

**PENGARUH ARAH *HOT ROLLING* TERHADAP KEKUATAN TARIK
DAN PERAMBATAN RETAK FATIK TITANIUM *GRADE 2***

Skripsi

Oleh

**JOSUA RISCYANDO NAPITU
NPM 2115021064**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**PENGARUH ARAH *HOT ROLLING* TERHADAP KEKUATAN TARIK
DAN PERAMBATAN RETAK FATIK TITANIUM *GRADE 2***

Oleh

JOSUA RISCYANDO NAPITU

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**

2025

ABSTRAK

PENGARUH ARAH *HOT ROLLING* TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN PERAMBATAN RETAK FATIK TITANIUM *GRADE 2*

Oleh

Josua Riscyando Napitu

Titanium *Grade 2* merupakan titanium murni yang mendapat perhatian khusus karena sifat mekaniknya yang seimbang dan ketahanan korosi yang unggul. Namun seperti logam lainnya sifat mekanik titanium dapat dipengaruhi secara signifikan oleh proses manufaktur yang diterapkan khususnya proses pembentukan *hot rolling*. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki secara sistematis pengaruh arah *hot rolling* terhadap kekuatan tarik dan perambatan retak fatik titanium *grade 2* dengan arah pembebanan LT dan TL. Penelitian melibatkan pengujian tarik (ASTM E8), pengujian perambatan retak fatik (ASTM E647), pengamatan struktur mikro, dan pengamatan SEM fraktografi. Hasil menunjukkan nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada arah LT karena butir-butir yang terelongasi dan terdeformasi searah pengerolan memberikan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Karakteristik perambatan retak fatik dengan arah pembebanan LT lebih baik dibandingkan dengan arah pembebanan TL. Spesimen pembebanan LT mendapatkan nilai konstanta eksponensial (m) sebesar 3,4566 lebih kecil dari s arah pembebanan TL yaitu sebesar 3.5117. Hasil SEM menunjukkan pola patahan LT *intergranular; secondary crack, cleavage*, dan *voids*, sedangkan pada TL ditunjukkan pola patahan LT *intergranular; secondary crack, cleavage, ductile* dan *voids*.

Kata kunci :Titanium *grade 2*, *Hot rolling*, Uji tarik statis, Perambatan retak fatik, *Equiaxed alfa*.

ABSTRACT

EFFECT OF HOT ROLLING DIRECTION ON TENSILE STRENGTH AND FATIGUE CRACK PROGRESSION OF TITANIUM GRADE 2

By

Josua Riscyando Napitu

Titanium Grade 2 is a pure titanium that has received special attention due to its balanced mechanical properties and superior corrosion resistance. However like other metals the mechanical properties of titanium can be significantly affected by the manufacturing process applied in particular the hot rolling forming process. This study aims to systematically investigate the effect of hot rolling direction on the tensile strength and fatigue crack propagation of grade 2 titanium with LT and TL loading directions. The research involved tensile testing (ASTM E8), fatigue crack propagation testing (ASTM E647), microstructure observation, and fractographic SEM observation. The results showed that the highest tensile strength values were obtained in the LT direction as the grains were elongated and deformed in the direction of rolling giving higher tensile strength. Fatigue crack propagation characteristics with LT loading direction are better than TL loading direction. The LT loading specimen obtained an exponential constant (m) value of 3.4566 which is smaller than the TL loading direction of 3.5117. SEM results showed LT intergranular, secondary crack, cleavage, and voids, while TL showed LT intergranular, secondary crack, cleavage, ductile and voids.

Keywords : *Titanium grade 2, Hot rolling, Tensile strenght test, Fatigue crack propagation, Equiaxed alpha.*

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : **PENGARUH ARAH *HOT ROLLING* TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN PERAMBATAN RETAK FATIK TITANIUM *GRADE 2***

Nama Mahasiswa : **Josua Riscyando Napitu**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115021064**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2

Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197212111998031002

Harnowo Supriadi, S.T., M.T.
NIP. 196909091997031002

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin

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

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

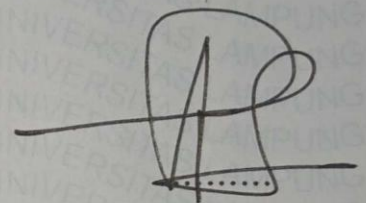
Ketua Penguji : **Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.**



Anggota Penguji : **Harnowo Supriadi, S.T., M.T.**



Penguji Utama : **Zulhanif, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 17 Maret 2025

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain. Sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebut dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 24 Februari 2025



Josua Riscyando Napitu
NPM. 2115021064

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lumban Tonga Tonga pada tanggal 01 November 2002, yang merupakan anak pertama dari pasangan Bapak James Napitu dan Ibu Nurtiasa Sinaga. Penulis memulai pendidikan pertama di Sekolah Dasar (SD) Swasta GKPS Gorak dan menyelesaikannya pada tahun 2015, lalu melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Sidamanik dan menyelesaikannya pada tahun 2018. Kemudian Penulis melanjutkan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Sidamanik dan menyelesaikannya pada tahun 2021.

Selanjutnya pada tahun 2021 Penulis tercatat sebagai Mahasiswa Universitas Lampung pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin yang diterima melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam kegiatan organisasi Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Katolik Universitas Lampung dan menjabat sebagai Kepala Biro Kesekretariatan pada Periode Kepengurusan tahun 2023. Penulis juga aktif dalam kegiatan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Bidang Edukasi dan Kemahasiswaan pada tahun 2024. Selain menjadi pengurus, penulis pernah menjadi bagian panitia kegiatan kegiatan pada Jurusan Teknik Mesin dan Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Katolik Universitas Lampung.

Pada tahun 2024 Penulis melakukan kegiatan Kerja Praktik (KP) Di PT. Semen Baturaja Tbk. Pada Area kerja Rotary Kiln Coal Mill dan menyelesaikan tugas khusus yang berjudul **“Analisis Laju Keausan Dan Perkiraan Umur Pakai *Slide Plate Bearing Block* Pada *Clinker Cooler* Di Pabrik Baturaja II PT. Semen Baturaja Tbk.”**. Kemudian penulis melakukan penelitian untuk menyelesaikan tugas akhir di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik dengan judul **“Pengaruh Arah *Hot Rolling* Terhadap Kekutan Tarik dan Perambatan Retak Fatik *Titanium Grade 2*”**.

