

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN TERHADAP KEPRESISIAN
GEOMETRI BAUT ULIR KORTIKAL MATERIAL Ti-6Al-4V ELI
MENGUNAKAN METODE *GREY RELATIONAL ANALYSIS***

(Skripsi)

Oleh

MUHAMMAD YAHYA

(1715021007)



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

**OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN TERHADAP KEPRESISIAN
GEOMETRI BAUT ULIR KORTIKAL MATERIAL Ti-6Al-4V ELI
MENGUNAKAN METODE *GREY RELATIONAL ANALYSIS***

Oleh

MUHAMMAD YAHYA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN TERHADAP KEPRESISIAN GEOMETRI BAUT ULIR KORTIKAL MATERIAL Ti-6Al-4V ELI MENGUNAKAN METODE *GREY RELATIONAL ANALYSIS*

Oleh

Muhammad Yahya

Titanium adalah bahan yang banyak digunakan dalam industri, penerbangan, biomedis, elektronik, dan benda mikroskopis lainnya. Pada bidang biomedis, bahan paduan titanium Ti-6Al-4V ELI telah digunakan dalam aplikasi ortopedi karena memiliki biokompatibilitas yang baik untuk implan tulang. Penelitian ini bertujuan untuk mencari kondisi pemotongan yang optimal terhadap kepresisian geometri baut ulir kortikal *with shallow thread* (HA) yang mengacu kepada standar ISO 5835. Penelitian ini menggunakan pemesian bubut CNC dengan parameter pemesian yang digunakan adalah putaran *spindle* 100, 200, dan 300 rpm, *depth of cut* sebesar 0,01, 0,02, dan 0,03 mm, dan pelumas yang digunakan adalah minyak sintetis, *virgin palm oil*, dan *virgin coconut oil*. Pengolahan data pada penelitian ini menggunakan Metode *Grey Relational Analysis*. Berdasarkan perhitungan Metode *Grey Relational Analysis* didapatkan kombinasi kondisi pemotongan optimal pada putaran *spindle* 100 rpm, *depth of cut* 0,01 mm, dan pelumas berjenis *virgin coconut oil*. Faktor yang berpengaruh signifikan yaitu *depth of cut* dengan persentase kontribusi sebesar 98%.

Kata kunci: *Grey Relational Analysis*, ulir kortikal, implan tulang, Ti-6Al-4V ELI

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS TO THE PRECISION OF THE CORTICAL THREAD BOLT GEOMETRY OF TI-6Al-4V ELI MATERIAL USING THE GRAY RELATIONAL ANALYSIS METHOD

By

Muhammad Yahya

Titanium is a material widely used in industry, aviation, biomedical, electronics, and other microscopic objects. In the biomedical field, titanium alloy material Ti-6Al-4V ELI has been used in orthopedic applications because it has good biocompatibility for bone implants. This study aims to find optimal cutting conditions for the precision of cortical thread bolt geometry with shallow thread (HA) which refers to the ISO 5835 standard. This study used CNC lathe machining with the machining parameters used were spindle rotations of 100, 200, and 300 rpm, depth of cut of 0.01, 0.02, and 0.03 mm, and the lubricants used were synthetic oil, virgin palm oil, and virgin coconut oil. Data processing in this study uses the Gray Relational Analysis Method. Based on the calculations of the Grey Relational Analysis Method, a combination of optimal cutting conditions at a spindle rotation of 100 rpm, depth of cut of 0.01 mm, and virgin coconut oil type lubricants were obtained. A significant influential factor is the depth of cut with a contribution percentage of 98%.

Keywords: Grey Relational Analysis, cortical thread, bone implant, Ti-6Al-4V ELI

Judul Skripsi : **OPTIMASI PARAMETER PEMESINAN
TERHADAP KEPRESISIAN GEOMETRI BAUT
ULIR KORTIKAL MATERIAL Ti-6Al-4V ELI
MENGUNAKAN METODE GREY
RELATIONAL ANALYSIS**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Yahya**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1715021007**

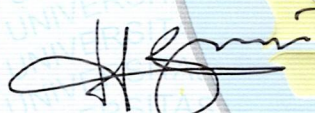
Jurusan : **Teknik Mesin**

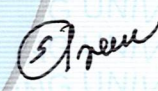
Fakultas : **Teknik**



Komisi Pembimbing 1

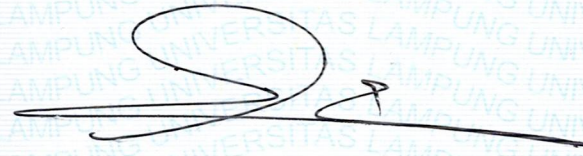
Komisi Pembimbing 2

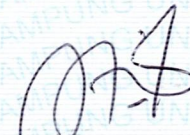

Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19710817 199802 1 003


Ir. Arinal Hamni, M.T.
NIP 19641228 199603 2 001

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

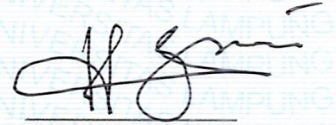

Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP 19710331 199903 1 003


Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP 19701104 199703 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

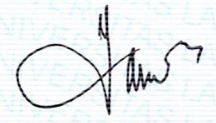
Ketua Penguji : Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 11 Agustus 2022

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

DENGAN INI SAYA MENYATAKAN BAHWA SKRIPSI INI SAYA BUAT DENGAN USAHA SAYA SENDIRI DAN BUKAN HASIL DARI PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN KEPUTUSAN REKTOR NO. 13 TAHUN 2019.

Bandar Lampung, 11 Agustus 2022

Penulis,



Muhammad Yahya

NPM. 1715021007

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di suatu Desa yang bernama Tunas Jaya, Kecamatan Gunung Agung, Kabupaten Tulang Bawang Barat, Lampung pada tanggal 25 Februari 1999 sebagai anak pertama dari 4 bersaudara dari pasangan Bapak Ujang Sudarman dan Ibu Lasmini.

Penulis mengawali pendidikan formal di Sekolah Dasar (SD) SDN 3 Tunas Jaya pada tahun 2005 dan selesai pada tahun 2011, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 5 Kota Jambi yang selesai pada tahun 2014, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 4 Kota Jambi yang selesai pada tahun 2017.

Penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada tahun 2017. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Tematik pada Januari-Februari 2021 di Kecamatan Gunung Agung tepatnya di Desa Tunas Jaya, Kabupaten Tulang Bawang Barat, Lampung. Penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) pada tahun 2020 di PT. Tri Citra Perdana, Jl. Raya Trimurjo, Lampung, dengan judul “Analisa Kerusakan *Sprocket* Pada As Dinamo Penggerak *Mixer* Mesin *Asphalt Mixing Plant Linnhoff* CMX 1500 di PT TRI CITRA PERDANA”. Penulis melakukan penelitian skripsi pada tahun 2021 dengan judul “Optimasi Parameter Pemesinan Terhadap Kepresisian Geometri Baut Ulir Kortikal Material Ti-6Al-4V ELI Menggunakan Metode *Grey Relational Analysis*” di bawah bimbingan Bapak Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M. T., Ph.D. dan Ibu Ir. Arinal Hamni, M. T.

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Penulis terdaftar sebagai anggota muda HIMATEM pada tahun 2017, anggota Divisi Hubungan Masyarakat HIMATEM pada tahun 2018-2019, anggota Divisi Hubungan Masyarakat HIMATEM pada tahun 2019-2020, dan ikut berperan aktif dalam setiap kegiatan yang dilaksanakan oleh pihak jurusan.

MOTTO HIDUP

“Allah tidak akan menguji hamba-Nya di luar batas kemampuannya”

(Q.S Al-Baqarah: 286)

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S Al-Insyirah: 4-5)

“Jika Allah menolong kamu, maka tidak ada yang dapat mengalahkanmu”

(Q.S Ali ‘Imran: 60)

“Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan?”

(Q.S Ar-Rahman: 13)

“Ingatlah hanya dengan mengingat Allah hati menjadi tentram”

(Q.S Ar-Ra’d: 28)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kepada ALLAH SWT karena berkat rahmat dan hidayahnya penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dan menyelesaikan laporan skripsi dengan lancar. Shalawat serta salam tak lupa penulis sanjungkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun kita menuju kehidupan yang berilmu dan berakhlak. Skripsi ini dibuat sebagai sebuah karya tulis hasil dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan. Penulis berharap karya tulis ini dapat menjadi perkembangan ilmu dalam bidang mekanikal dan kesehatan. Skripsi ini juga menjadi salah satu syarat mencapai gelar sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Penulis berharap karya tulis ini dapat bermanfaat dan dapat dikembangkan lebih lanjut.

Selesainya skripsi ini tidak luput dari bimbingan, arahan dan dukungan dari semua pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak Ujang Sudarman dan Ibu Lasmini yang selalu mendukung dan mendoakan sehingga penulis mempunyai semangat lebih untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
3. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Ibu Novri Tanti, S.T., M.T. selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Bapak Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang selalu bersedia membimbing penulis dan meluangkan waktu dalam penyusunan skripsi ini.
6. Ir. Arinal Hamni, M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang selalu bersedia membimbing penulis dan meluangkan waktu dalam penyusunan skripsi ini.
7. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T., selaku Dosen Penguji dalam skripsi ini. Terimakasih atas masukan dan saran pada seminar proposal, seminar hasil, dan ujian skripsi terdahulu.
8. Seluruh Dosen di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan pengetahuan.
9. Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian skripsi ini.
10. Keluarga yang selalu mengingatkan dan menyemangati dalam proses pengerjaan skripsi ini.
11. Kurnia Agung Laksono sebagai rekan dalam melakukan penelitian skripsi ini.
12. Teman-teman satu angkatan Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
13. Semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak bisa disebutkan satu-persatu, penulis mengucapkan banyak terimakasih.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini terdapat kekurangan, oleh karena itu penulis berharap masukan dan saran dari semua pihak untuk menyempurnakan karya tulis ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca secara umum.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 1 Agustus 2022

Penulis

Muhammad Yahya

NPM. 1715021007

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
 I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Hipotesis	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Sistematika Penulisan	5
 II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Proses Pemesinan	7
2.2. Mesin Bubut.....	9
2.3. Pembubutan Ulir.....	17
2.4. Pahat Ulir.....	19
2.5. Kepresisian ulir.....	20
2.6. Paduan Titanium.....	23
2.7. Pemesinan Titanium.....	25
2.8. Baut Ulir Tulang.....	27
2.9. Geometri Baut Ulir Tulang	32
2.10. Hubungan Metode Taguchi dan Metode <i>Grey Relational Analysis</i>	34
2.11. Metode Taguchi.....	35
2.12. Karakteristik Kualitas dan <i>Signal to Noise Ratio</i>	35
2.13. <i>Orthogonal Array</i>	36
2.14. <i>Grey Relational Analysis (GRA)</i>	38

2.15. <i>Analysis of Varians</i> (ANOVA).....	41
2.16. <i>P-value</i>	43
III. METODE PENELITIAN	
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	44
3.2. Bahan dan Perangkat Penelitian	45
3.3. Desain Parameter Pemesinan.....	50
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	52
3.5. Prosedur Penelitian.....	53
3.6. Optimasi Multi-respon <i>Grey Relational Analysis</i>	56
IV. PEMBAHASAN	
4.1. Data	58
4.2. Nilai <i>SN Ratio</i>	61
4.3. Normalisasi <i>SN Ratio</i>	62
4.4. <i>Deviation Sequence</i>	63
4.5. <i>Grey Relational Coefficient</i>	64
4.6. <i>Grey Relational Grade</i>	65
4.7. Pembahasan.....	70
4.8. Hasil Produk Optimal	74
4.9. Kerusakan Baut Ulir Kortikal	75
V. SIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Simpulan.....	77
5.2. Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2. 1 Dimensi baut ulir tipe HA	33
Tabel 2. 2 Dimensi ulir dangkal HA	34
Tabel 2. 3 Contoh matriks <i>Orthogonal Array</i> $L_8 (2^7)$	38
Tabel 2. 4 Contoh hasil optimasi Metode GRA	41
Tabel 2. 5 ANOVA dua arah.....	42
Tabel 3. 1 Rencana kegiatan penelitian.....	44
Tabel 3. 2 Kandungan paduan titanium Ti-6Al-4V ELI	46
Tabel 3. 3 Sifat fisika paduan titanium Ti-6Al-4V ELI	46
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>profile projector</i>	48
Tabel 3. 5 Spesifikasi <i>Changhua Chen Ying Oil Machine</i>	49
Tabel 3. 6 Kandungan minyak sintesis	49
Tabel 3. 7 Kandungan VCO	50
Tabel 3. 8 Kandungan VPO	50
Tabel 3. 9 Desain parameter pemesinan	51
Tabel 3. 10 Pengukuran diameter mayor dan minor ulir	54
Tabel 3. 11 Pengukuran jarak puncak ulir	55
Tabel 3. 12 Pengukuran sudut ulir	55
Tabel 3. 13 Data hasil pengukuran.....	56
Tabel 4. 1 <i>Run Order</i> penelitian.....	58
Tabel 4. 2 Urutan percobaan	59
Tabel 4. 3 Nilai masing-masing parameter	59
Tabel 4. 4 Data hasil pengukuran ulir kortikal.....	60
Tabel 4. 5 Nilai kesalahan pengukuran ulir kortikal	61

Tabel 4. 6 Data <i>SN Ratio</i> kesalahan jarak puncak ulir, kesalahan tinggi ulir, kesalahan sudut α , dan kesalahan sudut β	62
Tabel 4. 7 Data normalisasi <i>SN Ratio</i>	63
Tabel 4. 8 Data <i>deviation sequeence response</i> (Δ)	64
Tabel 4. 9 Data <i>Grey Relational Coefficient</i>	65
Tabel 4. 10 Data <i>Grey Relational Grade</i>	66
Tabel 4. 11 Tabel ANOVA GRG	67
Tabel 4. 12 <i>Mean response Grey Relational Grade</i>	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2. 1 Beberapa jenis proses pemesinan.....	8
Gambar 2. 2 Mesin bubut.....	10
Gambar 2. 3 Mesin bubut CNC <i>Leadwell</i>	12
Gambar 2. 4 Mekanisme proses bubut.....	13
Gambar 2. 5 Proses pemesinan yang dapat dilakukan pada mesin bubut.....	14
Gambar 2. 6 proses pembubutan ulir	18
Gambar 2. 7 Dimensi ulir metris.....	18
Gambar 2. 8 Ulir segi empat	19
Gambar 2. 9 Pahat ulir metris untuk ulir luar dan ulir dalam	20
Gambar 2. 10 Pahat sisipan.....	20
Gambar 2. 11 Pengukuran kesalahan tinggi ulir	21
Gambar 2. 12 Pengukuran kesalahan sudut ulir.....	22
Gambar 2. 13 Pengukuran kesalahan jarak puncak ulir.....	23
Gambar 2. 14 Titanium paduan berbentuk silinder pejal.....	24
Gambar 2. 15 Struktural kristal titanium.....	25
Gambar 2. 16 Baut ulir tulang.....	28
Gambar 2. 17 (a) <i>cortical screw</i> , dan (b) <i>cancellous screw</i>	29
Gambar 2. 18 Jenis <i>screw</i> berdasarkan fungsinya di dalam tulang.....	30
Gambar 2. 19 (a) <i>self-tapping screw</i> , dan (b) <i>nonsel-tapping screw</i>	31
Gambar 2. 20 (a) <i>locking screw</i> , dan (b) standar <i>screw</i>	31
Gambar 2. 21 Dimensi baut ulir dangkal	32
Gambar 2. 22 Dimensi ulir dangkal HA	33
Gambar 2. 23 Notasi OA.....	37
Gambar 3. 1 Paduan titanium 6Al-4V ELI	45

Gambar 3. 2 Mesin bubut CNC <i>Feeler</i> FTC-350XL	46
Gambar 3. 3 Pahat ulir <i>carbide</i>	47
Gambar 3. 4 <i>Profile projector</i>	48
Gambar 3. 5 <i>Changhua Chen Ying Oil Machine</i>	49
Gambar 3. 6 Diagram alir penelitian	52
Gambar 4. 1 <i>Main effects plot for means Grey Relational Grade</i>	69
Gambar 4. 2 Kesalahan jarak puncak ulir (a) terkecil dan (b) terbesar.....	70
Gambar 4. 3 Kesalahan tinggi ulir (a) terkecil dan (b) terbesar.....	71
Gambar 4. 4 Kesalahan sudut α (a) terkecil dan (b) terbesar.....	72
Gambar 4. 5 Kesalahan sudut β (a) terkecil dan (b) terbesar.....	73
Gambar 4. 6 Hasil produk optimal.....	74
Gambar 4. 7 Hasil produk 100 rpm DOC 0,03 mm.....	75
Gambar 4. 8 Hasil produk 200 rpm DOC 0,03 mm.....	76
Gambar 4. 9 Hasil produk 300 rpm DOC 0,03 mm.....	76

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Titanium adalah bahan yang banyak digunakan dalam industri, penerbangan, biomedis, elektronik, dan benda mikroskopis lainnya. Titanium juga merupakan logam yang sangat akrab dalam kehidupan manusia, banyak orang tahu bahwa titanium dapat digunakan dalam perhiasan, elektronik, alat kedokteran, dan produk lainnya yang membutuhkan kekuatan material. Titanium juga merupakan logam yang sangat atraktif karena merupakan logam yang ringan namun memiliki sifat yang kuat. Titanium dan paduan titanium telah digunakan secara besar-besaran di bidang industri pesawat terbang karena bahan ini memiliki sifat unggul antaranya adalah kombinasi rasio antara kekuatan dan berat yang baik pada temperatur tinggi (*strength-to-weight ratio*), memiliki sifat tahan patah, dan sifat tahan korosi pada suhu tinggi (Ibrahim, 2014).

