelumnya untuk meningkatkan keakuratan pada saat melakukan simulasi pada DEFORM-3D.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Hermanto dkk. 2016. *Peluang dan Tantangan Aplikasi Baut Tulang Mampu Terdegradasi Berbasis Logam Magnesium*. Dinamika Teknik Mesin, Vol. 6.
- Alam, Khurshid. Khan Mushtaq dan Silberschmidt V. 2013. *3D Finite-Element Modelling of Drilling Cortical Bone Temperature Analysis*. Journal of Medical and Biological Engineering.
- Bruketa et al. 2019. Pilot Study: *Internally Cooled Orthopedic Drills-Standard Sterilization Is Not Enough*. Acta Clin Croat, 58:379-385.
- Douglas C. Montgomery. 2013. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & son, Inc: United States.
- Eriksson A.R, dan Albrektsson T. 1983. *Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: A vital-microscopic study in the rabbit*. Journal of Prosthetic Dentistry.
- Ghai, aman. 2014. *Experimental Investigation in Bone Drilling Using Different Types of Tools*: Thapar University, Patiala.
- Hendra, 2005. *Pengaruh Kondisi Pemotongan Pahat Gurdi terhadap keausan pahat*: Jakarta.
- Holler W Christian. 2015. *Technical and Economic Analysis of the Process of Surgical Bone Drilling and Improvement Potentials*. Graz University of Technology: Austria.
- Isworo, hajar. 2018. *Buku Ajar Metode Elemen Hingga*. Universitas Lambung Mangkurat: Banjarmasin.

- Jacob. C. H et al. 1976. *A Study of The Bone Machining Process-Drilling*. J. *Biomechanics*. Pergamon press: Britain.
- Jeffery Fluhrer. 2000. *Deform Desain Environment for Forming*. Scientific Forming Technologies Corporation. Columbus Ohio.
- JuEun Lee et al. 2018. *Parameters Affecting Mechanical and Thermal Responses in Bone Drilling*. *Journal of Biomechanics*.
- Li Xiashuang, Zhu Wei, dkk. 2016. *Optimization Of Bone Drilling Process Based On Finite Element Analysis*: Beihang University, Beijing China.
- Mahdy Arafat, Amir Essam. 2016. *Investigation on The Effect of Drill Diameter During Bone Drilling for Surgery Application*; Universiti Teknologi Pertonas. Bandar Sri Begawan.
- Mahfudz Al Huda, 2008. *Modul Kuliah Proses Produksi*. Universitas Mercubuana: Jakarta.
- Mahyudin, 2018. *Graf Tulang dan Material Pengganti Tulang Karakteristik dan Strategi Aplikasi Klinis*. Airlangga University Press: Surabaya.
- Moh Faizal Ali Akhbar dan Ahmad Razlan Yusoff. 2018. *Drilling Of Bone: Effect Of Drill Bit Geometri On Thermal Osteonecrosis Risk Region*. *Journal of Engineering in Medicine*.
- Moh Faizal Ali Akhbar dan Ahmad Razlan Yusoff. 2019. *Multi-Objective Optimization Of Surgical Drill Bit To Minimize Thermal Damage In Bone-Drilling*. *Thermal Engineering*, Elsevier.
- Moh Faizal Ali Akhbar dan Akmal Wani Sulong. 2020. *Surgical Drill Bit Designand Thermomechanical Damage in Bone Drilling*. *Annals of Biomedical Engineering*.
- Natali et al. 1996. *Orthopedic Bone Drills-Can They Be Improved*. Broomfield Hospital, England.

- Pandey, R.K. and Panda, S.S. 2013. *Drilling of Bone: A comprehensive review*, *Journal of Chlinical Orthopaedics and Trauma* 4, 15-30.
- Risidi Ayip, Ginta Turnad Lenggo, Majdi Ahmad. 2017. *Optimalization Of Bone Drilling Parameters Using Taguchi Method Based On Finite Element Analysis*. Science and Technology International Conference.
- Rochim, Taufiq. 1993. *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*. ITB. Bandung. Jawa Barat.
- Ropyanto, C.B.,dkk. 2013. *Analisis Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Status Fungsional Paska Open Reduction Internal (ORIF) Fraktur Ekstremitas*. Jurnal Keperawatan Medikal Bedah.
- Rusnaldy, Prahasto, Toni, Prasetyo Lis dkk. 2017. *Studi Pengaruh Parameter Proses Drilling pada Tulang terhadap Temperatur dan Kualitas Lubang yang Dihasilkan*: Prosiding SNTTM XVI, hal 11-14.
- S. Saha et al. 1982. *Surgical Drilling: Design and Performance of an Improved Drill*. Departement of Orthopaedic Surgery. Shreveport La.
- Schey. 1983. *Introduction to Manufacturing Process*. 3rd ed.Mc Graw-Hill,Education.
- Sean R.H. Davidson. 1999. *Heat Transfer in Bone During Drilling*. Institute of Biomaterials and Biomedical Engineering. Toronto.
- Sui Jianbo, Wang, Chengyong, Sugita Naohiko. 2020. *Experimental study of temperature rise during bone drilling process*: Medical Engineering and Physics, Elsevier.
- Susatio, Yerri. 2004. *Dasar-dasar Metode Elemen Hingga*. Andi Offset. Yogyakarta.
- T.Duckworth, C.M. Blundell. 2010. *Orthopaedics and Fractures*. Blackwell's publishing. UK.

Wiggins K.L and Malkin S. 1976. *Drilling of Bone: J.Biomechanics Vol. 9. pp. 553-559.* Britain.

Yali Hou et. al. 2015. *An Experimental research on Bone Drilling Temperature in Orthopedic Surgery.* School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University. China.

Zaki Akhmad, Wulandari Triastuti, Suparti. 2014. *Analisis Varian Percobaan Faktorial Dua Faktor RAKL Dengan Metode Fixed Additive Main Effects And Multiplicative Interaction.* Jurnal gaussian Volume 3 Hal 529-536.