MOTTO

Sesungguhnya aku ini adalah Hamba Tuhan, Jadilah padaku menurut
perkataan mu itu.
(Lukas 1:38)

**Lakukanlah hal hal baik dalam hidup, selagi kita masih memiliki
kesempatan. Jangan tunda sampai besok.
(ST. YOH. BOSCO)**

**SUCCESS IS NOT FINAL, FAILURE IS NOT FATAL, IT IS THE
COURAGE TO CONTINUE THAT COUNTS.
(WINSTONE CHURCHILL)**

*Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar. Keberhasilan adalah kepunyaan
mereka yang senantiasa berusaha.
(B.J. Habibie)*

Jangan takut gagal jadikan kegagalan itu sebagai
pelajaran untuk memacu kita berusaha lebih keras lagi
meraih yang kita inginkan
(Unknown)

*Jangan dibawa pusing, lakukanlah yang terbaik dan percayalah hasilnya
tidak akan mengecewakan.
(Josua Riscyando Napitu)*

PERSEMBAHAN

Puji Tuhan, dengan penuh rasa syukur kepada Tuhan Yesus Kristus,
Karya ini
Dipersembahkan kepada:

Kedua Orang Tuaku
Bapak James Napitu

Dan

Ibu Nurtiasa Sinaga

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan
puteranya sehingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas
sebagai Sarjana Teknik Mesin

Terimakasih atas segala dukungan motivasi serta masukan dan saran yang telah
diberikan sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini

Seluruh Teman-Temanku

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur ku ucapkan atas kehadiran Tuhan Yesus Kristus karena berkat dan kasih karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Pengaruh Arah *Hot Rolling* Terhadap Kekuatan Tarik dan Perambatan Retak Fatik Titanium *Grade 2*”. Tujuan dari penulisan skripsi ini yaitu sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar S1 dan untuk melatih mahasiswa dalam berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih adanya kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis meminta kritik dan saran yang dapat membangun dalam pembuatan skripsi ini.

Penulis

Josua Riscyando Napitu
NPM. 2115021064

SANWACANA

Salam Sejahtera

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkanNya, penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Skripsi dengan mempersembahkan judul “ Pengaruh Arah *Hot Rolling* Terhadap Kekuatan Tarik dan Perambatan Retak Fatik Titanium *Grade 2*” dengan sebaik-baiknya, sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih atas semua bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak, untuk itu dengan segala ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih antara lain kepada:

1. Mamaku tercinta Nurtiasa Sinaga dan Bapakku James Napitu atas segala nasehat yang telah diberikan, atas semua kasih sayang yang tulus, atas segala pengorbanan dan perjuangan untuk memberikan pendidikan yang terbaik untuk anaknya, serta doa yang tulus untuk mendo'akan anaknya.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Akademik dan Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T, Ph.D. selaku dosen pembimbing utama skripsi ini, yang telah memberikan waktu, arahan, semangat, serta motivasi bagi penulis.
6. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua Skripsi yang telah memberikan ide, arahan dan juga waktu bagi penulis.

7. Bapak Zulhanif, S.T., M.T. sebagai dosen pembahas Skripsi yang memberikan kritik dan saran yang sangat bermanfaat bagi penulis.
8. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu dan pembelajaran yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani masa studi diperkuliahan.
9. Staf akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan Skripsi ini.
10. Oppungku V. J. Sinaga, U. Damanik atas segala nasehat doa serta dukungan yang telah diberikan
11. Keluarga besar anak cucu Op. Ni Josua Sinaga yang selalu memberikan semangat, selalu mengingatkan dan memberikan nasehat-nasehat, serta mendoakan agar dapat menyelesaikan skripsi ini.
12. Keluarga besar anak cucu Op. Josua Napitu yang selalu memberikan semangat, selalu mengingatkan dan memberikan nasehat-nasehat, serta mendoakan agar dapat menyelesaikan skripsi ini.
13. Saudaraku Rizal Aprianto Napitu dan Fredrik Obama Napitu yang telah memberi semangat dan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
14. David Tarade Saragih, S.T., M. Zaki Mubarak, S.T., Andriko Nuwari Asisi, S.T. dan Yohannes Yonathan Tebu, S.T. yang telah memberikan arahan, masukan masukan dan nasehat dalam penyelesaian skripsi ini.
15. Sahabatku Abert Anugerah Lumban Tobing, Salomo Maycael Sijabat, Glen Ananta Velasco Letlora dan Yosafat Hasiholan Tampubolon yang telah memberikan dukungan, dan berbagi ilmu dalam penyelesaian skripsi ini.
16. Rekan-rekan Lab. Material yang telah membantu dan berbagi ilmu dalam penyelesaian skripsi.
17. Keluarga Mahasiswa Katolik Fakultas Teknik selaku teman yang selalu memberi semangat dalam penyelesaian skripsi ini.
18. Keluarga besar Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (Himatem).
19. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin angkatan 2021 Universitas Lampung.
20. Dan untuk seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Skripsi ini.

21. Penulis yang telah banyak memberikan waktu sehingga selesainya penulisan Skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penyajian Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran membangun sangat diharapkan guna perbaikan kedepannya. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung, 24 Februari 2025
Penulis,

Josua Riscyando Napitu
NPM. 2115021064

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
MENGESAHKAN	iv
PERNYATAAN.....	v
RIWAYAT HIDUP.....	vi
MOTTO	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
SANWACANA.....	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Titanium.....	5
2.2 Titanium <i>Grade 2</i>	5
2.3 Diagram Fasa Titanium	7

2.4	Struktur Kristal (<i>Crystal Structure</i>).....	8
2.5	Paduan Titanium.....	11
2.5.1	Alpha titanium <i>alloy</i>	11
2.5.2	<i>Near alpha alloy</i>	11
2.5.3	Alfa- Beta <i>alloy</i>	12
2.5.4	Beta alloy	12
2.6	Struktur Mikro Titanium.....	13
2.6.1	<i>Pure titanium (commercial pure titanium)</i>	13
2.6.2	Paduan alfa (α).....	13
2.6.3	Paduan beta (β)	14
2.6.4	Paduan alfa beta ($\alpha + \beta$)	15
2.7	Kekuatan Tarik.....	17
2.8	<i>Strain Hardening</i> (Pengerasan Regangan)	20
2.9	<i>Ductility</i> (Keuletan)	22
2.10	Fatik.....	23
2.10.1	<i>Crack initiation</i> (retak awal)	23
2.10.2	<i>Crack propagation</i> (retak merambat)	24
2.10.3	<i>Final fracture</i> (patah)	24
2.11	Perambatan Retak Fatik (<i>Crack Propagation</i>)	24
2.12	<i>Strees Intesity Factor (SIF)</i>	27
III.	METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1	Tempat Dan Waktu Penelitian	30
3.2	Bahan Yang Digunakan	30
3.2.1	Titanium <i>grade 2</i>	30
3.2.2	Pengambilan spesimen uji	30
3.2.3	Spesimen uji tarik	31

3.2.4	Spesimen uji perambatan retak fatik	31
3.3	Peralatan Yang Digunakan.....	32
3.3.1	Mesin MTS <i>Landmark</i> 100 kN.....	32
3.3.2	Jangka sorong (<i>vernier caliper</i>).....	32
3.3.3	<i>Clip Gauge on Displacement (COD)</i>	33
3.3.4	<i>Clevis</i>	34
3.4	Prosedur Penelitian	34
3.4.1	Persiapan spesimen.....	34
3.4.2	Pembuatan spesimen uji	35
3.4.3	Uji tarik statis	35
3.4.4	Pengujian perambatan retak fatik	37
3.5	Pengambilan Data.....	40
3.5.1	Pengujian tarik.....	40
3.5.2	Pengujian perambatan retak fatik	40
3.6	SEM Fraktografi.....	40
3.7	Observasi Mikrostruktur.....	41
3.8	Metode Menghitung Laju Pertumbuhan Retak	42
3.9	Diagram Alur Penelitian	45
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1	Hasil dan Analisis Uji Tarik.....	46
4.2	Hasil dan Pembahasan Uji Perambatan Retak Fatik	51
4.3	Pengamatan Struktur Mikro.....	56
4.4	SEM Fraktografi Uji Tarik Statis.....	60
4.5	SEM Fraktografi Perambatan Retak Fatik.....	61
V.	SIMPULAN DAN SARAN	66
5.1	Simpulan.....	66