Dalam bidang biomedis, bahan paduan titanium Ti-6Al-4V ELI telah digunakan dalam aplikasi ortopedi karena memiliki biokompatibilitas dan kemampuan *load bearing* serta modulus elastisitas yang relatif rendah untuk mengurangi efek *stress shielding* selama implantasi. Sifat fisik dan mekanis yang baik seperti kekerasan dan kekuatan *fatigue* yang tinggi, densitas rendah dan ketahanan korosi yang baik adalah keunggulan titanium sebagai bahan implan. Implantasi material titanium menghasilkan respon inflamasi, hipersensitivitas dan alergi yang rendah ketika berkontak dengan lingkungan biologis tubuh (Gunawarman dkk, 2020).

Titanium sebagai komponen implan dapat dibuat dengan menggunakan beberapa jenis proses pemesinan, salah satunya adalah mesin bubut. Ada beberapa tantangan yang terkait dengan aspek manufaktur paduan titanium seperti umur pahat yang lebih pendek, getaran dan gesekan yang diinduksi, dan produktivitas pemesinan yang lebih rendah (Shastri et al, 2021). Konduktivitas termal yang rendah dari titanium menyebabkan kerusakan pada permukaan material yang dipotong, sehingga menghasilkan kualitas permukaan yang buruk, adanya abrasi dan kerusakan mikrostruktur. Oleh karena itu titanium dikategorikan sebagai bahan yang sulit dimesin (Ibrahim dkk, 2019).

Implan medis yang dikembangkan dari baja tahan karat dan paduan titanium dan paduan berbasis kobalt adalah bahan yang paling banyak digunakan dalam aplikasi biomedis saat ini. Produksi logam biokompatibel untuk perangkat implan terbatas karena biaya bahan baku yang tinggi dan kesulitan dalam memproses geometri yang kompleks. Kesulitan dalam pemesinan paduan Ti-6Al-4V untuk memproduksi potongan sekrup tulang kortikal. Jika baja tahan karat 316L digunakan sebagai alternatif untuk sekrup tulang kortikal Ti-6Al-4V, implan kortikal Ti-6Al-4V lebih disukai karena ketahanan terhadap korosi dan biokompatibilitasnya yang unggul. Karena sifat mekanik paduan Ti dekat dengan sifat mekanik tulang, Ti telah digunakan secara luas (Urtekin and Taskin, 2017).

Sekrup tulang tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran untuk penggunaan yang berbeda. Setiap jenis sekrup ditentukan oleh ulir, kepala, inti, dan ujung tertentu yang sesuai dengan aplikasinya. Jenis utama sekrup tulang meliputi: sekrup tulang kortikal, sekrup tulang *cancellous* dan sekrup kepala pengunci. Sekrup *cortex* adalah sekrup konvensional dengan ulir dangkal dan kepala bundar yang cocok dengan lubang kompresi pelat DCP dan LC-DCP. Dimensi dan toleransinya ditentukan oleh standar ISO 5835 yang mengacu pada sekrup tulang kortikal sebagai sekrup HA (Rueda, 2018).

Merujuk dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (Saputra dkk, 2020) dapat dilihat bahwa titanium merupakan bahan yang sulit untuk dimesin karena memiliki konduktivitas *thermal* yang rendah sehingga menyebabkan kerusakan permukaan pada bahan yang dipotong, adanya abrasi, dan kerusakan mikrostruktur. Semakin tinggi suhu pemotongan, dapat membuat pahat potong menjadi lebih cepat aus. Saat keausan pahat meningkat, kontak pahat dengan benda kerja akan semakin lebar dan menyebabkan gaya potong semakin tinggi. Sehingga untuk mendapatkan kualitas produk yang baik dalam proses pemesinan titanium dibutuhkan proses optimasi. Kualitas produk yang baik ditentukan oleh dua hal yaitu dimensi produk yang dihasilkan dan kualitas permukaan produk yang dihasilkan.

Proses optimasi dapat melibatkan respon tunggal maupun multirespon. Ketika percobaan yang dilakukan melibatkan multi respon, maka seluruh respon tersebut harus dioptimasi secara simultan. Untuk mengoptimasi kondisi multi respon dapat digunakan metode *Grey Relational Analysis*, dimana metode ini mensimplifikasi proses yang rumit dalam optimasi data karakteristik multi respon dengan cara mengubahnya menjadi suatu respon tunggal yang disebut *Grey Relational Grade* (Falah, 2020).

Hal tersebut yang menjadi acuan penulis dalam mengangkat topik “Optimasi Parameter Pemesinan Terhadap Kepresisian Geometri Baut Ulir Tulang Kortikal Material Ti-6Al-4V ELI Menggunakan Metode *Grey Relation Analysis*”. Penelitian ini diharapkan dapat membantu dalam menentukan kombinasi parameter pemotongan dengan nilai optimum sehingga dapat meningkatkan kualitas produk baut ulir tulang kortikal menggunakan material Ti-6Al-4V ELI.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang hendak dicapai pada penelitian ini adalah mengoptimasi parameter pemesinan bubut terhadap kepresisian geometri baut ulir jenis

kortikal berbahan Ti-6Al-4V ELI menggunakan Metode *Grey Relational Analysis*.

1.3. Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah:

1. H_0 : Ada faktor yang paling dominan berpengaruh terhadap respon gabungan.
2. H_1 : Tidak ada faktor yang paling dominan berpengaruh terhadap respon gabungan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah diberikan agar pembahasan dari hasil yang didapat lebih terarah. Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini yaitu:

1. Pemesinan baut ulir tulang kortikal Ti-6Al-4V ELI menggunakan mesin bubut CNC.
2. Proses optimasi data menggunakan Metode *Grey Relational Analysis* berdasarkan empat respon yang diamati, yaitu kesalahan tinggi ulir, kesalahan jarak puncak ulir, kesalahan sudut α ulir, dan kesalahan sudut β ulir.
3. Pengambilan data geometri ulir menggunakan *Profile Projector*.
4. Peralatan mesin perkakas yang kurang presisi.
5. Standar baut ulir kortikal berdasarkan ISO 5835.

1.5. Sistematika Penulisan

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

I. PENDAHULUAN

Pendahuluan berisikan latar belakang yang berisikan alasan-alasan dari penulisan penelitian tentang optimasi kepresisian geometri ulir kortikal pada Ti-6Al-4V ELI. Kemudian terdapat tujuan penelitian yaitu penjabaran atas hal-hal yang ingin dicapai. Selanjutnya hipotesis yaitu harapan yang diinginkan pada penelitian ini. Lalu batasan masalah terkait dengan kondisi pemesinan yang digunakan, metode pengoptimasi data yang digunakan, perangkat pengambilan data dimensi dan material yang digunakan. Terakhir sistematika penulisan yang berisikan penjelasan terkait isi pada bab-bab dalam penulisan penelitian ini, seperti pendahuluan, tinjauan pustaka, metode penelitian, data dan pembahasan, penutup serta daftar pustaka.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka berisikan teori mengenai proses pemesinan, mesin bubut, pembubutan ulir, pahat ulir, kepresisian ulir, titanium, sekrup tulang (*screw*), geometri sekrup tulang, hubungan Metode Taguchi dan Metode *Grey Relational Analysis* (GRA), Metode Taguchi, karakteristik kualitas dan *signal to noise ratio*, *orthogonal array*, *Grey Relational Analysis* (GRA), *Analysis of Varians* (ANOVA), dan *P-value* yang dijadikan sebagai landasan teori untuk mendukung penelitian ini.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian berisikan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, material pahat bubut konvensional yang digunakan pada penelitian, penentuan parameter penelitian serta pengambilan data.

IV. PEMBAHASAN

Pembahasan berisikan data-data yang telah didapat dari hasil pengujian yang telah diamati dan membahas pengaruh parameter terhadap tingkat kesalahan puncak ulir, kesalahan jarak puncak ulir, dan kesalahan sudut ulir material Ti-6Al-4V ELI.

V. PENUTUP

Penutup berisikan simpulan yang diperoleh dari hasil eksperimental dan saran saran yang diberikan oleh peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka berisikan referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

Lampiran berisikan perlengkapan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

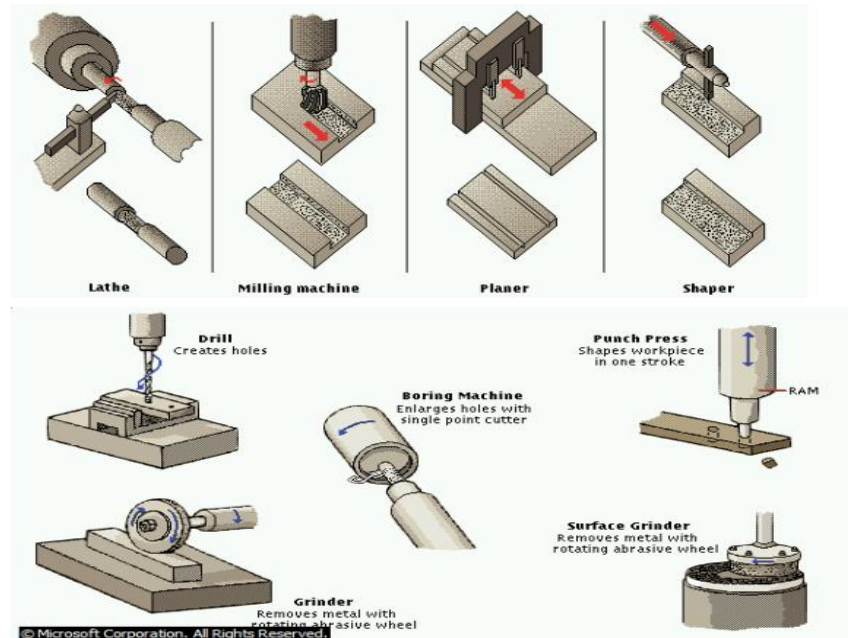
2.1. Proses Pemesinan

Proses pemesinan merupakan bagian dari proses produksi yang bertujuan untuk menghasilkan produk melalui proses pemotongan benda kerja dengan menggunakan mesin perkakas. Mesin perkakas yang biasa digunakan untuk memotong dalam proses pemesinan terdiri dari mesin konvensional dan mesin non konvensional yang meliputi mesin bubut (*lathe*), mesin frais (*milling*), mesin sekrap (*shaping, planing*), mesin gurdi (*drilling*), mesin CNC (*Computer Numerical Control*) dan mesin perkakas lainnya. Pada proses pemesinan pahat yang bergerak relatif melakukan pemotongan terhadap benda kerja akan menghasilkan sisa pengerjaan produk yang disebut geram (Paridawati, 2015).

Proses pemesinan dilakukan dengan cara memotong bagian benda kerja yang tidak terpakai dengan pahat (*cutting tool*), sehingga permukaan benda kerja dibentuk menjadi komponen yang diinginkan. Pahat yang digunakan dipasang pada satu jenis mesin perkakas dengan gerakan relatif tertentu (berputar atau bergeser) yang disesuaikan dengan bentuk benda kerja yang akan dibuat. Proses pemesinan dapat dikategorikan menjadi dua klasifikasi besar, yaitu proses pemesinan untuk membentuk benda kerja silindris atau konis dengan benda kerja/pahat berputar, dan proses pemesinan untuk membentuk benda kerja permukaan rata tanpa memutar benda kerja.

Klasifikasi yang pertama meliputi proses bubut dan variasi proses yang dilakukan dengan menggunakan mesin bubut (*lathe*), mesin gurdi (*drilling*), mesin frais (*milling*), mesin gerinda (*grinding*). Klasifikasi kedua meliputi

proses sekrap (*shaping, planing*), proses slot (*slotting*), proses menggergaji (*sawing*), dan proses pemotongan roda gigi (*gear cutting*). Beberapa proses pemesinan tersebut ditampilkan pada Gambar 2. 1 di bawah ini.



Gambar 2. 1 Beberapa jenis proses pemesinan (Rahdiyanta, 2010)

Keterangan:

1. Bubut (*Lathe*)
2. Frais (*Milling*)
3. Sekrap (*Planer, Shaper*)
4. Gurdi (*Drilling*)
5. Gerinda (*Grinding*)
6. Bor (*Boring*)
7. Pelubang (*Punch Press*)
8. Gerinda permukaan (*Surface Grinding*)

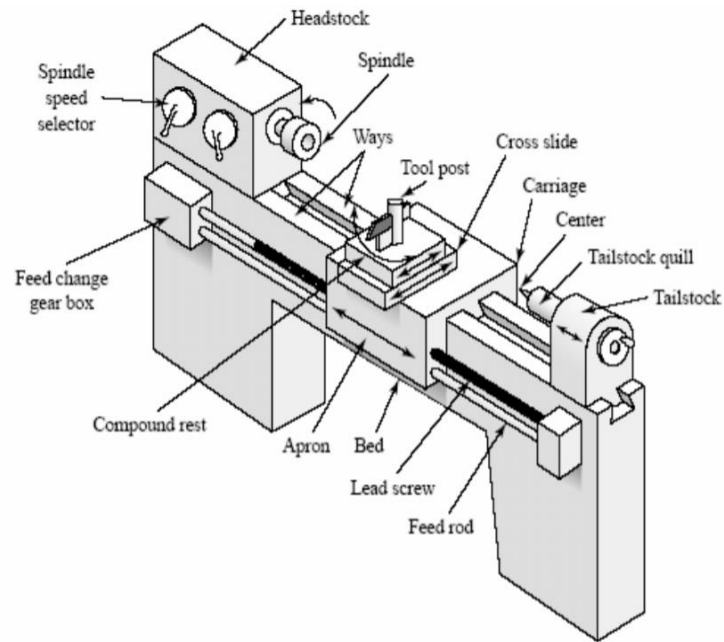
2.2. Mesin Bubut

Mesin bubut adalah salah satu jenis mesin yang banyak digunakan dalam dunia industri untuk menghasilkan suatu barang atau produk. Mesin bubut adalah mesin perkakas yang digunakan untuk memotong benda kerja yang berputar. Ada dua jenis mesin bubut, yaitu mesin bubut konvensional dan mesin bubut CNC (*computer numeric control*). Mesin bubut termasuk kedalam proses pemesinan yang menggunakan pahat bermata tunggal (*single point cutting tool*) (Paridawati, 2015).