5.2	Saran	67
DAFTAR PUSTAKA.....		68
LAMPIRAN.....		71

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Diagram fasa titanium dengan oksigen	7
Gambar 2.2 Diagram fasa Ti-Fe (Shirzadi et al., 2018)	8
Gambar 2.3 Struktur kristal titanium (Lütjering & Williams, 2007)	11
Gambar 2.4 Struktur mikro equiaxed alfa + Lamellar alfa	14
Gambar 2.5 Struktur mikro equiaxed beta (β)	15
Gambar 2.6 Struktur mikro primary alfa (α) and transformed beta (β)(Ren et al., 2024)	17
Gambar 2.7 Kurva stress strain (Ye et al., 2020)	18
Gambar 2.8 Grafik true stress-strain dan strain hardening rate titanium (Yan et al., 2024)	22
Gambar 2.9 Hubungan antara intensitas tegangan dan laju pertumbuhan retak (Seleš et al., 2021).....	25
Gambar 2.10 Tiga mode pembebanan yang dapat diterapkan pada retakan (Anderson, 2017).....	27
Gambar 3.1 Arah pengerolan titanium <i>grade 2</i>	30
Gambar 3.2. Spesimen uji tarik standar ASTM E8	31
Gambar 3.3. Spesimen uji tarik standar ASTM E647	31
Gambar 3.4. MTS Landmark 100 kN	32
Gambar 3.5 Jangka sorong (vernier caliper)	33
Gambar 3. 6 Clip Gage on Displacement (COD)	33
Gambar 3.7 Clevis.....	34
Gambar 3. 8 Scanning Electron Microscope.....	41
Gambar 3. 9 Inverted Optycal Microscope Olympus GX 51.....	41
Gambar 3. 10 Geometri spesimen C(T)	43
Gambar 3. 11 Diagram alur penelitian	45
Gambar 4. 1 Spesimen uji tarik sebelum pengujian.....	46

Gambar 4. 2 Grafik engineering stress dengan engineering strain titanium <i>grade 2</i>	47
Gambar 4. 3 Grafik hubungan strain hardening rate dengan true strain spesimen LT dan TL	49
Gambar 4. 4 Grafik hubungan panjang retak dengan siklus	51
Gambar 4. 5 Grafik hubungan ΔK dengan da/dN pada daerah II	53
Gambar 4. 6 Struktur mikro (a). Posisi pengambilan sampel, (b). Bidang A pada gambar a, (c). SEM bidang A pada gambar a (d) Bidang B pada gambar a , (e).Bidang C pada gambar a.	57
Gambar 4. 7 SEM EDS permukaan A pada gambar 4.6 (f)	59
Gambar 4. 8 Hasil pengamatan fraktografi spesimen uji tarik (a). SEM utuh, (b) Perbesaran	60
Gambar 4.9 SEM permukaan patah spesimen perambatan retak fatik, (A). CT03 dengan panjang retak 1,5 mm dari takik, (B). CT06 dengan panjang retak 1,5 mm dari takik, (C). CT03 dengan panjang retak 5 mm dari takik, (D). CT06 dengan panjang retak 5 mm dari takik, (E). CT03 dengan panjang retak 24 mm dari takik, (F). CT06 dengan panjang retak 24 mm dari takik	62
Gambar 4. 10 EDS spesimen perambatan retak fatik CT03	63
Gambar 4. 11 Hasil EDS spesimen perambatan retak fatik CT06	65

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Struktur kristal dan jari jari atom untuk 16 logam (Callister & Rethwisch, 2013)	9
Tabel 2.2. Hubungan parameter kisi dan gambar yang menunjukkan geometri satuan kristal untuk tujuh sistem kristal (Callister & Rethwisch, 2013).....	9
Tabel 2.3. Hubungan parameter kisi dan gambar yang menunjukkan geometri satuan kristal untuk tujuh sistem kristal (lanjutan)	10
Tabel 2.4. Sifat mekanik spesifik logam dan paduan dalam keadaan anil (Callister & Rethwisch, 2013)	23
Tabel 3.1. Spesifikasi jangka sorong (vernier caliper)	32
Tabel 3. 2 Spesifikasi clip gauge on displacement (COD).....	33
Tabel 3. 3 Parameter pengujian tarik.....	35
Tabel 3. 4 Parameter pengujian retak fatik.....	37
Tabel 3.5. Data hasil uji tarik	40
Tabel 3.6. Data hasil uji perambatan retak fatik.....	40
Tabel 3. 7 Spesifikasi Alat Uji SEM-EDS	41
Tabel 3. 8 Ukuran retak yang distandarkan sebagai fungsi dari kesesuaian elastisitas tegangan untuk spesimen C (T).....	43
Tabel 4. 1 Hasil uji tarik titanium grade 2.....	47
Tabel 4. 2 Hasil EDS permukaan A pada gambar 4.6 (a).....	58
Tabel 4. 3 Hasil EDS spesimen perambatan retak fatik CT03	64
Tabel 4. 4 Hasil EDS spesimen perambatan retak fatik CT06	64

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Titanium dan paduannya telah menjadi material yang semakin penting dalam berbagai industri, termasuk *aerospace*, otomotif, dan biomedis, karena kombinasi unik dari kekuatan tinggi, ringan, dan ketahanan korosi yang sangat baik. Di antara berbagai jenis titanium komersial, Titanium *Grade 2* mendapat perhatian khusus karena sifat mekaniknya yang seimbang dan ketahanan korosi yang unggul. Namun, seperti logam lainnya, sifat sifat ini dapat dipengaruhi secara signifikan oleh proses manufaktur yang diterapkan, khususnya proses pembentukan *hot rolling*.

Hot rolling adalah salah satu metode pembentukan logam yang paling umum digunakan dalam industri, yang melibatkan deformasi plastis material pada suhu di atas suhu rekristalisasi. Proses ini tidak hanya membentuk logam menjadi bentuk yang diinginkan tetapi juga mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik material (Du et al., 2020). Dalam kasus titanium *grade 2* pemahaman tentang bagaimana arah *hot rolling* mempengaruhi sifat mekaniknya, terutama kekuatan tarik dan perilaku perambatan retak fatik menjadi sangat penting untuk optimalisasi desain dan aplikasi material ini.

Kekuatan tarik adalah salah satu parameter kunci dalam mengevaluasi kinerja material untuk berbagai aplikasi struktural. Kekuatan tarik memberikan informasi tentang kemampuan material untuk menahan beban statis tanpa mengalami kegagalan (Chen, Shang, Tang, et al., 2023). Di sisi lain, perilaku perambatan retak fatik adalah aspek kritis dalam menilai umur komponen yang mengalami beban siklik, situasi yang umum dalam banyak aplikasi praktis. Pada umumnya kegagalan terjadi ketika level tegangannya telah

melampaui tegangan maksimumnya. Fase kerusakan yang terjadi yaitu retak awal, retak penyebaran, dan retak. Amplitudo pembebanan akan mempengaruhi perambatan retak dimana semakin besar amplitudo pembebanan akan semakin cepat retak merambat (Suhartono, 2006). Kedua sifat ini dapat menunjukkan anisotropi yang signifikan sebagai hasil dari proses *hot rolling*, yang berarti bahwa dapat bervariasi tergantung pada arah relatif terhadap arah *rolling*.

Menurut penelitian Wang *et al.* (2022) menyatakan peningkatan suhu tidak memiliki efek signifikan pada laju peningkatan pertumbuhan retak fatik pada material titanium TC4. Rasio tegangan yang tinggi menyebabkan wilayah retak terus menerus dikenakan beban tarik yang lebih kuat. Oleh karena itu rasio tegangan tinggi menyebabkan laju inisiasi retakan kelelahan yang lebih cepat, menyebabkan spesimen dengan rasio tegangan tinggi mengalami patah lebih awal.

Menurut penelitian Syed *et al.* (2021) menggunakan Ti-6Al-4V dengan bentuk spesimen CT diberi beban amplitudo konstan. Menyatakan pada rasio beban siklik $R = 0.1$ dan frekuensi 10 Hz laju pertumbuhan retak fatik ditemukan pada faktor intensitas tegangan dibawah $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Pengaturan frekuensi dan amplitudo beban siklik dapat dioptimalkan untuk meminimalkan resiko retak yang pada akhirnya dapat memperpanjang umur dari komponen.

Mengingat pentingnya topik ini, baik dari perspektif praktis maupun ilmiah, penulis tertarik melakukan penelitian dengan judul **"Pengaruh Arah *Hot Rolling* Terhadap Kekuatan Tarik Dan Perambatan Retak Fatik Titanium Grade 2"** yang bertujuan untuk menyelidiki secara sistematis pengaruh arah *hot rolling* terhadap kekuatan tarik dan perambatan retak fatik pada titanium *grade 2*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang perilaku titanium *grade 2* dan mendukung

pengembangan aplikasi yang lebih efektif dan efisien untuk material ini di masa depan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai kekuatan tarik dan sifat perambatan retak fatik titanium *grade 2* dengan pembebanan yang searah pengerolan dan tegak lurus terhadap arah pengerolan.
2. Investigasi pengerasan regangan dengan arah pembebanan yang searah pengerolan dan tegak lurus terhadap arah pengerolan pada titanium *grade 2*.
3. Mengetahui pengaruh arah pengerolan terhadap orientasi struktur mikro titanium dengan arah pembebanan yang searah pengerolan dan tegak lurus terhadap arah pengerolan.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Parameter yang dianalisis hanya kekuatan tarik dan laju perambatan retak fatik.
2. Arah pembebanan yang diteliti yaitu searah dengan arah pengerolan dan tegak lurus terhadap arah pengerolan.
3. Analisis perambatan retak fatik hanya mempertimbangkan mode I (*opening mode*).
4. Tidak memperhitungkan nilai kekerasan.
5. Kondisi pengujian dilakukan pada suhu kamar.

1.4 Sistematika Penulisan

Berikut ini adalah sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini:

I. Pendahuluan

Berisi uraian tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan metode yang digunakan penulis untuk menyusun laporan.

II. Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka mencakup teori-teori dasar yang berkaitan dengan penelitian ini.

III. Metodologi Penelitian

Metode penelitian ini mencakup alat dan bahan penelitian, persiapan dan prosedur pengujian, waktu dan lokasi penelitian, dan diagram alir.

IV. Data dan Pembahasan

Berisi tentang data pengamatan yang diperoleh, serta pembahasan data dari proses pengujian.

V. Penutup

Berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan pembahasan serta saran yang dapat diberikan oleh penulis.

Daftar Pustaka

Berisi sumber dan referensi yang digunakan oleh penulis saat menulis laporan penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Titanium

Titanium adalah logam transisi yang keras, kuat, dan tahan terhadap korosi dengan simbol kimia Ti dan nomor atom 22. Ditemukan pada tahun 1791 oleh William Gregor di Inggris dan dinamai oleh Martin Heinrich Klaproth untuk Titan yang diambil dari mitologi Yunani. Titanium, yang memiliki warna putih metalik dan merupakan logam transisi yang ringan, kuat, dan tahan korosi, tidak diproduksi secara komersial hingga tahun 1950-an (Lütjering & Williams, 2007).

Titanium, yang dikenal karena rasio kekuatan hingga berat yang luar biasa, memiliki bobot 45% lebih ringan daripada baja berkekuatan yang sama. Selain itu, lapisan oksida pelindung yang terbentuk secara alami di permukaannya membuatnya tahan terhadap korosi oleh air laut dan berbagai bahan kimia. Logam berwarna putih-keperakan ini sangat cocok untuk berbagai aplikasi canggih seperti implan medis, komponen pesawat terbang, peralatan militer, perhiasan, peralatan olahraga, dan industri kimia. Namun, karena titik lelehnya yang tinggi (1.668°C), konduktivitas termalnya yang rendah, dan sifatnya yang reaktif pada suhu tinggi sehingga pengolahan titanium membutuhkan biaya yang lebih tinggi dibanding logam lainnya.

2.2 Titanium Grade 2

Titanium *grade 2* merupakan fasa alfa. Pembentukan fasa alfa pada suhu rendah, *allotropy hexagonal* titanium. Paduan titanium sedang meningkat popularitasnya dalam struktur pesawat tempur modern, dengan pengurangan

berat, pengurangan biaya, efisiensi struktural, dan perpanjangan umur layanan sebagai arah pengembangan utama. Titanium *grade 2* memiliki sifat tahan terhadap lingkungan korosi yang sangat baik. Fasa titanium *grade 2* dapat diklasifikasikan tergantung pada temperatur yaitu fasa alfa (α), beta (β) dan alfa beta ($\alpha + \beta$). Pada lingkungan temperatur ruang akan stabil pada fasa alfa (α) dan apabila dipanaskan hingga melampaui temperatur 882 °C maka fasanya akan berubah dan stabil pada fasa beta (β) (Donachie, 2000).

Sifat-sifat unggul titanium *grade 2* membuatnya menjadi pilihan ideal untuk berbagai aplikasi, terutama dalam industri kimia, petrokimia, dan kelautan. Material ini tahan terhadap korosi air laut dan berbagai bahan kimia agresif, membuatnya cocok untuk digunakan dalam pembuatan penukar panas, pipa, dan komponen yang terkena lingkungan korosif. Selain itu, biokompatibilitasnya yang sangat baik juga menjadikannya pilihan populer dalam industri medis untuk implan dan peralatan bedah.