2.2.1 Mesin bubut konvensional

Mesin bubut atau *lathe machine* adalah mesin perkakas yang berfungsi membentuk benda kerja menjadi sebuah produk dengan pergerakan utama memutar benda kerja yang tercekam pada alat pencekam (*chuck*). Benda kerja disayat dengan pahat potong atau *cutting tool* untuk mengurangi bagian benda kerja sesuai dengan kedalaman yang diinginkan. Pahat potong menyayat benda kerja baik mendatar (sesuai dengan arah *bed*) maupun melintang (mendekati atau menjauhi operator) untuk mencapai bentuk dan dimensi tuntutan gambar suatu produk (Wicaksono dan Prayogi, 2021).

Berikut ini akan ditampilkan gambar mesin bubut konvensional dan bagian-bagian utama dari mesin bubut konvensional seperti tampak pada Gambar 2. 2 di halaman selanjutnya.



Gambar 2. 2 Mesin bubut (Arif dkk, 2016)

Beberapa bagian pada mesin bubut konvensional yang umum diketahui adalah sebagai berikut:

1. Kepala tetap (*head stock*)

Pada bagian kepala tetap terdapat:

- a. Transmisi roda gigi, untuk pengaturan kecepatan putar benda kerja
- b. Batang (tangkai) pengatur kecepatan
- c. Pemegang benda kerja.

2. Kepala lepas (*tail stock*)

Pada bagian ini dapat dipasangkan center sebagai pendukung benda kerja yang panjang, juga dapat dipasangkan tangkai pemegang mata *drill* untuk proses pelubangan benda kerja dengan menggunakan mesin bubut.

3. *Bed*

Berfungsi sebagai tempat meluncurnya (bergeser di atasnya) eretan (*carriage*), kepala lepas, dan *steady-rest*.

4. Eretan (*carriage*)

Tempat pemasangan alat iris.

2.2.2. Mesin bubut CNC (*Computer Numerical Control*)

Mesin bubut CNC (*Computer Numerical Control*) adalah mesin perkakas yang dalam proses pemotongan (*cutting*) benda kerja oleh pahat/alat potong dibantu dengan kontrol numerik dengan menggunakan komputer. Benda kerja dicekam dan diputar oleh *spindle* (poros pemutaran) utama, mesin ini dilengkapi dengan instruksi desain yang presisi, sementara alat potong yang digunakan, dipasang dan bergerak dalam berbagai sumbu (*axis*) (Fathurrahman dkk, 2021). Karena suatu tuntutan yang harus dipenuhi dalam bidang *engineering* seperti dimensi dengan toleransi yang sangat kritis, maka mesin CNC banyak dipilih oleh perusahaan karena mempunyai kelebihan dari pada mesin manual/konvensional yaitu lebih teliti dan lebih cepat dalam proses permesinan baik dari segi kuantitas maupun kualitas.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi keunggulan mesin bubut CNC dibandingkan mesin konvensional diantaranya adalah: tidak banyak setting, *tool* berpindah secara otomatis sesuai program yang diminta, pada mesin bubut memakai *chuck* hidrolik/pneumatis, pergerakan mesin dapat dimonitor pada layar komputer, tingkat eror kecil, dan efisiensi waktu. Dari pernyataan tersebut, mesin bubut CNC lebih efisien daripada mesin bubut konvensional karena cukup menggunakan program dan setingan mesin yang sama, maka akan dihasilkan produk yang sama pula meskipun dilakukan berulang kali. Oleh karena itu, mesin CNC banyak digunakan dalam produksi massal (Fauzi dan Sumbodo, 2021).

Mesin bubut CNC mempunyai bagian yang sama dengan mesin bubut konvensional baik segi bentuk maupun fungsinya. Namun pada mesin bubut CNC pergerakan bagian mesin bisa dioperasikan secara manual juga bisa dengan program dan pergerakannya dapat dipantau lewat monitor. Berikut ini adalah bagian utama mesin bubut diantaranya adalah: eretan (*support*), rumah alat potong, cekam (*chuck*) kepala lepas

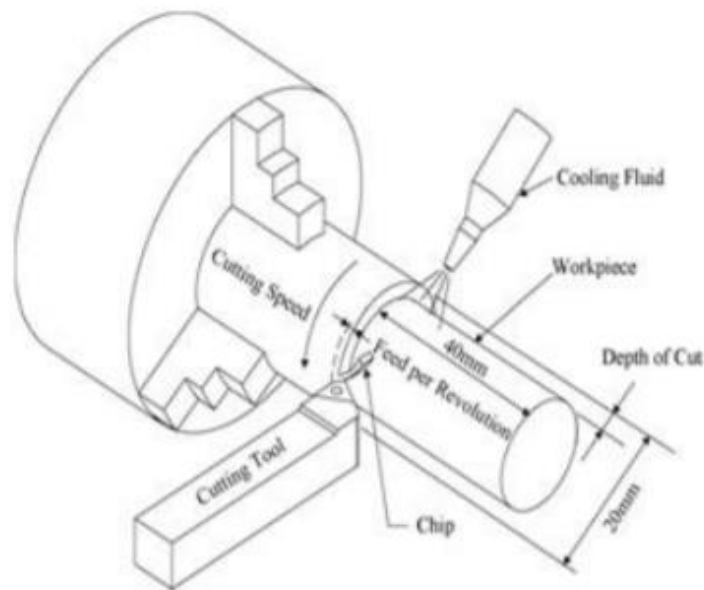
(*tailstock*), meja mesin (*sliding bed*), motor penggerak utama, step motor, dan bagian pengendali atau kontrol. Berikut akan ditampilkan mesin bubut CNC pada Gambar 2. 3 di bawah ini.



Gambar 2. 3 Mesin bubut CNC *Leadwell* (Fauzi dan Sumbodo, 2021)

2.2.3. Proses bubut

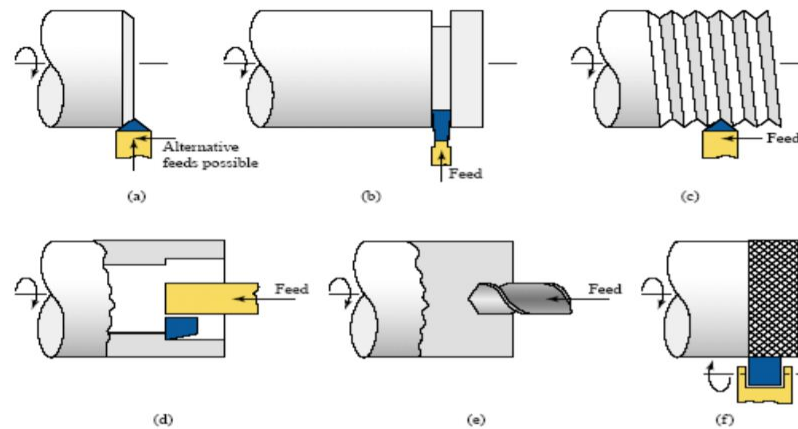
Proses bubut merupakan salah satu proses pemesinan pemotongan logam menggunakan mesin bubut yang menghasilkan produk berbentuk silindris. Prinsip dasarnya dapat didefinisikan juga sebagai proses pemesinan bubut rata atau permukaan luar benda silindris. Proses bubut rata dilakukan dengan menggunakan satu pahat bermata potong tunggal dan disayatkan ke arah benda kerja yang berputar. Gerakan pahat sejajar terhadap sumbu benda kerja pada jarak tertentu sehingga akan membuang permukaan luar benda kerja seperti pada Gambar 2. 4 di halaman selanjutnya.



Gambar 2. 4 Mekanisme proses bubut (Moghaddam et al, 2012)

Proses bubut permukaan (*surface turning*) merupakan proses bubut yang identik dengan proses bubut rata, tetapi arah gerakan pemakanannya tegak lurus terhadap sumbu benda kerja. Proses bubut tirus (*taper turning*) juga sebenarnya identik dengan proses bubut rata, tetapi arah gerakan pemakanannya membentuk sudut tertentu terhadap sumbu benda kerja. Demikian juga dengan proses bubut kontur, dilakukan dengan cara memvariasikan kedalaman potong sehingga akan menghasilkan bentuk seperti yang diinginkan.

Selain proses bubut, ada beberapa proses pemesinan mesin bubut lainnya. Mesin bubut juga dapat melakukan proses bubut dalam (*internal turning*), proses pembuatan lubang menggunakan mata bor (*drilling*), proses memperbesar lubang (*boring*), proses pembuatan ulir (*thread cutting*) dan proses pembuatan alur (*grooving/parting-off*). Proses-proses tersebut dapat dilakukan di mesin bubut dengan menggunakan peralatan tambahan agar proses pemesinan bisa dilakukan seperti pada Gambar 2. 5 di halaman selanjutnya (Rahdiyanta, 2010).



Gambar 2. 5 Proses pemesinan yang dapat dilakukan pada mesin bubut (Rahdiyanta, 2010)

Keterangan:

1. Pembubutan champer (*chamfering*)
2. Pembubutan alur (*parting-off*)
3. Pembubutan ulir (*threading*)
4. Pembubutan lubang (*boring*)
5. Pembuatan lubang (*drilling*)
6. Pembuatan kartel (*knurling*)

2.2.4. Parameter proses bubut

Ada beberapa parameter utama yang perlu diperhatikan dalam proses bubut yaitu kecepatan potong (*cutting speed*), kecepatan putaran mesin bubut dan kedalaman makan. Material benda kerja dan jenis pahat juga merupakan faktor yang memiliki pengaruh cukup besar. Tetapi ketiga parameter di atas adalah bagian yang bisa diatur secara langsung oleh operator pada mesin bubut (Rahdiyanta, 2010).

1. Kecepatan potong (*cutting speed* - CS)

Kecepatan potong (CS) merupakan kemampuan alat potong dalam menyayat benda kerja dengan satuan panjang/waktu (m/menit atau feet/menit). Untuk menghitung kecepatan potong (CS) pada mesin bubut dapat dilakukan dengan cara, keliling lingkaran benda kerja ($\pi \cdot d$) yang dikalikan dengan putaran *spindle* (n) atau:

$$CS = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ mm/menit} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- d = diameter benda kerja (mm);
- n = putaran mesin/benda kerja (putaran/menit - rpm);
- π = nilai konstanta = 3,14.

Dalam proses pemesinan, kecepatan potong (CS) benda kerja yang sudah dikenal secara umum sudah diatur pada tabel kecepatan potong (CS) yang telah disepakati di dunia. Sehingga jenis pahat potong yang akan digunakan dapat disesuaikan dengan benda kerja yang akan digunakan untuk pembubutan. Namun jika untuk benda kerja khusus, maka pabrik yang membuatnya akan mengeluarkan spesifikasi dan tabel kecepatan potong benda kerja tersebut.

2. Kecepatan putaran spindel (*revolution per minute* – RPM)

Kecepatan putaran spindel (RPM) merupakan kemampuan kecepatan putar mesin bubut untuk melakukan pemotongan atau penyayatan dalam satuan menit/putaran. Besarnya putaran mesin yang digunakan dipengaruhi oleh kecepatan potong dan keliling benda kerja yang akan digunakan. Nilai kecepatan potong untuk setiap jenis benda kerja sudah ada ketetapan, oleh karena itu komponen yang bisa diatur dalam proses penyayatan adalah putaran mesin bubut. Karena kecepatan potong (CS) dalam satuan meter/menit dan diameter benda kerja dalam satuan milimeter (mm), maka untuk menyamakannya nilai kecepatan potong (CS) harus dikalikan dengan 1000 mm. Oleh karena itu, rumus untuk menghitung putaran mesin menjadi:

$$CS = \pi \cdot d \cdot n \text{ meter/menit}$$

$$n = \frac{1000 \cdot CS}{\pi \cdot d} \text{ rpm} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

d = diameter benda kerja (mm);

CS = kecepatan potong (meter/menit);

π = nilai konstanta = 3,14.

3. Kecepatan pemakanan (*feeding* - F)

Dalam menentukan kecepatan pemakanan (F) ada beberapa faktor yang harus dipertimbangkan, yaitu: kekerasan bahan, kedalaman penyayatan, bahan alat potong, ketajaman alat potong, sudut-sudut sayat alat potong dan kesiapan mesin yang akan digunakan. Kesiapan mesin dapat diartikan sebagai kemampuan mesin dalam mencapai kecepatan pemakanan yang optimal. Dengan menggunakan kecepatan pemakanan yang rendah (waktu pembubutan lebih lama) maka akan mendapatkan kualitas permukaan hasil penyayatan yang lebih baik sehingga hasil kekasaran permukaannya kecil. Besarnya kecepatan pemakanan (F) pada mesin bubut dapat ditentukan oleh seberapa besar bergesernya pahat bubut (f) dalam satuan mm/putaran kemudian dikalikan dengan seberapa besar putaran *spindle* mesin bubut (n) dalam satuan rpm (*revolution per minute*). Dengan demikian diperoleh rumus untuk mencari kecepatan pemakanan (F) adalah:

$$F = f \times n \text{ (mm/menit)(3)}$$

Keterangan:

f = Besar pemakanan atau bergesernya pahat (mm/putaran);

n = Putaran mesin (rpm).

4. Kedalaman Potong

Kedalaman potong (*depth of cut*) merupakan dalamnya pemotongan atau pemakanan yang dilakukan oleh pahat dalam suatu pengerjaan pembubutan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kedalaman

pemotongan yaitu putaran mesin, kecepatan potong, bahan benda kerja, dan jenis pahat yang digunakan. Dalam pembubutan kasar, kedalaman potong maksimum bergantung pada keternesinan dari benda kerja, tipe pahat potong yang digunakan, dan kondisi dari mesin. Rumus kedalaman potong adalah sebagai berikut:

$$a = \frac{d_o - d_m}{2} \text{ (mm) } \dots\dots\dots(4)$$

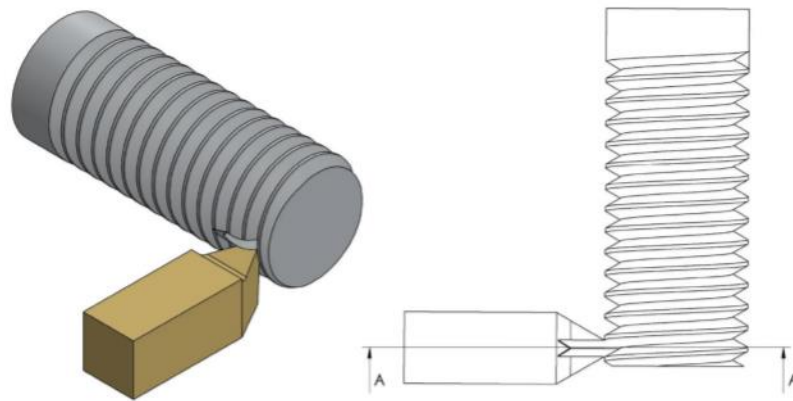
Keterangan:

d_o = Diameter awal;

d_m = Diameter akhir.

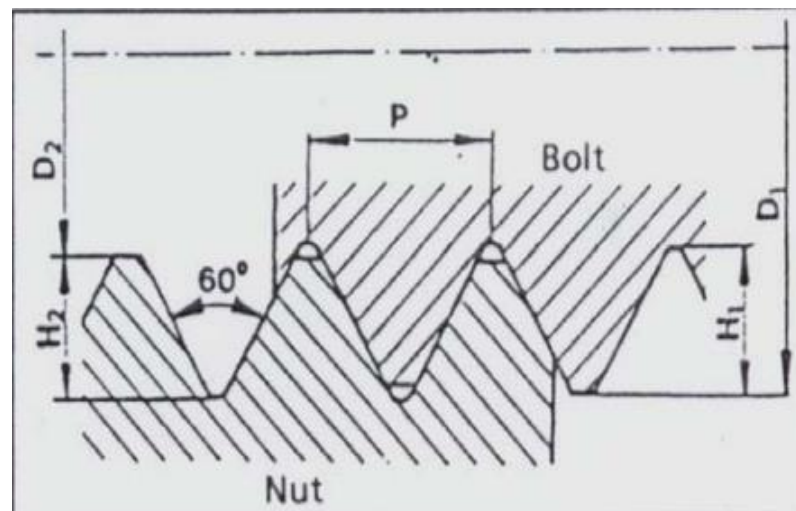
2.3. Pembubutan Ulir

Proses pembubutan ulir dapat dikerjakan dengan menggunakan mesin bubut konvensional ataupun mesin bubut CNC. Pembuatan ulir dengan mesin bubut konvensional (manual) kurang efisien, hal ini dikarenakan pengulangan pemotongan harus dikendalikan secara manual, sehingga proses pembuatannya menjadi lama dan hasilnya pun kurang presisi. Namun dengan menggunakan mesin bubut yang dikendalikan CNC, proses pembubutan ulir menjadi sangat efisien dan efektif, karena amat memungkinkan untuk membuat ulir dengan beragam variasi kisar (*pitch*) dalam waktu proses yang relatif lebih cepat dan hasil yang lebih presisi. Proses pembubutan ulir dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah ini.