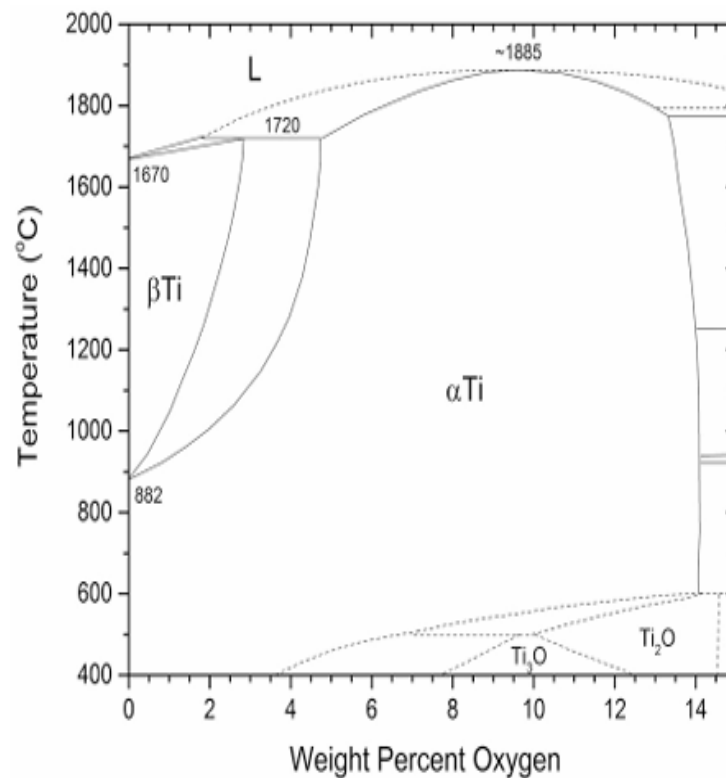
Titanium *grade 2* termasuk dalam kategori *commercially pure (CP)* titanium, yang berarti sebagian besar komposisinya adalah titanium murni dengan sejumlah kecil elemen lain. Berikut rincian komposisi kimia titanium *grade 2* dikutip dari (ASM Aerospace Specification Metals Inc):

1. Titanium (Ti): 99,20%, titanium adalah elemen utama yang membentuk sebagian besar material.
2. Besi (Fe): maksimum 0,30%, besi hadir sebagai impuritas dan dapat mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi.
3. Oksigen (O): maksimum 0,25%, oksigen berperan penting dalam pembentukan lapisan oksida protektif, tetapi juga dapat mempengaruhi keuletan.
4. Karbon (C): maksimum 0,10%, karbon dapat membentuk karbida yang mempengaruhi kekuatan dan kekerasan.
5. Nitrogen (N): maksimum 0,03%, nitrogen dapat meningkatkan kekuatan tetapi juga dapat mengurangi keuletan jika terlalu banyak.

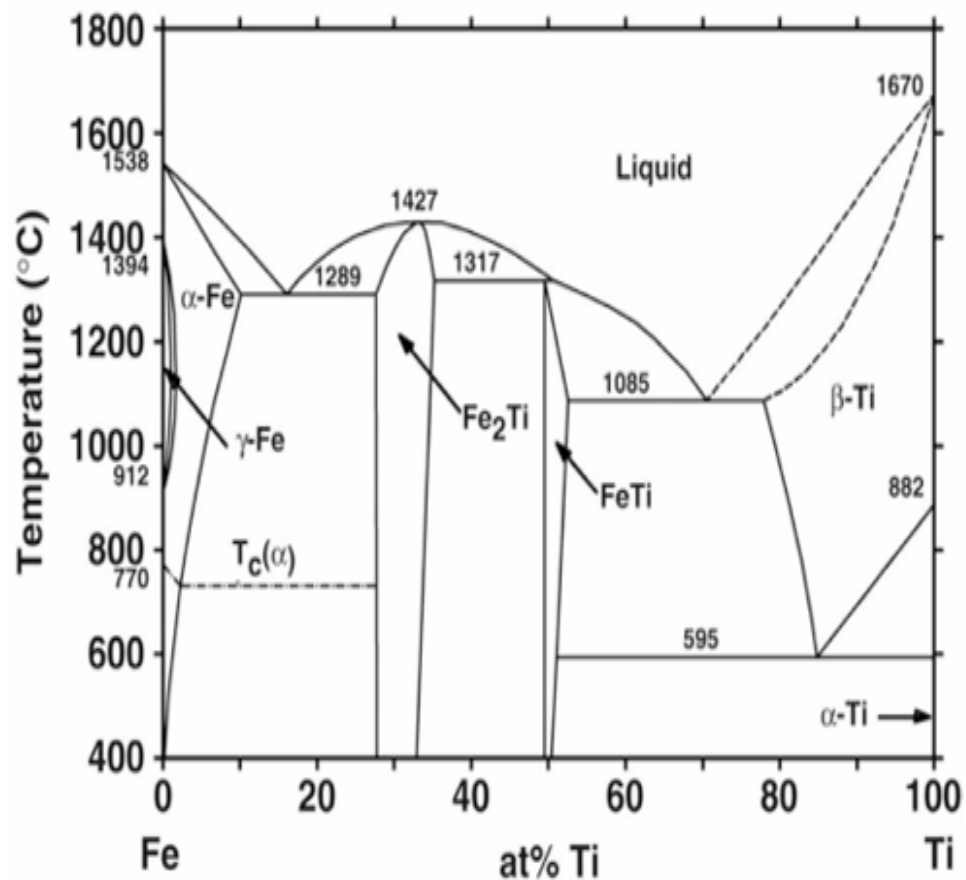
6. Hidrogen (H): maksimum 0,015%, hidrogen harus dijaga tetap rendah karena dapat menyebabkan penggetasan.

2.3 Diagram Fasa Titanium

Diagram fasa titanium menggambarkan hubungan antara suhu dan struktur kristal titanium dalam berbagai kondisi (Shirzadi et al., 2018). Fasa fasa utama pada titanium yaitu fasa alfa (α), fasa beta (β) dan fasa alfa beta (α - β). Fasa fasa tersebut akan bertransformasi pada suhu tertentu. Fasa alfa akan stabil pada suhu rendah hingga 882 °C dengan struktur kristal *Hexagonal Close-Packed (HCP)*. Sedangkan fasa beta (β) akan stabil pada suhu diatas 882 °C dengan struktur kristal *Body-Centered Cubic (BCC)* dan fasa alfa beta (α - β) terjadi pada rentang suhu tertentu tergantung pada komposisi paduannya. Diagram fasa titanium dengan oksigen dapat dilihat pada Gambar 2.1. dan diagram fasa Ti-Fe Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Diagram fasa titanium dengan oksigen
(Fang et al., 2017)



Gambar 2.2 Diagram fasa Ti-Fe (Shirzadi et al., 2018)

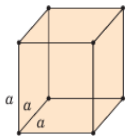
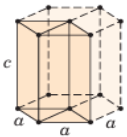
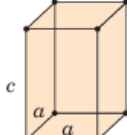
2.4 Struktur Kristal (*Crystal Structure*)

Logam adalah ikatan atom yang nondireksional dari kelompok bahan ini. Akibatnya, jumlah dan posisi atom tetangga terdekat tidak terbatas, yang berarti sebagian besar struktur kristal logam memiliki jumlah tetangga terdekat yang besar dan kemasan atom yang padat. Selain itu, ketika model bola keras digunakan untuk struktur kristal logam, setiap bola menunjukkan inti ion. Jari-jari atom sejumlah logam ditunjukkan dalam Tabel 2.1. dan hubungan parameter kisi yang menunjukkan geometri satuan kristal pada Tabel 2.2. Tiga struktur kristal yang relatif sederhana ditemukan untuk sebagian besar logam yang umum: *Face Centered Cubic (FCC)*, *Body Centered Cubic (BCC)*, dan *Hexagonal Close Packed (HCP)*.