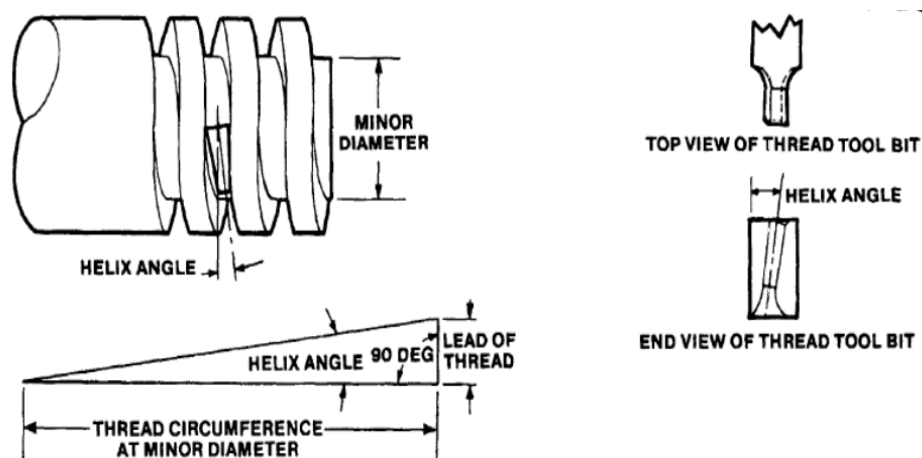
Gambar 2. 6 proses pembubutan ulir (Khani et al, 2021)

Ulir segi tiga tersebut bisa berupa ulir tunggal atau ulir ganda. Pahat yang digunakan untuk membuat ulir segi tiga ini adalah pahat ulir yang sudut ujung pahatnya sama dengan sudut ulir atau setengah sudut ulir. Untuk ulir metris sudut ulir adalah 60° , sedangkan ulir Whitworth sudut ulir 55° . Identifikasi ulir biasanya ditentukan berdasarkan diameter mayor dan kisar ulir (Gambar 2. 7 di bawah ini). Misalnya ulir M5x0,8 berarti ulir metris dengan diameter mayor 5 mm dan kisar (*pitch*) 0,8 mm.



Gambar 2. 7 Dimensi ulir metris (Rahdiyanta, 2010)

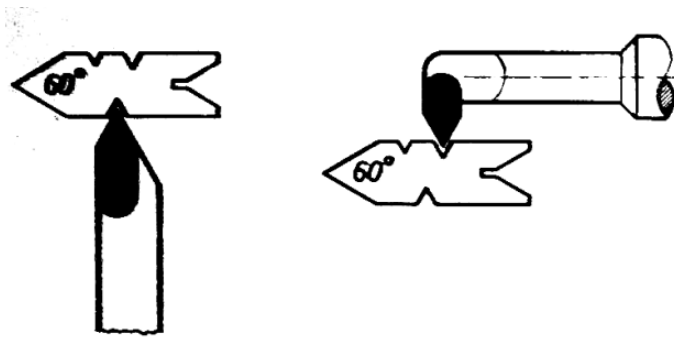
Selain ulir segi tiga, pada mesin bubut bisa juga dibuat ulir segi empat (Gambar 2. 8 di bawah ini). Ulir segi empat ini biasanya digunakan untuk ulir daya. Dimensi utama dari ulir segi empat pada dasarnya sama dengan ulir segi tiga yaitu: diameter mayor, diameter minor, kisar (*pitch*), dan sudut helix (Gambar 2. 8). Pahat yang digunakan untuk membuat ulir segi empat adalah pahat yang dibentuk (diasah) menyesuaikan bentuk alur ulir segi empat dengan pertimbangan sudut helix ulir (Gambar 2. 8). Pahat ini biasanya dibuat dari HSS atau pahat sisipan dari bahan karbida.



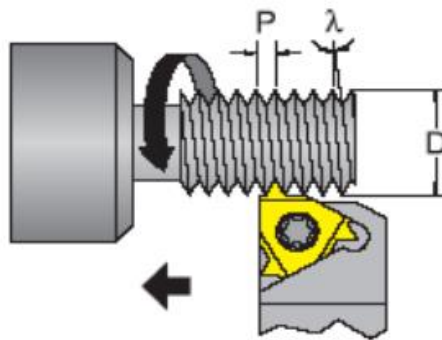
Gambar 2. 8 Ulir segi empat (Rahdiyanta, 2010)

2.4. Pahat Ulir

Pada proses pembuatan ulir dengan menggunakan mesin bubut manual pertama-tama yang harus diperhatikan adalah sudut pahat. Gambar 2. 9 di halaman selanjutnya ditunjukkan bentuk pahat ulir metris dan alat untuk mengecek besarnya sudut tersebut (60°). Pahat ulir pada gambar tersebut adalah pahat ulir luar dan pahat ulir dalam. Selain pahat terbuat dari HSS pahat ulir yang berupa sisipan ada yang terbuat dari bahan karbida (Gambar 2. 10 di halaman selanjutnya).



Gambar 2. 9 Pahat ulir metris untuk ulir luar dan ulir dalam (Rahdiyanta, 2010)



Gambar 2. 10 Pahat sisipan (Rahdiyanta, 2010)

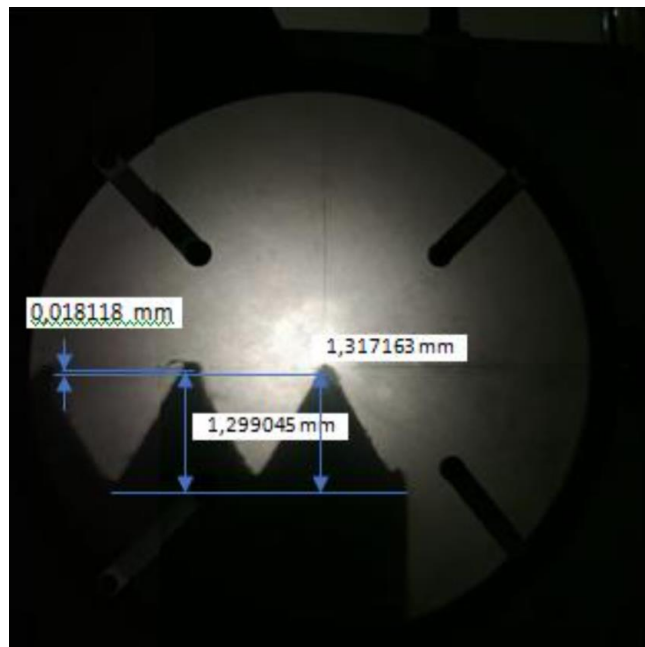
Parameter pemesinan untuk proses bubut ulir berbeda dengan bubut rata. Hal tersebut terjadi karena pada proses pembuatan ulir gerak makan (f) adalah kisar (*pitch*) ulir tersebut, sehingga putaran spindel tidak terlalu tinggi (secara kasar sekitar setengah dari putaran spindel untuk proses bubut rata).

2.5. Kepresisian ulir

Kepresisian ulir sangat penting dalam suatu proses produksi. Kepresisian ulir mengacu kepada standar yang sudah ada. Kepresisian pada ulir dapat berupa jarak puncak ulir, ketinggian ulir, dan sudut ulir. Berikut ini akan dijelaskan beberapa faktor yang mempengaruhi kepresisian ulir berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Ibrahim dkk, 2019):

1. Kesalahan tinggi ulir

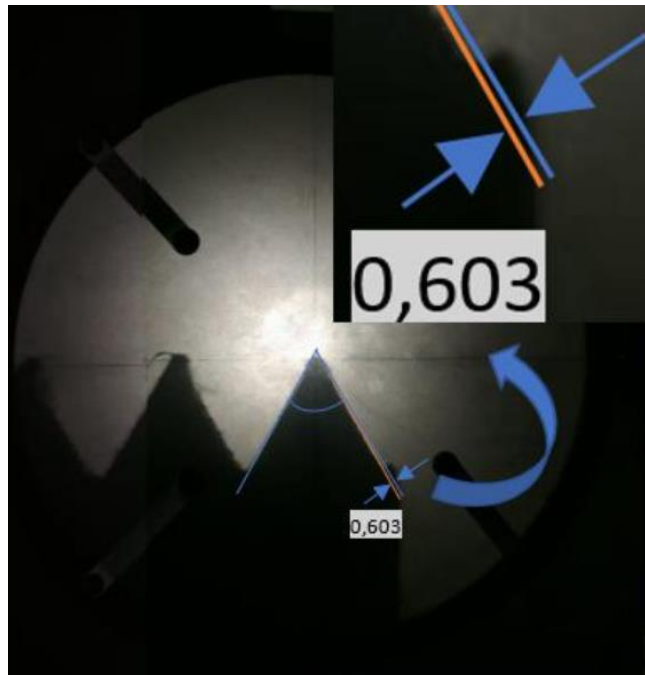
Parameter kedalaman potong sangat mempengaruhi terhadap tingkat kesalahan tinggi ulir pada pembuatan ulir. Hasil penelitian (Ibrahim dkk, 2019) membuktikan bahwa kedalaman potong mempengaruhi kesalahan pada tinggi puncak ulir dan semakin tinggi kecepatan *spindle* maka akan semakin rendah nilai kesalahan tinggi ulir. Dimana toleransi tinggi untuk ulir metrik dengan jarak *pitch* 1,5 adalah 0,1 mm untuk penyimpangan sedang dan 0,05 mm untuk penyimpangan halus. Pada Gambar 2. 11 di bawah ini akan ditampilkan gambar pengukuran kesalahan ulir.



Gambar 2. 11 Pengukuran kesalahan tinggi ulir (Ibrahim dkk, 2019)

2. Kesalahan sudut ulir

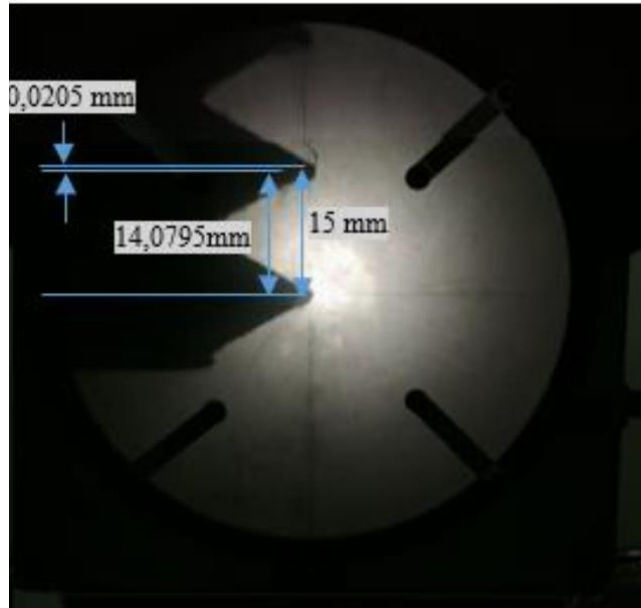
Kesalahan sudut ulir secara logis dapat dipengaruhi oleh kedalaman potong dan gerak makan saat proses pemesinan. Hal ini disebabkan karena kedalaman potong berhubungan langsung dengan gaya pemotongan, sehingga energi pemotongan yang diperlukan juga bergantung pada daya pemotongan. Oleh karena itu semakin tinggi nilai kedalaman potong maka semakin tinggi nilai kesalahan sudut ulir. Pada Gambar 2. 12 di halaman selanjutnya akan ditampilkan gambar pengukuran kesalahan sudut ulir.



Gambar 2. 12 Pengukuran kesalahan sudut ulir (Ibrahim dkk, 2019)

3. Kesalahan jarak puncak ulir

Jarak puncak ulir (*pitch*) ke puncak ulir lainnya merupakan bagian yang paling penting dalam elemen mur dan baut. Dalam hasil yang telah didapatkan keseluruhan data menunjukkan bahwa jarak antar *pitch* masih dalam toleransi ulir standar M22x1,5 yaitu 0,1 mm. Hal ini dikarenakan toleransi *pitch* yang dibolehkan untuk standar metrik dengan jarak *pitch* 1,5 adalah 0,1 mm untuk penyimpangan sedang dan 0,05 mm untuk penyimpangan halus. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa tingkat kesalahan yang dihasilkan masih dapat diterima karena angka kesalahannya lebih kecil daripada nilai standarnya. Pada gambar 2. 13 di halaman selanjutnya akan ditampilkan gambar pengukuran kesalahan jarak puncak ulir.



Gambar 2. 13 Pengukuran kesalahan jarak puncak ulir (Ibrahim dkk, 2019)

2.6. Paduan Titanium

Titanium didefinisikan sebagai bahan logam ringan dengan simbol Ti yang memiliki nomor atom 22, berat atom sebanyak 47.90 dan masa jenis sebanyak 4510 kg/m^3 . Bahan logam titanium ini memiliki suhu peleburan $1667 \text{ }^\circ\text{C}$, lebih tinggi daripada suhu peleburan baja atau aluminium. Secara kimiawi, bahan ini memiliki sifat yang mirip dengan zirkonium dan silikon serta memiliki sifat yang sangat tahan karat. Material titanium ini pertama kali ditemukan adalah sebagai bahan logam ke-empat terbanyak dijumpai di atas bumi ini, sehingga jumlahnya mencapai 0.62% daripada kerak bumi (Ibrahim, 2020).

Titanium adalah logam transisi berdensitas rendah dan juga memiliki sifat elektropositif dan mudah bersenyawa dengan karbon sehingga titanium sulit untuk dimurnikan. Titanium juga merupakan logam yang sangat atraktif karena merupakan logam yang ringan tetapi mempunyai sifat yang kuat. Titanium dan paduan titanium telah digunakan secara besar-besaran di bidang industri pesawat terbang karena bahan ini memiliki sifat unggul antaranya adalah kombinasi

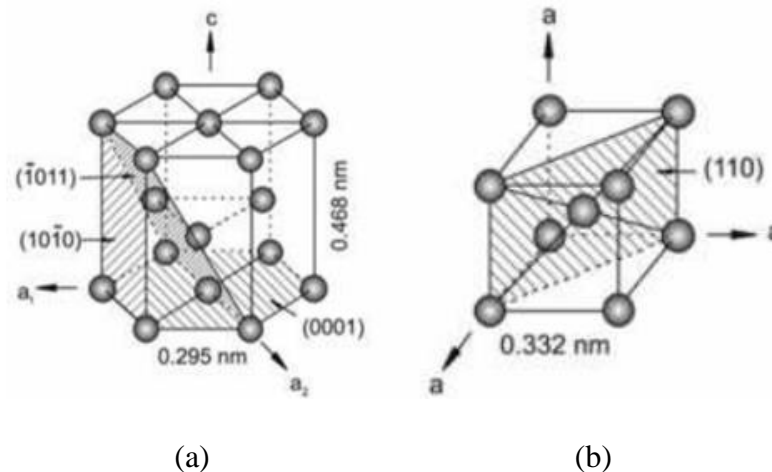
rasio antara kekuatan dan berat yang baik pada temperatur tinggi (*strength-to-weight ratio*), memiliki sifat tahan patah, dan sifat tahan korosi pada suhu tinggi (Ibrahim, 2014). Paduan titanium dapat dilihat pada Gambar 2. 14 di bawah ini.



Gambar 2. 14 Titanium paduan berbentuk silinder pejal (Fariza, 2017)

Oleh karena itu titanium banyak digunakan dalam industri, penerbangan, biomedis, elektronik dan benda mikroskopis lainnya. Titanium juga merupakan logam yang sangat familiar dalam kehidupan manusia, banyak orang mengetahui bahwa titanium dapat digunakan sebagai perhiasan, elektronik, alat kedokteran dan produk lainnya yang membutuhkan kekuatan material. Dalam bidang kesehatan, titanium juga digunakan sebagai tulang buatan atau implan karena sifatnya yang bio kompatibel (Ibrahim dkk, 2020).