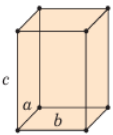
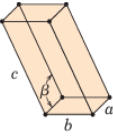
Tabel 2.1. Struktur kristal dan jari jari atom untuk 16 logam (Callister & Rethwisch, 2013)

<i>Metal</i>	<i>Crystal structure</i>	<i>Atomic radius (nm)</i>	<i>Metal</i>	<i>Crystal structure</i>	<i>Atomic radius (nm)</i>
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium (α)	HCP	0.1445
Iron (α)	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

Tabel 2.2. Hubungan parameter kisi dan gambar yang menunjukkan geometri satuan kristal untuk tujuh sistem kristal (Callister & Rethwisch, 2013)

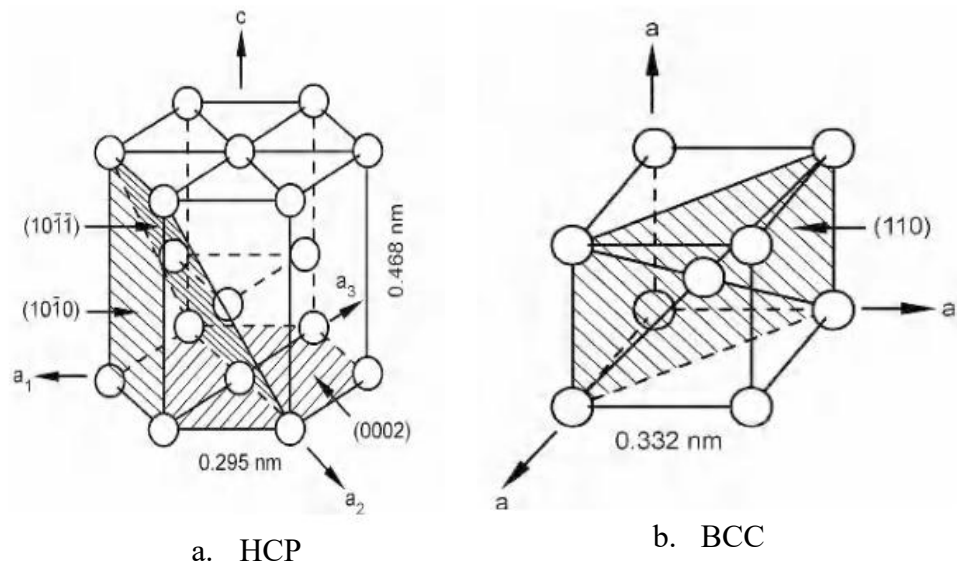
<i>Crystal system</i>	<i>Axial relationships</i>	<i>Interaxial angels</i>	<i>Unit cell geometry</i>
<i>Cubic</i>	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<i>Hexagonal</i>	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
<i>Tetragonal</i>	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<i>Rhombohedral (Trigonal)</i>	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

Tabel 2.3. Hubungan parameter kisi dan gambar yang menunjukkan geometri satuan kristal untuk tujuh sistem kristal (lanjutan)

<i>Crystal system</i>	<i>Axial relationships</i>	<i>Interaxial angles</i>	<i>Unit cell geometry</i>
<i>Orthorhombic</i>	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<i>Monoclinic</i>	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	

Titanium murni menunjukkan transformasi fase alotropik pada suhu 882°C , berubah dari struktur kristal kubik berpusat tubuh (fase β) pada suhu yang lebih tinggi menjadi struktur kristal *heksagonal* yang padat (fase α) pada suhu yang lebih rendah (Lütjering & Williams, 2007). Suhu transformasi yang tepat sangat dipengaruhi oleh elemen interstisial dan substitusi dan oleh karena itu tergantung pada kemurnian logam.

Sel satuan heksagonal dari fase α ditunjukkan pada Gambar 2.3b. yang juga menunjukkan nilai suhu kamar dari parameter kisi a (0,295 nm) dan c (0,468 nm). Rasio c/a yang dihasilkan untuk titanium α murni adalah 1,587, lebih kecil dari rasio ideal 1,633 untuk struktur kristal heksagonal rapat. Juga ditunjukkan pada Gambar 2.3a. adalah tiga jenis bidang kisi yang paling padat, bidang (0002), juga disebut bidang basal, salah satu dari tiga bidang (1011), juga disebut bidang prismatic, dan salah satu dari enam bidang, juga disebut bidang piramidal. Tiga sumbu a_1 , a_2 , dan a_3 adalah arah yang berdekatan dengan indeks (1120). Sel satuan dari fasa *Body Centered Cubic* (BCC) β diilustrasikan pada gambar 2.3b yang menunjukkan juga satu varian dari enam bidang kisi yang paling padat dan nilai parameter kisi titanium β murni pada suhu 900°C ($a = 0,332$ nm). Arah yang paling rapat adalah empat arah $\langle 111 \rangle$.



Gambar 2.3 Struktur kristal titanium (Lütjering & Williams, 2007)

2.5 Paduan Titanium

Berdasarkan fasa yang dominan dan struktur mikronya titanium dan paduannya dapat diklarifikasi menjadi empat kelompok antara lain (Joshi, 2006):

2.5.1 *Alpha titanium alloy*

Paduan alfa merupakan paduan titanium yang membuat stabil pada fasa alfa, karena terkandung unsur aluminium dan timah. Aluminium memiliki pengaruh yang besar pada paduan ini karena sangat stabil pada fasa alfa. Dengan stabil pada fasa alfa sehingga mampu mengurangi densitas dan menaikkan kekuatan dari titanium itu sendiri. Fasa alfa biasanya berada pada temperatur sekitar 800 °C. Secara umum, dalam paduan alfa terkandung fasa beta yang sangat kecil daripada Ti-6Al-4V.

2.5.2 *Near alpha alloy*

Pada paduan *near alpha* terdapat kandungan *molybdenum* dan *vanadium* sebesar 1-2 %. Dikarenakan kandungan tersebut dalam

struktur fasa alfa masi ditemukan fasa beta. Untuk meningkatkan sifat mekaniknya Paduan ini biasanya dilakukan perlakuan panas *annealing*. Dua jenis *annealing* yang dapat dilakukan pada paduan *near alpha* yaitu *mill annealing* dan *dupleks annealing*. *Mill annealing* dilakukan dengan memanaskan kembali mencapai temperatur 790°C selama 8 jam, selanjutnya didinginkan dalam tungku. Sedangkan *dupleks annealing* dilakukan dengan memanaskan mencapai temperatur 790 °C selama 15 menit kemudian dilakukan pendinginan di udara. Secara umum sifat mekanik dari paduan ini memiliki tingkat keuletan yang baik dan *tensile strength* sedang.