Pada umumnya titanium merupakan elemen alotropi atau logam yang memiliki lebih dari satu bentuk kristal seperti pada Gambar 2. 15 di halaman selanjutnya. Titanium mempunyai struktur kristal berbentuk paket menyerupai heksagon atau *Hexagonal Close Packet* (HCP) yang dikenal dengan fase alfa pada suhu ruangan. Keadaan ini akan berubah kepada struktur *Body Center Cubic* (BCC) yang disebut juga sebagai fasa beta pada suhu 882 °C.



Gambar 2. 15 Struktural kristal titanium (a. *Hexagonal Close Packed*) dan (b. *Body Centered Cubic*) (Rifai, 2018)

Titanium 6Al-4V ELI adalah titanium fase alfa-beta yang mengandung 6% aluminium dan 4% vanadium. Jenis titanium ini umumnya digunakan untuk *pressure vassel*, baling-baling turbin gas pesawat, dan implan biomedis. Titanium 6Al-4V memiliki kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik serta tahan korosi. Bahan paduan titanium $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V ELI, telah digunakan dalam aplikasi ortopedi karena memiliki biokompatibilitas dan kemampuan *load bearing* serta modulus elastisitas yang relatif rendah. Sehingga dapat mereduksi efek *stress shielding* ketika implantasi. Sifat fisik dan mekanis yang baik seperti kekerasan, kekuatan, kekuatan *fatigue* yang tinggi, densitas rendah, dan ketahanan korosi yang baik merupakan keunggulan titanium sebagai bahan implan. Implantasi material titanium menghasilkan respon inflamasi, hipersensitivitas dan alergi yang rendah ketika berkontak dengan lingkungan biologis tubuh (Gunawarman dkk, 2020).

2.7. Pemesinan Titanium

Titanium dikenal sebagai bahan yang sulit dipotong (*difficult to cut material*). Hal ini disebabkan oleh sifat titanium yang mudah bereaksi dengan material pahat sehingga cenderung membentuk *build-up-edge* dan melekat pada

permukaan pahat potong. Konduktivitas termal yang rendah dari titanium menyebabkan kerusakan pada permukaan material yang dipotong, sehingga menghasilkan kualitas permukaan yang buruk, adanya abrasi dan kerusakan mikrostruktur. Konduktivitas termal yang rendah dari paduan titanium akan menyebabkan suhu pada ujung pahat meningkat yang akan menyebabkan kegagalan pahat yang cepat, penyerpihan pada ujung pahat akan menyebabkan kondisi permukaan bahan yang dimesin menjadi rusak, yang ditandai dengan kekasaran dan permukaan yang tidak seragam. Hal ini tidak hanya menyebabkan nilai kekasaran permukaan yang tinggi, akan tetapi juga menyebabkan kerusakan mikrostruktur, hal ini juga berkontribusi terhadap kerusakan permukaan (Ibrahim dkk, 2020).

Kekasaran permukaan merupakan hal yang sangat penting bagi suatu material. Hal ini dikarenakan material yang nantinya akan dijadikan suatu komponen harus memiliki nilai kekasaran tertentu agar sesuai dengan fungsi komponen tersebut. Pemesinan pada paduan titanium memerlukan gaya potong yang sedikit lebih besar daripada gaya potong yang digunakan untuk pemesinan baja. Sifat logam paduan titanium menyulitkan dalam proses pemesinan, sehingga dalam melakukan pemesinan memerlukan biaya tambahan yang signifikan dibandingkan dengan pemesinan baja dengan tingkat kekerasan yang sama. Keberhasilan dalam pemesinan titanium tergantung bagaimana mengatasi beberapa sifat yang dimilikinya. Sifat-sifat titanium tersebut antara lain sebagai berikut (Rifai, 2018):

1. Konduksi Panas

Titanium adalah konduktor panas yang buruk. Panas yang dihasilkan selama proses pemotongan tidak cepat menghilang. Oleh karena itu, sebagian besar panas akan terkonsentrasi pada tepi pemotongan dan permukaan pahat. Hal ini akan mempengaruhi umur pahat yang digunakan.

2. Sifat Paduan

Titanium cenderung membentuk sifat paduan yang kuat, atau mudah bereaksi secara kimia dengan material pada suhu tinggi selama proses pemotongan. Hal ini berpotensi menyebabkan alat potong lebih cepat aus.

3. Modulus Elastisitas

Titanium memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah daripada besi dan *superalloy* tetapi memiliki “*springiness*” yang lebih dibandingkan dengan logam-logam tersebut. Hasilnya adalah defleksi benda kerja yang lebih besar.

4. Karakteristik *work hardening*

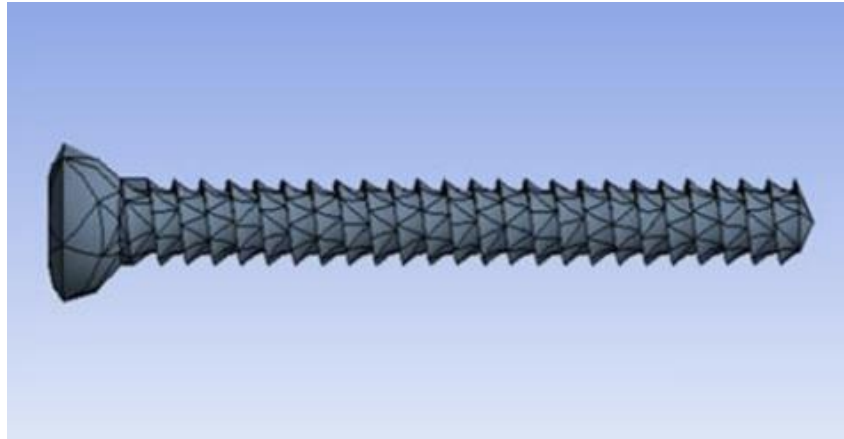
Karakteristik pengerasan pada titanium dapat ditunjukkan dengan adanya “*built-up-edge*”. Munculnya *built-up-edge* pada tepi alat potong menyebabkan peningkatan suhu pada sebagian area alat potong. Sehingga meningkatkan keausan pahat dan mengurangi masai pakai pahat.

2.8. Baut Ulir Tulang

Baut ulir adalah alat yang kompleks dengan konstruksi empat bagian: kepala, poros, ulir, dan ujung. Penggunaan baut ulir dan pelat dalam bidang kedokteran pertama kali didokumentasikan pada tahun 1880-an dan 1890-an. Implan ortopedi dapat didefinisikan sebagai perangkat medis yang digunakan untuk menggantikan atau memberikan fiksasi tulang, atau untuk mengganti permukaan artikulasi sendi. Implan ortopedi terutama terbuat dari biomaterial. Biomaterial telah didefinisikan sebagai bahan yang digunakan dalam alat kesehatan dan dimaksudkan untuk berinteraksi dengan sistem biologis tubuh makhluk hidup.

Dalam pengembangan implan medis, banyak pertimbangan, antara lain sifat mekanik (kekuatan, daya tahan, dan sebagainya), fungsi (interaksi antara implan dan tubuh), dan hubungan antara implan dengan desain tertentu.

Pertama dan terpenting adalah biomaterial harus kompatibel dengan tubuh manusia. Banyak jenis biomaterial yang digunakan, termasuk logam, paduan, keramik, polimer, komposit, dan kaca. Logam yang umum digunakan adalah paduan titanium, baja tahan karat, dan paduan Co-Cr. Contoh baut ulir tulang dapat dilihat pada Gambar 2. 16 di bawah ini.



Gambar 2. 16 Baut ulir tulang (Nashrullah, 2016)

Ketika manusia mengalami patah tulang, salah satu cara menanganinya adalah dengan metode fiksasi internal. Metode ini adalah pembedahan untuk menempatkan dan memasang pelat logam yang diperkuat dengan baut ulir di sekitar tulang yang retak. Implan ini bersifat sementara, setelah tulang pulih maka pelat dan baut ulir dapat diambil melalui operasi kembali. Tujuan utama dari setiap teknik fiksasi ortopedi adalah untuk mempertahankan keselarasan anatomi, memberikan stabilitas fraktur untuk memfasilitasi penyembuhan, dan meningkatkan bantalan beban untuk memfasilitasi rehabilitasi.

Peran pelat tulang dan baut ulir adalah untuk menahan segmen tulang yang patah pada posisinya tanpa membiarkan tegangan tarik pada permukaan yang retak dan untuk memberikan sejumlah tegangan tekan yang kritis pada antarmuka patahan untuk mempercepat penyembuhan tulang. Dua kelemahan utama fiksasi internal adalah gangguan suplai darah dan melindungi tulang di bawahnya dan celah fraktur dari tekanan mekanis. Untuk mengatasi masalah

vaskularisasi dan paparan bedah, perangkat keras ortopedi dipasang dengan sangat hati-hati untuk melindungi jaringan lunak, dan meminimalkan pengupasan jaringan lunak untuk mengurangi devaskularisasi tulang.

Ada beberapa jenis baut ulir tulang yang dapat dikelompokkan berdasarkan kepadatan tulang, fungsinya, cara pemasangannya, dan kemampuan mengunci (Nashrullah, 2016):

1. Berdasarkan kepadatan tulang

Berdasarkan kepadatan tulang, *screw* dapat dikelompokkan ke dalam dua jenis, yaitu *cortical screw* dan *cancellous screw* (Gambar 2. 17 di bawah ini). *Cortical screw* dirancang untuk digunakan dalam tulang keras kortikal dan sepenuhnya berulir sepanjang poros. Sebuah *cortical screw* memiliki rasio inti terhadap *thread* yang lebih besar dari *cancellous screw*. *Cortical screw* memiliki diameter *root* yang relatif luas, *thread pitch* yang kecil dan lebih pendek dibandingkan dengan *cancellous screw*. Sedangkan *cancellous screw* memiliki *thread pitch* yang lebih lebar dan ulir yang mendalam untuk meningkatkan daya tahan *screw* pada tulang trabekular atau tulang *cancellous* (berongga) dari bagian epifisis. Epifisis adalah ujung bulat dari tulang panjang di sendi.

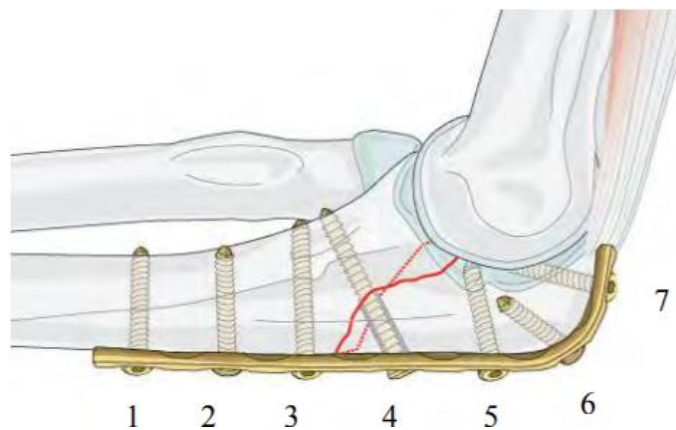


Gambar 2. 17 (a) *cortical screw*, dan (b) *cancellous screw* (Nashrullah, 2016)

2. Berdasarkan fungsinya

Screw dapat dikelompokkan ke dalam tiga jenis, yaitu *plate screw*, *lag screw*, dan *positional screw* (Gambar 2. 18 di halaman selanjutnya). *Plate screw* dirancang untuk mempererat plat ke tulang, biasanya diletakkan

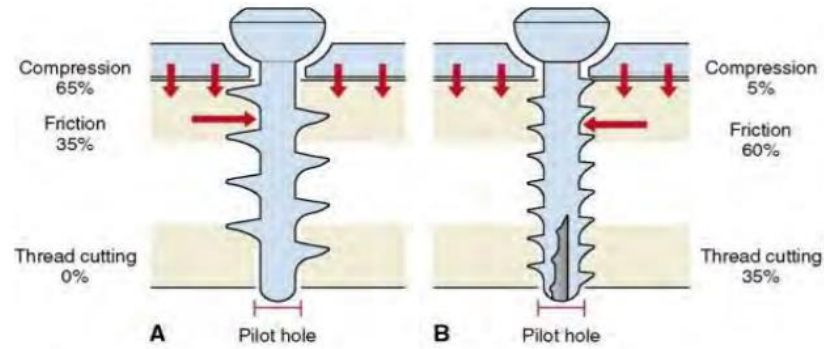
diujung lubang pelat (no. 1 dan 7). *Lag screw* dirancang untuk menghasilkan kompresi interfragmentari. *Screw* ini ditempatkan sedemikian rupa sehingga *thread* mengikat daerah tulang retak (no. 4). Sementara *positional screw* digunakan untuk mempertahankan posisi relatif fragmen tulang yang lebih kecil ketika rekonstruksi anatomi luas diterapkan. *Screw* ini tidak menghasilkan kompresi interfragmentari (No. 2, 3, 5, dan 6).



Gambar 2. 18 Jenis *screw* berdasarkan fungsinya di dalam tulang
(Nashrullah, 2016)

3. Berdasarkan cara pemasangannya

Berdasarkan hal tersebut *screw* dapat dikelompokkan ke dalam dua jenis, yaitu *self-tapping* dan *nonself-tapping* (Gambar 2. 19 di halaman selanjutnya). *Self-tapping* adalah jenis yang dapat membuat lubang masuknya sendiri di dalam tulang ketika dimasukkan dengan cara dipuntir. Sedangkan *nonself-tapping* adalah jenis yang membutuhkan lubang terlebih dahulu agar bisa dimasukkan ke dalam tulang.



Gambar 2. 19 (a) *self-tapping screw* dan (b) *nonsel-tapping screw*
(Nashrullah, 2016)

4. Berdasarkan kemampuan mengunci

Berdasarkan hal tersebut *screw* dapat dikelompokkan ke dalam dua jenis, yaitu *standard screw* dan *locking screw* (Gambar 2.20 di bawah ini). *Standard screw* merupakan jenis *screw* konvensional dengan kepala *screw* yang tidak memiliki ulir, sehingga *screw* tidak mengunci pelat dan tulang. Akibatnya *screw* mudah bergerak dengan bebas dan fleksibel, namun lebih mudah bergeser. Sementara *locking screw* memiliki kekuatan lentur dan tegangan geser yang lebih tinggi pada daerah sambungan antara *screw*/tulang dan *screw*/plat dari *standard screw*. Kepala *screw* memiliki profil ulir yang bergerak sesuai dengan lubang pada plat untuk memproduksi sudut fiksasi yang stabil.



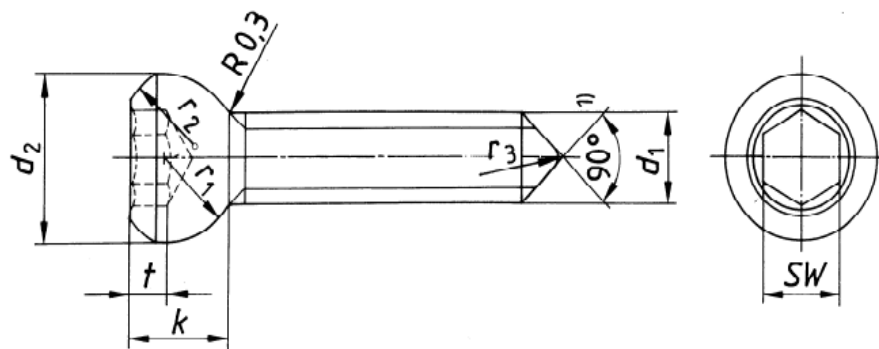
(a)

(b)

Gambar 2. 20 (a) *locking screw* dan (b) *standard screw* (Nashrullah, 2016)

2.9. Geometri Baut Ulir Tulang

Baut ulir tulang terbagi menjadi dua jenis yang sering digunakan dengan dimensi berbeda sesuai kebutuhan yang diperlukan. Jenis baut ulir tulang dapat diidentifikasi melalui kode yang sesuai dengan standar internasional. Kode HA (*screw with shallow thread*) digunakan untuk *cortical screw* yang memiliki ulir dangkal. Kode HB (*screw with deep thread*) digunakan untuk *cancellous screw* yang memiliki ulir dalam. Berikut ini akan dilampirkan dimensi sekrop ulir dangkal pada Gambar 2. 21 di bawah ini beserta ukurannya yang tertera pada Tabel 2. 1 di halaman selanjutnya dan dimensi ulir dangkal pada Gambar 2. 22 di halaman selanjutnya beserta ukurannya yang tertera pada Tabel 2. 2 di halaman 34 (ISO5835, 1991).