2.5.3 Alfa- Beta *alloy*

Paduan alfa-beta memiliki beta *stabilizer*. Stabisator fasa alfa adalah timah dan aluminium yang ditambahkan ke titanium yang berfungsi untuk menaikkan kestabilan fasa alfa ke fasa beta serta meningktkan kekuatan paduan titanium dengan *solid-solution hardening*. Dengan adanya fasa beta memungkinkan dilakukan perlakuan panas dengan temperatur yang relatif rendah dan *solid-solution* dapat mengeras lebih lanjut. Fasa elemen beta mampu menghambat pembentukan fasa alfa sehingga fasa beta berubah menjadi fasa *martensit* atau bertahan yang kemudain berubah ke fasa alfa pada saat dipanaskan dari temperatur 427 °C hingga bertemperatur sekitar 816 °C.

2.5.4 Beta *alloy*

Dinyatakan paduan beta jika mengandung unsur *stabilizer* beta yang mampu mempertahankan fasa beta tanpa transformasi *martensite* pada proses pendinginan temperatur ruang. Struktur kristal paduan yang terjadi pada temperatur ruang adalah *body centered cubic (BCC)*. Pada kondisi 100% *retained* beta (*solution-treated*) paduan ini memiliki sifat mekanik dengan kekuatan yang relatif rendah, keuletan dan ketangguhan yang baik, dan *deformable* yang sangat baik. Pada umumnya paduan ini digunakan pada temperatur sedang. Dikarenakan pada temperatur tinggi paduan beta *solution-treated* mulai

mengendapkan sedikit fase alfa. Jika paduan ini digunakan pada temperatur tinggi harus dilakukan *over-aging* sebelumnya.

2.6 Struktur Mikro Titanium

Adapun jenis struktur mikro yang dapat ditemukan pada material titanium adalah sebagai berikut:

2.6.1 *Pure titanium (commercial pure titanium)*

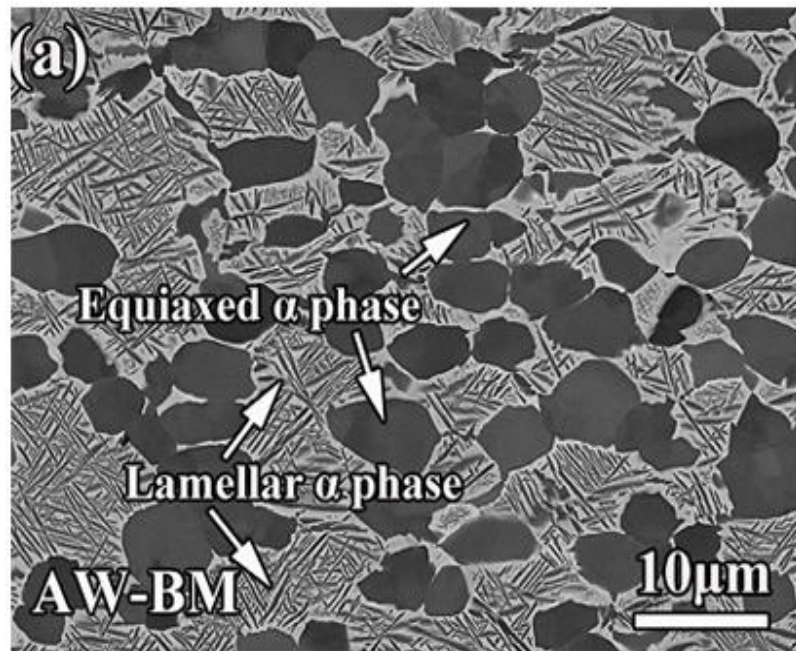
Struktur mikro yang terbentuk pada titanium murni adalah *equiaxed* alfa dengan fase alfa berstruktur kristal *hexagonal compact*. Perubahan fase beta pada titanium murni di daerah alfa dapat terjadi dalam dua cara. Yang pertama adalah secara martensit dan yang kedua adalah difusi yang dikontrol oleh nukleasi melalui proses penumbuhan yang bergantung pada laju pendinginan dan komposisi paduan.

2.6.2 Paduan alfa (α)

HCP martensit adalah struktur mikro yang terbentuk pada paduan alfa. Sebagian besar *alloy titanium* mengalami transformasi *martensite* dalam bentuk pelat atau *disk*. Tingkat *impurity* (besi atau oksigen) menentukan suhu awal transformasi martensit dari titanium murni. Namun, transformasi biasanya terjadi pada suhu sekitar 850 °C. Suhu transformasi meningkat seiring peningkatan kandungan *stabilizer* alfa (Al atau oksigen) dan turun seiring peningkatan kandungan *stabilizer* beta (β).

Pada Gambar 2.4 terlihat sebagian besar area gambar terdiri dari butir-butir berwarna terang dengan bentuk yang cenderung *equiaxed* (memiliki dimensi yang relatif sama ke segala arah). Ini adalah fasa alfa (α) yang merupakan fasa utama dalam paduan titanium. Terlihat garis-garis gelap yang memisahkan butir-butir alfa. Ini adalah batas butir yang jelas terlihat di seluruh struktur, tersadat partikel sekunder. Beberapa partikel berwarna gelap yang tersebar di seluruh matriks.

Partikel-partikel ini mungkin merupakan presipitat, inklusi, atau fasa sekunder seperti beta (β) yang tertahan. Butir-butir alfa memiliki ukuran yang bervariasi, meskipun sebagian besar terlihat relatif seragam. Beberapa butir menunjukkan perbedaan tingkat kecerahan, yang mungkin mengindikasikan orientasi kristal yang berbeda.



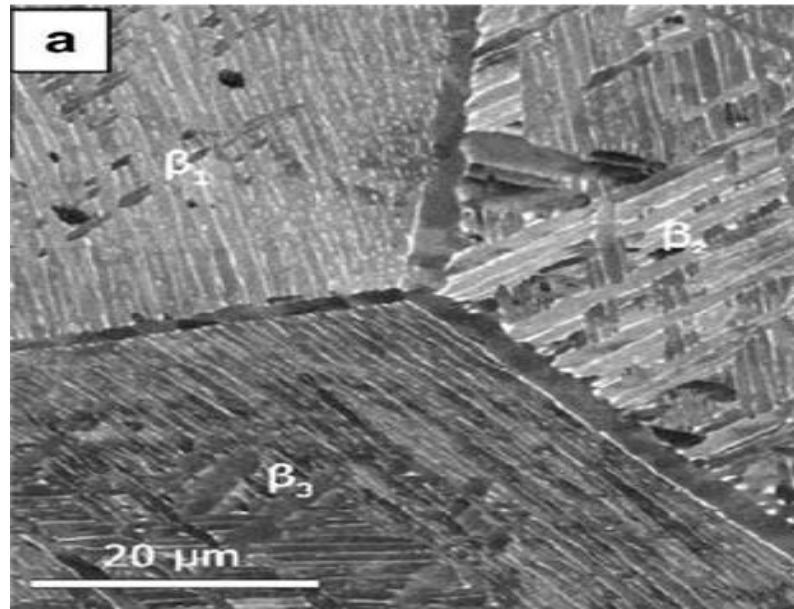
Gambar 2.4 Struktur mikro *equiaxed alfa* + *Lamellar alfa*
(Liu et al., 2024)