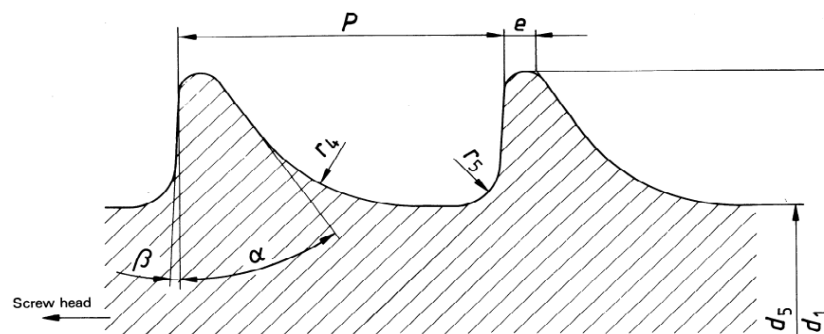
Gambar 2. 21 Dimensi baut ulir dangkal (ISO5835, 1991)

Keterangan:

- d1 = diameter mayor
- d2 = diameter kepala baut
- r1 = jari-jari *fillet* leher baut
- r2 = jari-jari *fillet* kepala atas baut
- r3 = jari-jari *fillet* ujung baut
- k = Panjang kepala baut
- t = kedalaman lubang hexagon
- SW = jenis lubang hexagon

Tabel 2. 1 Dimensi baut ulir tipe HA

Code and diameter of thread	Nominal diameter d_1	d_2		$k \approx$	$r_1 \begin{matrix} +0,25 \\ 0 \end{matrix}$	$r_2 \approx$	$r_3 \approx$	SW F10 ¹⁾	t min
			tol.						
HA 1,5	1,5	3	0	1,6	1,5	1,5	0,3	1,5	0,8
HA 2,0	2	4	-0,1	1,9	2	2	0,4	1,5	1
HA 2,7	2,7	5	0	2,3	2,5	2,5	0,4	2,5	1,2
HA 3,5	3,5	6	-0,15	2,6	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4	4	6		2,4	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4,5	4,5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8
HA 5	5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8



Gambar 2. 22 Dimensi ulir dangkal HA (ISO5835, 1991)

Keterangan:

d_1 = diameter mayor

d_5 = diameter minor

r_4 = radius r_4 pahat

r_5 = radius r_5 pahat

α = sudut α

β = sudut β

P = jarak puncak ulir

e = lebar puncak ulir

Tabel 2. 2 Dimensi ulir dangkal HA

Code and diameter of thread	d_1 0 -0,15	d_5		e \approx	P	r_4 \approx	r_5 \approx	α \approx	β \approx
			tol.						
HA 1,5	1,5	1,1	0	0,1	0,5	0,3	0,1	35°	3°
			-0,1						
HA 2,0	2	1,3		0,1	0,6	0,4	0,1	35°	3°
HA 2,7	2,7	1,9	0	0,1	1	0,6	0,2	35°	3°
			-0,15						
HA 3,5	3,5	2,4		0,1	1,25	0,8	0,2	35°	3°
HA 4	4	2,9		0,1	1,5 ^{1) 2)}	0,8	0,2	35°	3°
HA 4,5	4,5	3		0,1	1,75	1	0,3	35°	3°
HA 5	5	3,5		0,1	1,75	1	0,3	35°	3°

2.10. Hubungan Metode Taguchi dan Metode *Grey Relational Analysis*

Metode Taguchi adalah salah satu metode untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*. Metode Taguchi biasanya digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dengan satu respon. Untuk kasus multirespon dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Grey Relational Analysis* (GRA). Dengan GRA diperoleh beberapa nilai *Grey Relational Grade*. Pada dasarnya metode GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah kasus multirespon menjadi satu respon. Teori ini berhubungan dengan Metode Taguchi yang menunjukkan sebuah pendekatan optimasi yang lebih baru (Wulandari, 2016).

2.11. Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan salah satu metode yang digunakan dalam kegiatan *Off-line quality control* pada tahap desain proses produksi. Taguchi mengartikan bahwa produk dengan karakteristik mutu yang hanya memenuhi spesifikasi toleransi tidak cukup sebagai hasil produk yang ideal. Metode Taguchi menggunakan pendekatan desain eksperimen yang berguna untuk (Harahap dkk, 2018):

1. Merancang suatu produk sehingga mutu kokoh terhadap kondisi lingkungan.
2. Mengembangkan produk sehingga mutu terhadap variasi komponen.
3. Meminimalkan variasi disekitar target.

2.12. Karakteristik Kualitas dan *Signal to Noise Ratio*

Menurut Taguchi, ada tiga ciri kualitas, yaitu *nominal is the best*, *smaller is better*, dan *larger is better*. Sedangkan cara untuk mengetahui karakteristik suatu percobaan adalah dengan menggunakan *Signal to Noise Ratio* (SN Ratio). SN Ratio merupakan *concurrent statistic* yaitu cara untuk melihat karakteristik dari distribusi dan pengaruh karakteristik tersebut pada masing-masing percobaan. *Mean Square Deviation* (MSD) adalah pengukuran berdasarkan mean dan standar deviasi data. Beberapa tipe karakteristik kualitas SN Ratio dari respon adalah sebagai berikut (Anggraini dkk, 2015):

1. *Nominal is the best*

Nominal is the best adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan:

$$\begin{aligned} \text{SN Ratio} &= 10 \log [\text{MSD}_n] \\ &= 10 \log [xi(j) - m^2] \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

Dimana:

$x_i^*(j)$ = nilai eksperimen ke-i pada respon ke-j

m = nilai target spesifikasi

2. *Smaller is better*

Smaller is better adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. *SN Ratio* untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{SN Ratio} &= -10 \log [\text{MSDs}] \\ &= -10 \log [x_i(j)^2] \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

3. *Larger is better*

Larger is better adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. *SN Ratio* untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

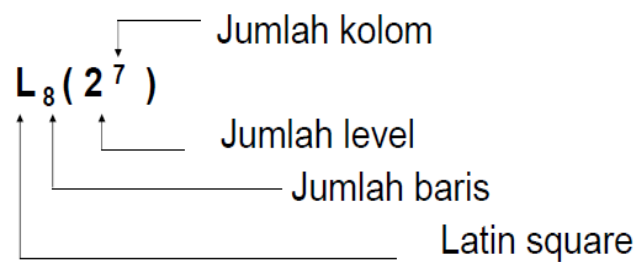
$$\begin{aligned} \text{SN Ratio} &= -10 \log [\text{MSDl}] \\ &= -10 \log \left[\frac{1}{x_i(j)^2} \right] \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

2.13. *Orthogonal Array*

Matriks *orthogonal array* digunakan untuk menentukan jumlah percobaan minimum yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin tentang variable-variabel yang mempengaruhi hasil percobaan. *Array* disebut *orthogonal* dikarenakan setiap level dari masing-masing faktor seimbang dan dapat dipisah dari pengaruh faktor yang lain dalam percobaan. *Orthogonal array* merupakan matriks faktor dan level yang disusun sedemikian rupa sehingga pengaruh suatu faktor dan level tidak berbaur dengan faktor dan level lain. Bagian paling penting dari *orthogonal array* terletak pada pemilihan kombinasi level dari variabel-variabel input untuk masing-masing percobaan (Rifai, 2018).

Tabel *orthogonal array* terdiri dari kolom dan baris dimana jumlah baris menyatakan jumlah eksperimen yang dilakukan sedangkan jumlah kolom menyatakan jumlah faktorial. Pada *orthogonal array* memiliki notasi yang berfungsi sebagai lambang dan keterangan jenis data yang akan dibuat seperti tampak pada Gambar 2. 23 berikut ini.

■ Notasi OA



Gambar 2. 23 Notasi OA (Andriani, 2014)

Penentuan derajat bebas berdasarkan pada:

1. Jumlah faktor utama yang diamati dan juga interaksi yang diamati.
2. Jumlah level faktor yang diamati.
3. Estimasi percobaan yang diharapkan atau batasan biaya.
 - a. Angka dalam pemilihan *array* menunjukkan banyaknya percobaan yang dilakukan dalam *array*, suatu matriks L_8 memiliki delapan percobaan dan matriks L_9 memiliki Sembilan percobaan dan seterusnya.
 - b. Jumlah level yang digunakan dalam faktor digunakan untuk memilih *orthogonal array*. Jika faktor yang ditetapkan berlevel dua maka harus digunakan *orthogonal array* dua level. Jika level yang digunakan tiga maka *orthogonal array* tiga level.

Tabel 2. 3 Contoh matriks *orthogonal array* $L_8(2^7)$

NO	Matriks <i>Orthogonal</i>						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	1	1	2
6	2	1	2	2	2	2	1
7	2	2	1	1	1	2	1
8	2	2	1	2	2	1	2

2.14. *Grey Relational Analysis (GRA)*

Metode Taguchi biasanya hanya dapat digunakan untuk mengoptimasi satu respon saja. Untuk optimasi beberapa respon dengan Metode Taguchi dapat digunakan pendekatan dengan *Grey Relational Analysis (GRA)*. Teori GRA ditemukan oleh Deng pada periode 1980-an. Pada dasarnya Metode GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon saja. Teori ini berhubungan dengan metode Taguchi yang menunjukkan sebuah pendekatan optimasi yang lebih baru. Pada awalnya, teori GRA mengadopsi teori *Grey* yang sudah lama ditemukan sebelumnya.

Teori *Grey* berasal dari hasil pencampuran antara informasi yang jelas dan tidak jelas. Misalnya, hitam dilambangkan sebagai informasi yang tidak jelas, yang bisa diartikan sebagai informasi yang belum sempurna. Sedangkan putih sebaliknya dilambangkan informasi yang benar-benar jelas. Tetapi suatu saat informasi bisa berada diantara perpaduan hitam dan putih yang dikenal dengan

abu-abu, informasi yang mempunyai beberapa hal yang jelas dan tidak jelas atau kurang sempurna (Wulandari, 2016).

Proses *Grey Relational Analysis* sendiri merupakan pendekatan kuantitatif dan sistematis, yang merupakan subsistem dari *Grey System Theory* dan digunakan secara luas untuk menyelesaikan suatu sistem yang rumit. GRA dapat digunakan dalam bidang finansial, logistik dan juga proses optimasi. GRA dapat digunakan secara efektif untuk masalah-masalah *multiple* kriteria dan hubungan rumit yang terjadi diantara masing-masing kriteria, serta dapat digunakan untuk optimasi proses parameter yang dipengaruhi 2 atau lebih respon variabel (Patil et al., 2019).

Grey Relational Analysis (GRA) adalah sebuah alat optimasi yang sangat baik untuk mengatasi masalah hubungan yang kompleks antara multi objek pada berbagai bidang manufaktur. GRA menggunakan harga *Grey Relation Generation* untuk menghitung *Grey Relation Coefficient*, untuk memperhitungkan permasalahan sistem yang kompleks dengan informasi yang diketahui bersifat tidak pasti dan sebagian. Harga *Grey Relation Grade* (GRG) ditemukan dengan merata-rata harga *Grey Relation Coefficient* pada respon masing-masing untuk mengkonversi multi respon karakteristik kedalam harga respon tunggal GRG. Level dari parameter dengan harga *Grey Relation Grade* tertinggi adalah level optimum untuk proses optimasi multi objektif pada percobaan.

Langkah awal pada analisa GRA yaitu menormalisasi data yang dikenal sebagai *Grey Relational Generation* (*data pre-processing*). Tiap respon yang diamati dalam eksperimen dinormalisasi kedalam rentang harga 0-1 (0 untuk harga minimum respon, dan 1 harga maksimum), untuk mendapatkan nilai sekuensi yang mampu dibandingkan, karna sebelumnya harga tiap respon berbeda dimensi dan jangkauannya. Untuk menormalisasi data tersebut digunakan formulasi yang ada pada halaman selanjutnya.

$$xi^*(k) = \frac{xi(k) - \min xi(k)}{\max xi(k) - \min xi(k)} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

$xi(k)$ = nilai *Grey Relational Generation*

$\min xi(k)$ = nilai terkecil $xi(k)$

$\max xi(k)$ = nilai terbesar $xi(k)$

Kemudian mengkalkulasikan nilai *Grey Relational Coefficient*, nilai ini dibutuhkan agar didapatkan suatu nilai yang dapat diubah kedalam respon tunggal *Grey Relational Grade*. Nilai *Grey Relational Coefficient* dihitung menggunakan formulasi:

$$\zeta i(k) = \frac{\Delta \min + \zeta \Delta \max}{\Delta oi(k) + \zeta \Delta \max} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana $\Delta oi = \|x_o(k) - x_i(k)\|$ = yaitu selisih absolut antara harga $x_o(k)$ dan $x_i(k)$. adalah koefisien yang ditetapkan, untuk percobaan ini digunakan harga 0,5 yaitu harga yang paling sering digunakan.

Kemudian langkah akhir menghitung *Grey Relational Grade*, dimana merupakan rata-rata dari *Grey Relational Coefficient* tiap respon. Harga dari *Grey Relational Grade* dapat dicari dengan formulasi berikut:

$$\gamma i = \frac{1}{n} \sum \zeta i(k) \dots\dots\dots(10)$$

Dari harga *Grey Relational Grade* inilah kita dapat menentukan nilai optimum untuk percobaan yang dilakukan, karna *Grey Relational Grade* adalah hasil konversi multi respon yang diamati menjadi respon tunggal (Pandey et al., 2015). Setelah menentukan kondisi optimum, dilakukan Anova untuk mengidentifikasi nilai pengaruh antar parameter untuk percobaan yang dilakukan dalam bentuk persentase, sehingga dapat diambil kesimpulan diantara parameter-parameter yang digunakan, terdapat satu parameter yang

lebih dominan atau berpengaruh ke eksperimen. Berikut ini akan ditampilkan contoh hasil optimasi menggunakan Metode *Grey Relational Analysis* yang dilakukan oleh Falah (2020) pada Tabel 2. 4.

Tabel 2. 4 Contoh hasil optimasi Metode GRA

No	GRG	Rank
1	0.5648	3
2	0.5121	5
3	0.6908	1
4	0.4580	7
5	0.6293	2
6	0.3443	9
7	0.5378	4
8	0.4794	6
9	0.3473	8

2.15. *Analysis of Varians (ANOVA)*

Uji ANOVA adalah bentuk khusus dari analisis statistik yang banyak digunakan dalam penelitian eksperimen. metode analisis ini dikembangkan oleh R.A Fisher. Uji ANOVA juga adalah bentuk uji hipotesis statistik dimana kita mengambil kesimpulan berdasarkan data atau kelompok statistik inferentif. Hipotesis nol dari uji ANOVA adalah bahwa data adalah *sample random* dari populasi yang sama sehingga memiliki ekspektasi *mean* dan *varians* yang sama. Sebagai contoh penelitian perbedaan perlakuan terhadap sampel pasien yang sama. Hipotesis nol nya adalah semua perlakuan akan memiliki efek yang sama (Marpaung dkk, 2017).

Tabel 2. 5 ANOVA dua arah

Sumber variasi	Sum of square (SS)	Derajat Bebas (db)	Mean square (MS)	F hitungan	P-value	kontribusi
Faktor A	SS _A	V _A	MS _A	MS _A / MS _B		SS'A/SS _t
Faktor B	SS _B	V _B	MS _B	MS _B / MS _e		SS'B/SS _t
Interaksi AXB	SS _{AXB}	V _{AX} V _B	MS _{AXB}	MS _{AXB} / MS _B		SS'AxB/S _{ST}
Residual	SS _e	V _e	MS _e	1		SS'e/SS _t
Total	SS _T	V _T				100%

Dimana:

V_A = derajat bebas faktor A = k_A -1= (level-1)

V_B = derajat bebas faktor B = k_B -1

V_{AXB} = derajat bebas interaksi = (k_A -1) x (k_B-1)

V_T = derajat bebas total = N-1

V_e = derajat bebas error = V_T- V_A- V_B- (V_{AB})

SS_{Total} = jumlah kuadrat total

$$SS_{Total} = \sum Y^2 \dots\dots\dots(11)$$

SS_A = Jumlah kuadrat faktor A

SS_A = n_{A1}x A1² + n_{A2}x A2² – SS_{Mean} (untuk level 2)

Dengan cara yang sama dapat dihitung nilai SS_B dan SS_{AXB}.

SS_E = Jumlah kuadrat error
 = SS_{Total} – SS_{Mean} – SS_A – SS_B - SS_{AXB}

MS_A = Rata-rata jumlah kuadrat faktor A = SS_A- V_a

Untuk MS_B dan MS_{AXB} dihitung dengan menggunakan cara yang sama.

MS_e = Rata-rata kuadrat error = $\frac{SS_e}{V_e}$

k_A = Jumlah level untuk faktor A

N = Jumlah total percobaan

SS'A = SS_A- (V_A-MS_e), cara yang sama untuk mencari SS'B dan SS'AxB

$$SS'e = SSt - SS'A - SS'B - SS'AxB$$

$$SS't = \text{Sama dengan } SSt \text{ yaitu total persen kontribusi} = 100\%$$

2.16. P-value

Definisi *P-value* adalah tingkat keberartian terkecil sehingga nilai suatu uji statistik yang sedang diamati masih berarti. Misal, jika *P-value* sebesar 0.021, hal ini berarti bahwa jika H_0 dianggap benar, maka kejadian yang disebutkan di dalam H_0 hanya akan terjadi sebanyak 21 kali dari 1000 kali percobaan yang sama. Oleh karena sedemikian kecilnya peluang terjadinya kejadian yang disebutkan di dalam H_0 tersebut, maka kita dapat menolak *statement* (pernyataan) yang ada di dalam H_0 . Sebagai gantinya, kita menerima *statement* yang ada di H_1 . *P-value* dapat pula diartikan sebagai besarnya peluang melakukan kesalahan apabila kita memutuskan untuk menolak H_0 . Pada umumnya, *P-value* dibandingkan dengan suatu taraf nyata α tertentu, biasanya 0.05 atau 5%. Taraf nyata α diartikan sebagai peluang kita melakukan kesalahan untuk menyimpulkan bahwa H_0 salah, padahal sebenarnya *statement* H_0 yang benar. Kesalahan semacam ini biasa dikenal dengan galat/kesalahan jenis I (*type I error*, baca = *type one error*). Misal α yang digunakan adalah 0.05, jika *p-value* sebesar 0.021 (< 0.05), maka kita berani memutuskan menolak H_0 . Hal ini disebabkan karena jika kita memutuskan menolak H_0 (menganggap *statement* H_0 salah), kemungkinan kita melakukan kesalahan masih lebih kecil daripada $\alpha = 0.05$, dimana 0.05 merupakan ambang batas maksimal dimungkinkannya kita salah dalam membuat keputusan (Kurniawan, 2008).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan dari bulan Desember 2021 sampai dengan April 2022. Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Tabel 3. 1 Rencana kegiatan penelitian

Kegiatan penelitian	Desember				Januari				Februari				Maret				April			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 Studi Literatur	■	■	■	■																
2 Persiapan Alat dan Bahan Penelitian					■	■	■	■	■											
3 Pengujian dan Pengambilan Data									■	■	■	■								
4 Pengolahan Data													■	■	■	■				
5 Pembuatan Laporan Akhir																	■	■	■	■

3.2. Bahan dan Perangkat Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1. Material Ti-6Al-4V ELI

Ti-6Al-4V ELI adalah titanium paduan yang dikenal memiliki kekuatan spesifiknya yang tinggi, ketahanan terhadap korosi dan biokompatibilitas yang sangat baik. Dianggap sebagai material yang populer digunakan dalam bidang *biomedic* setelah magnesium, Ti-6Al-4V ELI telah menjadi bahan yang diminati dalam industri biomedis. Terutama dalam bidang implant tulang, karena titanium itu sendiri memiliki sifat biokompatibilitas yaitu apabila dimasukkan kedalam tubuh tidak terjadi bereaksi terhadap jaringan di dalam tubuh.



Gambar 3. 1 Paduan titanium 6Al-4V ELI (Fariza, 2017)

Titanium 6Al-4V ELI memiliki kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik serta memiliki ketahanan terhadap korosi. Komposisi kimia dan karakteristik fisik dapat dilihat pada Tabel 3. 2 dan Tabel 3. 3 di halaman selanjutnya:

Tabel 3. 2 Kandungan paduan titanium Ti-6Al-4V ELI (Ibrahim, 2014).

Kandungan	C	Si	Fe	Al	N	V	S	O	H	Y
Persentase	0,	0,03	0,18	6,1	0,00	4,0	0,00	0,11	0,03	0,0
%	11				7		3		1	05

Tabel 3. 3 Sifat fisika paduan titanium Ti-6Al-4V ELI (Ibrahim, 2014).

Tegangan Tarik	132x103 Psi
Tegangan yield pada offset 2%	119x103 Psi
Perpanjangan	17/14%
%Ra	42.0

3.2.2. Mesin bubut

Bubut sendiri merupakan suatu proses pemakanan benda kerja yang sayatannya dilakukan dengan cara memutar benda kerja kemudian dikenakan pada pahat yang digerakkan secara translasi sejajar dengan sumbu putar dengan benda kerja. Gerakan putar dari benda kerja disebut gerak potong relatif dan gerakan translasi dari pahat disebut gerak makan.

Gambar 3. 2 Mesin bubut CNC *Feeler* FTC-350XL

3.2.3. Pahat ulir

Pada penelitian ini pahat ulir yang digunakan adalah pahat yang dibuat sendiri dengan mengacu pada standar geometri yang ada.



Gambar 3. 3 Pahat ulir *carbide*

3.2.4. *Profile projector*

Profile projector berfungsi sebagai alat mengukur dimensi pada ulir yang akan dikerjakan, alat ini dapat membantu untuk mengukur diameter minor, diameter mayor, dan besar sudut. Prinsip kerja alat ukur *profile projector* dengan memproyeksikan bayangan pada benda kerja disinari lampu pada *projector*, kemudian proyeksi benda kerja akan ditampilkan di *display* digital sumbu x-y pada *profile projector*. Cara kerja *profile projector* ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Objek uji diletakan di bidang uji dan dijepit.
2. *Projector* dinyalakan sehingga bayangan dari objek terlihat di *display* lensa *projector*.
3. Fokus dari *projector* disesuaikan sampai terlihat jelas.
4. Pengaturan jarak sumbu x-y dipindahkan ke acuan titik dari objek uji secara vertikal atau horizontal.
5. *Display* digital sumbu x-y diatur hingga menunjukkan angka nol.
6. Pengatur jarak sumbu x-y digeser ke titik lain yang ingin diukur jaraknya.



Gambar 3. 4 *Profile projector*

Tabel 3. 4 Spesifikasi *profile projector*

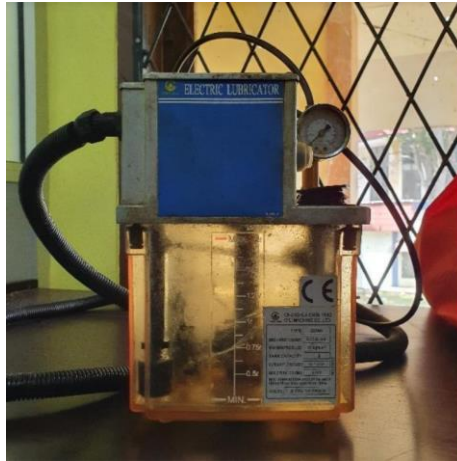
Merk	Mitutoyo
Type	PJ311
Tahun	1986
Ketelitian	1 μm (linear) dan 1 min (sudut)

3.2.5. Minitab

Minitab merupakan suatu *software* yang biasa digunakan dalam proses analisis statistik. Metode *Grey Relational Analysis* merupakan salah satu desain analisis yang dapat diselesaikan dengan bantuan Minitab.

3.2.6. *Changhua Chen Ying Oil Machine*

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



Gambar 3. 5 *Changhua Chen Ying Oil Machine*

Tabel 3. 5 Spesifikasi *Changhua Chen Ying Oil Machine*

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

3.2.7. Pelumas

Terdapat 3 jenis pelumas yang digunakan dalam pemesinan bubut CNC menggunakan metode MQL yaitu:

1. Minyak Sintetis

Tabel 3. 6 Kandungan minyak sintetis

Titik didih awal dan rentang didih	300 - 580°C
Titik nyala	Lebih dari 210°C
Berat jenis	0,875 (air = 1) 15°C
Suhu pengapian otomatis	Sekitar 260 ~ 371°C
Viskositas	Sekitar 41 – 50 cSt 40°C

2. *Virgin Coconut Oil* (VCO)

Virgin Coconut Oil merupakan minyak hasil dari pengolahan buah kelapa. Proses pembuatan VCO tidak menggunakan campuran, sehingga minyak yang dihasilkan adalah minyak murni.

Tabel 3. 7 Kandungan VCO (Bhikuning, 2013)

Density 40°C	901 kg/m ³
Viscosity kin. At 40°C	26,72 cSt
Pour point	21°C
Flash point PMCC	262°C

3. *Virgin Palm Oil* (VPO)

Virgin Palm Oil merupakan minyak hasil dari pengolahan buah kelapa sawit. Proses pembuatan VPO tidak menggunakan campuran, sehingga minyak yang dihasilkan adalah minyak murni.

Tabel 3. 8 Kandungan VPO (Parman, 2020)

Density 15°C	0,908 g/m ³
Viscosity kin. At 40°C	36 cSt
Kandungan kalori	37.600 KJ/kg
Flash point PMCC	260°C

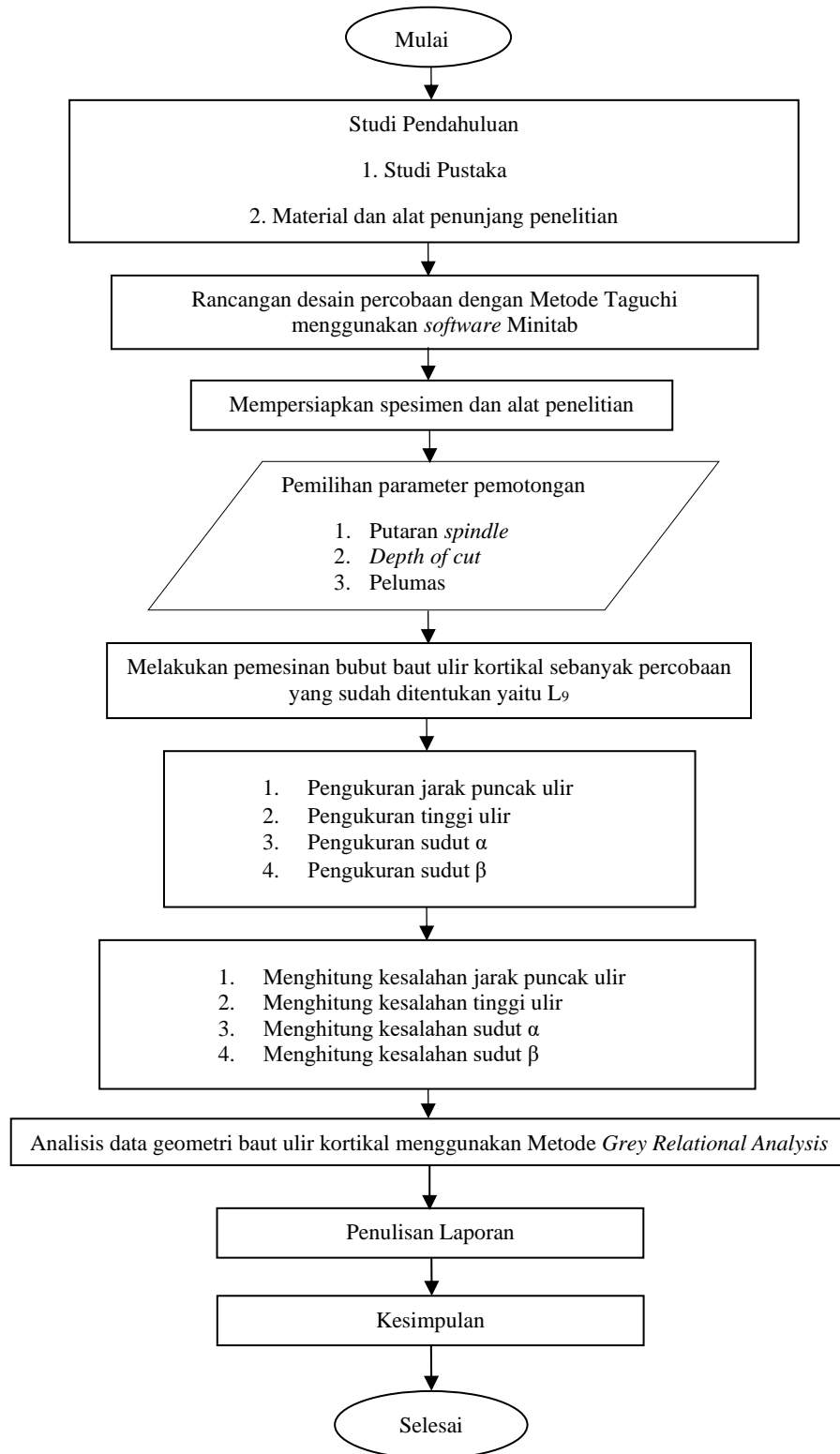
3.3. Desain Parameter Pemesinan

Pada penelitian ini, proses pemotongan material titanium Ti-6Al-4V ELI akan menggunakan mesin bubut CNC. Parameter pemesinan yang akan digunakan pada proses pemotongan ini adalah putaran *spindle* sebesar 100, 200, dan 300 rpm, *depth of cut* sebesar 0,01, 0,02, dan 0,03 mm, dan pelumas yang digunakan adalah minyak sintetis, *virgin palm oil* (VPO), dan *virgin coconut oil* (VCO). Pada Table 3.6 di halaman selanjutnya akan ditampilkan desain parameter pemesinan pada penelitian ini.

Tabel 3. 9 Desain parameter pemesinan

Faktor	Level		
	1	2	3
Kecepatan putaran <i>spindle</i> (rpm)	100	200	300
<i>Depth of cut</i> (mm)	0,01	0,02	0,03
Pelumas	Sintetis	VPO	VCO

3.4. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 6 Diagram alir penelitian

3.5. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.5.1. Tahapan pertama

Tahapan pertama yaitu persiapan alat, bahan dan *set-up* mesin bubut, persiapan alat meliputi pahat bubut datar, pahat bubut muka, pahat ulir, pahat *undercut*, alat ukur *dial caliper* dan *profile projector*. Persiapan bahan material titanium. Kemudian *set-up* mesin bubut diantaranya *setting* pahat pada *tool post* dan cekam benda kerja pada *chuck* kemudian mengatur parameter pemesinan. Bahan yang digunakan adalah titanium (Ti-6Al-4V ELI) yang berbentuk silinder dengan diameter awal sebesar 10 mm.

3.5.2. Tahapan kedua

Tahapan kedua adalah proses pembuatan. Pada tahap ini setelah *set-up* mesin selesai, pahat sudah terpasang di *tool post* dan benda kerja sudah tercekam di *chuck* dengan baik, maka akan dilakukan proses pembubutan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Membubut *facing* muka benda kerja menggunakan pahat bubut muka dengan arah pemakanan melintang.
2. Membuat lubang *center drill* untuk tumpuan *live center* diameter 1 mm sedalam 1 mm.
3. Tumpu menggunakan *live center*, kemudian melakukan pemakanan menggunakan pahat bubut rata kanan dengan arah memanjang, buat diameter 8 mm sepanjang 35 mm.
4. Melakukan pemakanan menggunakan pahat bubut rata kanan dengan arah memanjang, buat diameter 4,5 mm sepanjang 28 mm.
5. Langkah selanjutnya pembuatan ulir. *Set-up* mesin bubut untuk penggunaan pembuatan ulir. Dengan mengganti pahat ulir pada *tool post*, buat ulir pada bagian benda kerja yang berdiameter 4,5 mm sepanjang 28 mm dengan diameter minor sebesar 3,5 mm.

6. Mengecek semua ukuran menggunakan *dial caliper*, apabila ukuran sudah sesuai gambar kerja, potong benda kerja menggunakan pahat *undercut* pada bagian benda berdiameter 8 mm masukan ukuran panjang total 33 mm.
7. Selesai.

3.5.3. Proses pengukuran ulir dengan Profile Projector

Menyiapkan alat ukur *profile projector*, setelah itu menyiapkan spesimen yang telah dilakukan pemesinan, lalu mengatur jarak sumbu x-y pada titik acuan spesimen secara vertikal dan horizontal. Hasil pengukuran diameter mayor, diameter minor, jarak puncak ulir, dan sudut ulir akan ditampilkan pada Tabel 3.7, Tabel 3.8, dan Tabel 3.9.

Tabel 3. 10 Pengukuran diameter mayor dan minor ulir

Pengukuran	Standar diameter ulir		Hasil pengukuran diameter ulir		Pengukuran tinggi ulir
	Diameter Mayor (mm)	Diameter Minor (mm)	Diameter Mayor (mm)	Diameter Minor (mm)	Kesalahan tinggi ulir (mm)
1					
2					
3					
dst					
Rata-rata					

Tabel 3. 11 Pengukuran jarak puncak ulir

Pengukuran	Pengukuran jarak puncak ulir		
	Standar jarak puncak ulir (mm)	Hasil pengukuran jarak puncak ulir (mm)	Kesalahan jarak puncak ulir (mm)
1			
2			
3			
Rata-rata			

Tabel 3. 12 Pengukuran sudut ulir

Pengukuran	Pengukuran sudut ulir		
	Sudut ulir standar	Hasil pengukuran (mm)	Kesalahan sudut ulir
1			
2			
3			
Rata-rata			

3.5.4. Data

Setelah semua proses dilakukan, data yang sudah didapat akan diolah dengan menggunakan metode *Grey Relational Analysis* sehingga dapat diketahui *error* pada geometri ulir dan dicatat pada tabel hasil pengukuran spesimen seperti ditunjukkan pada Tabel 3.10 dan dapat dijelaskan pengaruh tiap parameter terhadap kepresisian geometri ulir.

Tabel 3. 13 Data hasil pengukuran

No	Putaran spindle (rpm)	Depth of cut (mm)	Pelumas	Kesalahan jarak puncak ulir	Kesalahan tinggi ulir	Kesalahan sudut
1	100	0,01	Sintetis			
2		0,02	VPO			
3		0,03	VCO			
4	200	0,01	VPO			
5		0,02	VCO			
6		0,03	Sintetis			
7	300	0,01	VCO			
8		0,02	Sintetis			
9		0,03	VPO			

3.6. Optimasi Multi-respon *Grey Relational Analysis*

Setelah didapatkan harga *SN Ratio* untuk masing-masing respon karakteristik dilanjutkan dengan proses optimasi menggunakan Metode *Grey Relational Analysis*. Langkah pertama yaitu menormalisasi data *SN Ratio* (proses *Grey Relational Generation*) sehingga memiliki rentang harga yang sama antar responnya yaitu pada rentang 0-1. Proses ini dilakukan dengan menghitung harga respon menggunakan rumus:

$$xi^*(k) = \frac{xi(k) - \min xi(k)}{\max xi(k) - \min xi(k)} \dots\dots\dots(12)$$

Langkah selanjutnya setelah harga *SN Ratio* dinormalisasi, yaitu melakukan perhitungan untuk nilai delta dengan menghitung harga $\Delta 0i(k)$, nilai delta merupakan nilai selisih mutlak antara x_0 dan x_i pada titik k atau disebut harga *deviation sequence*.

$$\Delta 0i(k) = |x_0 - x_i| \dots\dots\dots(13)$$

Kemudian mengkalkulasikan nilai *Grey Relational Coefficient*, nilai ini dibutuhkan agar didapatkan suatu nilai yang dapat diubah kedalam respon tunggal *Grey Relational Grade*. Nilai *Grey Relational Coefficient* dihitung menggunakan rumus:

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{oi(k)} + \zeta \Delta_{max}} \dots\dots\dots(14)$$

Setelah didapatkan harga *Grey Relational Coefficient* (GRC), kemudian dilanjutkan proses menghitung harga *Grey Relational Grade* (GRG), merupakan tahapan penggabungan harga GRC pada masing-masing respon menjadi harga respon tunggal yang disebut GRG.

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum \zeta_i(k) \dots\dots\dots(15)$$

Setelah proses ini telah didapatkan suatu data respon tunggal dari respon karakteristik pengamatan, sehingga dapat di-*ranking* pada pengujian mana yang harga GRG-nya paling tinggi sebagai harga optimal inisialnya. Kemudian data *single* respon dapat dilakukan ANOVA sehingga diketahui besaran kontribusi dari masing-masing parameter yang mempengaruhi karakteristik pengujian secara keseluruhan.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Dari pembahasan pada bab sebelumnya maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Faktor yang berpengaruh paling signifikan pada respon gabungan *Grey Relational Grade* yaitu *depth of cut* dengan nilai *P-Value* sebesar 0,004 atau persentase kontribusi sebesar 98%. Selanjutnya faktor yang berpengaruh adalah putaran *spindle* dengan nilai *P-Value* sebesar 0,196 atau persentase kontribusi sebesar 2% dan faktor terakhir yang tidak memiliki pengaruh signifikan adalah pelumas dengan nilai *P-Value* sebesar 0,931 atau persentase kontribusi sebesar 0%.
2. Berdasarkan perhitungan *Grey Relational Analysis*, kombinasi kondisi pemotongan yang paling optimal yaitu pada putaran *spindle* 100 rpm (level 1), *depth of cut* 0,01 mm (level 1), dan pelumas berjenis *virgin coconut oil* (VCO) (level 3).
3. Berdasarkan produk baut ulir kortikal yang telah diperoleh, terdapat kerusakan berupa cacat berupa sisa geram yang masih menempel pada ujung ulir. Cacat tersebut terjadi karena besarnya *depth of cut* sehingga terjadi peningkatan suhu pemotongan dan membuat pahat menjadi lebih cepat aus. Saat pahat mengalami keausan, kontak pahat dengan benda kerja akan semakin lebar dan menyebabkan gaya potong semakin tinggi. Sedangkan titanium memiliki sifat konduktivitas termal yang rendah sehingga menyebabkan kerusakan permukaan pada benda kerja berupa sisa geram yang masih menempel pada ulir.

5.2. Saran

Dalam penelitian ini penulis memberikan saran untuk pengembangan yang lebih baik selanjutnya, diantaranya:

1. Pada penelitian ini belum dilakukan kajian mengenai pahat potong, sementara hubungan pahat potong dengan geometri ulir sangat dekat. Sedangkan kerusakan pada ulir dapat disebabkan oleh aus pahat. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkajian mengenai keausan yang terjadi pada pahat ulir akibat pemotongan benda kerja material Ti-6Al-4V ELI pada penelitian yang selanjutnya.
2. Pada penelitian ini permukaan puncak ulir dan lembah ulir teramati tidak seragam dan ada permukaan yang kasar, untuk menjadikan permukaan ulir lebih halus dapat dilakukan menggunakan Metode *Burnishing* pada penelitian yang selanjutnya.
3. Pada penelitian ini menggunakan *profile projector* untuk mengamati permukaan baut ulir kortikal dan hasil yang didapatkan masih kurang maksimal. Oleh karena itu perlu dilakukan uji SEM (*Scanning Electron Microscopes*) untuk didapatkan hasil pengamatan yang lebih baik pada penelitian yang selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Andriani, D. P. 2014. *Metode Taguchi Pengendalian Kualitas*. Teknik Industri. Universitas Brawijaya.
- Anggraini, D., Dewi, S.K., Saputro, T.E. 2015. *Aplikasi Metode Taguchi Untuk Menurunkan Tingkat Kecacatan Pada Produk Paving*. Jurusan Teknik Industri. Fakultas Teknik. Universitas Muhammadiyah Malang. Vol. 16, No. 1.
- Arif, M., Arief, D.S., Syafri. 2016. *Analisa Kedataran Guide Ways Terhadap Pengaruh Gerak Carriage Pada Mesin Bubut G.D.WLZ 350 Dengan Alat Ukur DIGI- PAS DWL-200*. Laboratorium Teknologi Produksi. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Riau. Vol. 3, No. 2.
- Falah, M.D.A. 2020. *Optimasi Parameter Pemesinan Ulir Magnesium Menggunakan Metode Taguchi-Grey Relation Analysis (Skripsi)*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Lampung.
- Fariza, F. 2017. *Evaluasi Dan Analisa Kinerja Sistem Pahat Putar Modular Untuk Pemesinan Peralatan Kesehatan Ortopedi Berbasis Material Titanium 6Al-4V ELI*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Lampung.

- Fathurrahman, F., Susandi, D., Jannati, E.D. 2021. *Proses Pembuatan Baut Tarik Beton Menggunakan Mesin Bubut CNC*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Majalengka.
- Fauzi, A., Sumbodo, W. 2021. *Pengaruh Parameter Pemakanan Terhadap Kekasaran Permukaan ST 40 Pada Mesin Bubut CNC*. Prodi Pendidikan Teknik Mesin. Universitas Negeri Semarang. Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin, Vol. 6, No. 1.
- Gunawarman, Affi, J., Sutanto, A., Putri, D. M., Nuswantoro, N. F. 2020. *Adhesion Strength of Hydroxyapatite Coating on Titanium Materials (Ti-6Al-4V ELI) for Biomedical Application*. Jurusan Teknik Mesin. Universitas Trisakti. Vol. 11. No. 2. Hal 1-7.
- Harahap, B., Hernawati, T., Hasibuan, A.R. 2018. *Analisa Mutu Minyak Kelapa Sawit Dengan Metode Taguchi (Studi Kasus Di Pt. Sumber Sawit Makmur)*. Teknik Industri. Universitas Islam Sumatera Utara.
- Ibrahim, G.A. 2014. *Pengaruh Pemesinan Kering Terhadap Kekasaran dan Kekerasan Permukaan Paduan Titanium*. Fakultas Teknik. Universitas Lampung. Jurnal Mechanical, Vol. 5, No. 2.
- Ibrahim, G.A. 2020. *Pemesinan Bahan Paduan Titanium*. Graha Ilmu. Ruko Jambusari 7A Yogyakarta.
- Ibrahim, G.A., Hamni, A., Maria, S.P. 2020. *Correlation Of Spindle Speed On The Outer Thread Precision Of Magnesium AZ31*. Teknik Mesin. Universitas Lampung. Jurnal Teknik Mesin Indonesia, Vol. 15, No. 1.

- Ibrahim, G.A., Saputra, E., Harun, S., Supriyanto, E.A., Patihawa, A. 2019. *Kekasaran permukaan pada pemesinan frais mikro Ti 6Al- 4V ELI (extra low interstitial)*. Teknik Mesin. Universitas Muhammadiyah Metro. Vol. 8, No. 2.
- Ibrahim, G.A., Suseno, A., Hamni, A. 2019. *Pengaruh Parameter Pemotongan Pada Proses Bubut Ulir (Threading) Terhadap Kepresisian Geometri Ulir Magnesium Paduan AZ31*. Fakultas Teknik. Universitas Lampung. Vol. 12, No. 1.
- ISO 5835. 1991. *Implants For Surgery - Metal Bone Screws With Hexagonal Drive Connection, Spherical Under-surface Of Head, Asymmetrical Thread – Dimensions*. First Edition.
- Khani, S., Haghighi, S.S., Razfar, M.R., Farahnakian, M. 2021. *Optimization Of Dimensional Accuracy In Threading Process Using Solid-lubricant Embedded Textured Tools*. Industrial Engineering Department. Amirkabir University of Technology.
- Kurniawan, D. 2008. *Regresi Linier*. R Development Core Team (2008). R: A *Language And Environment For Statistikal Computing*. R Foundation For Statistikal Computing, Vienna, Austria.
- Marpaung, J.L., Sutrisno, A. Lumintang, R. 2017. *Penerapan Metode ANOVA Untuk Analisis Sifat Mekanik Komposit Serabut Kelapa*. Jurusan Teknik Mesin. Universitas Sam Ratulangi. Jurnal Online Poros Teknik Mesin, Vol. 6, No. 2.

- Moghaddam, M.A., Kolahan, F., Doughabadi, M.H. 2012. *Using Gray Relational Analysis and Taguchi Technique in Solving Multi-objective Problems for Turning Operation of Austenitic Stainless Steel*. Ferdowsi University Of Mashhad. Journal of Mechanical Research and Application. Vol. 4, No. 3.
- Nashrulah, M. 2016. *Pengembangan Desain Optimal Bone Screw Untuk Implan Ortopedi Menggunakan Ansys: Pengaruh Diameter Screw Dan Pemilihan Material (Skripsi)*. Departemen Teknik Material. Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh November.
- Paridawati. 2015. *Pengaruh Kecepatan Dan Sudut Potong Terhadap Kekasaran Benda Kerja Pada Mesin Bubut*. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Islan 45 Bekasi. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Vol. 3, No. 1.
- Parman, Rianis. 2020. *Rancang Bangun Sistem Kontrol Pemanas Dan Persentase Campuran Minyak Kelapa Sawit Dengan Minyak Solar Untuk Bahan Bakar Generator Set Diesel (Skripsi)*. Fakultas Tenaga Listrik dan Energi Terbarukan. Institut Teknologi PLN Jakarta.
- Patil, N., Gaurish, W., Mahesh, G. 2019. *Grey Relation Analysis Methodology and its Application*. Department of Mechanical Engineering, Agnel Institute of Technology and Design, Assagao-Bardez, Goa-India.
- Rahdiyanta, Dwi. 2010. *Buku 3 Proses Frais (Milling)*. Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Rifai, M. 2018. *Analisis Keausan Pahat Pada Pemesinan Bubut Menggunakan Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tools) Untuk Material Titanium*

6Al-4V ELI (Skripsi). Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Lampung.

Rueda, E.F.M. 2018. *Manufacturing of Orthopedic Plates and Screws for the Internal Fixation of Bone Fractures*. Mechanical Engineering. San Fransisco University.

Saputra, E., Ibrahim, G.A., Harun, S., Supriyadi, E.A., Patihawa, A. 2020. *Mekanisme Pembentukan Burr Pada Pemesinan Frais Mikro Ti 6Al-4V ELI Dalam Keadaan Kering*. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Lampung. Vol. 11, No. 3.

Shastri, A., Nargundkar, A., Kulkarni, A.J., Benedicenti, L. 2021. *Optimization of process parameters for turning of titanium alloy (Grade II) in MQL environment using multi-CI algorithm*. SN Applied Sciences 3:226.

Suganda, Restu. 2021. *Studi Eksperimental Pemesinan Bubut Dalam Pembuatan Screw With Shallow Thread (Ha) Untuk Orthopedic Implants (Skripsi)*. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Bandar Lampung.

Urtekin, L., Taskin, A. 2017. *Ti-6Al-4V alloy cortical bone screw production by powder injection molding method*. Department of Mechanical Engineering. Ahi Evran University. Mater. Express, Vol. 7, No. 4.

Wicaksono, O.D., Prayogi, E. 2021. *Perancangan B-Axis Pada Mesin Bubut Konvensional Untuk Proses Perbaikan Katup Bola (Ball Valve)*. Universitas Pancasila Jakarta Selatan. Syntax Admiration, Vol. 2, No. 3.

Wulandari, A.A. 2016. *Penerapan Metode Taguchi Untuk Kasus Multirespon Menggunakan Pendekatan Grey Relational Analysis Dan Principal Component Analysis (Skripsi)*. Fakultas Sains Dan Matematika. Universitas Diponegoro.

Zhang, Q.H., Tan, S.H., Chou, S.M. 2004. *Investigation Of Fixation Screw Pull Out Strength On Human Spine*. School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University. *Journal of Biomechanics* 37, 479-485