Struktur mikro ini menunjukkan paduan titanium yang telah mengalami proses rekristalisasi, kemungkinan setelah deformasi plastis seperti pengerolan atau *forging*, diikuti dengan perlakuan panas. Dominasi fasa alfa menunjukkan bahwa paduan alfa titanium atau titanium murni komersial seperti *grade 2*. Struktur *equiaxed* seperti ini umumnya memberikan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan pada paduan titanium.

2.6.3 Paduan beta (β)

Secara umum paduan beta terdiri dari *mestable* beta (β). Letak *mestable* beta (β) terjadi pada daerah *equilibrium* alfa beta ($\alpha + \beta$). Karakteristik

dari *alloy* grup beta (β) yaitu pada proses pendinginan cepat tidak bertransformasi secara *martensit* dari fase beta (β) dan memiliki struktur kristal *BCC* (*body center cubic*).



Gambar 2.5 Struktur mikro *equiaxed* beta (β)
(Banerjee & Williams, 2013)

Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa butir-butir memiliki bentuk yang cenderung *equiaxed* (sama sisi), artinya dimensi butir relatif sama ke segala arah. Butir-butir memiliki ukuran yang relatif seragam, dengan skala bar menunjukkan 20 μm . Terlihat jelas garis-garis gelap yang membatasi setiap butir, menandakan batas butir yang tegas. Struktur ini tampak terdiri dari satu fase β (beta) tanpa adanya presipitat atau fase sekunder yang terlihat. Beberapa butir memiliki bentuk poligonal dengan sudut-sudut yang jelas, sementara yang lain memiliki bentuk yang lebih tak beraturan. Terlihat beberapa titik gelap kecil di dalam butir-butir, yang mungkin merupakan inklusi atau artefak pengetsaan.

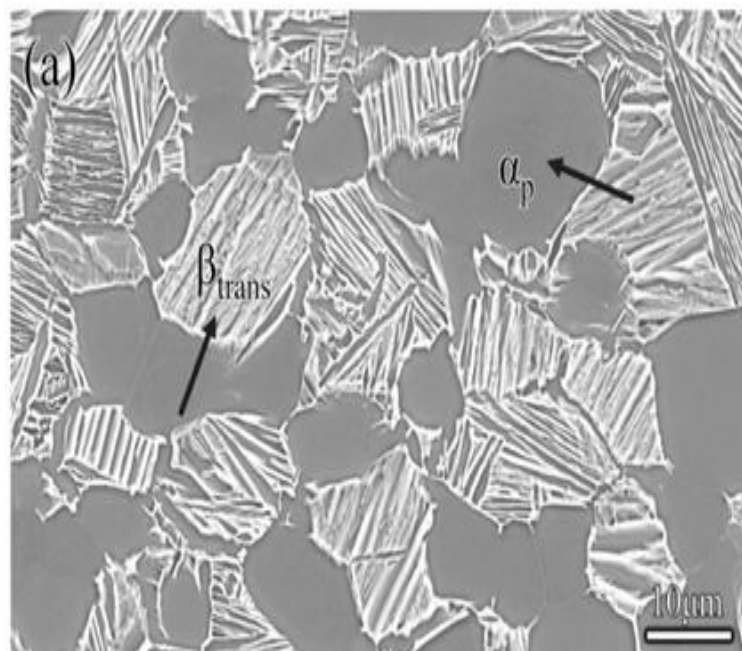
2.6.4 Paduan alfa beta ($\alpha + \beta$)

Perbedaan jenis mikrostruktur pada paduan alfa beta ($\alpha + \beta$) *alloy* diperoleh dengan mengubah rute proses termomekanikal, antara lain:

1. *Fully lamellar microstructure*, terbentuk setelah pendinginan lambat saat berdeformasi dan diberikan perlakuan panas di bawah suhu fasa tunggal beta (T), dimana alfa beta ($\alpha + \beta$) menjadi beta (β), dengan sistem kristal *hexagonal close packed (HCP)* pada alfa (α) *lamellar* dan *body centered cubic (BCC)* pada butir beta (β). *Microstructure fully lamellar* memiliki karakteristik *tensile ductility* rendah, sifat ketegangan sedang, tahan retak, dan perambatan retak yang baik.
2. *Bi-modal (duplex) microstructure*, yang terdiri dari butir alfa (α) dan *lamellar* alfa (α) dengan butir beta (β) yang sedikit. Sifat mekanik mikrostruktur ini adalah keuletan dan kekuatan yang sangat baik pada suhu ruang.
3. *Fully equiaxed microstructure*, terbentuk setelah deformasi dua fasa ($\alpha + \beta$), terdiri dari globular fasa alfa (α) dengan matriks beta (β) yang memiliki kristalografi HCP (hexagonal). Mikrostruktur ini memiliki sifat mekanik seperti keuletan, kekuatan pada temperatur ruang, dan sifat *fatigue* yang baik.
4. *Mill-annealed microstructure*, proses pembuatan *mill-annealed microstructure* tidak melibatkan proses rekristalisasi. Sehingga detail mikrostruktur ditentukan melalui proses deformasi.

Struktur mikro *primary* alfa dan *transformed* menunjukkan paduan titanium alfa+beta. Fasa alfa terlihat sebagai area yang lebih terang, sedangkan fasa beta cenderung lebih gelap seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Butir-butir memiliki bentuk yang tidak beraturan (*equiaxed*) dengan ukuran yang bervariasi. Terlihat jelas batas-batas antar butir yang memisahkan satu butir dengan butir lainnya. Terdapat beberapa titik atau partikel kecil yang tersebar di seluruh struktur, yang mungkin merupakan presipitat atau fasa sekunder. Beberapa area menunjukkan orientasi kristal yang berbeda, terlihat dari perbedaan kontras antar butir. Tidak terlihat adanya tekstur yang kuat atau orientasi butir yang sangat terarah, yang menunjukkan bahwa material ini mungkin telah mengalami perlakuan panas atau proses yang

menyebabkan rekristalisasi. Secara umum, struktur mikro terlihat cukup seragam di seluruh area yang ditampilkan. Struktur mikro *primary* alfa (α) and *transformed* beta (β) menunjukkan titanium yang telah mengalami perlakuan panas atau proses pengerjaan tertentu, menghasilkan campuran fasa alfa dan beta yang bertransformasi. Kombinasi fasa dan morfologi butir yang dihasilkan kompleks. Struktur seperti ini umumnya memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik pada paduan titanium.



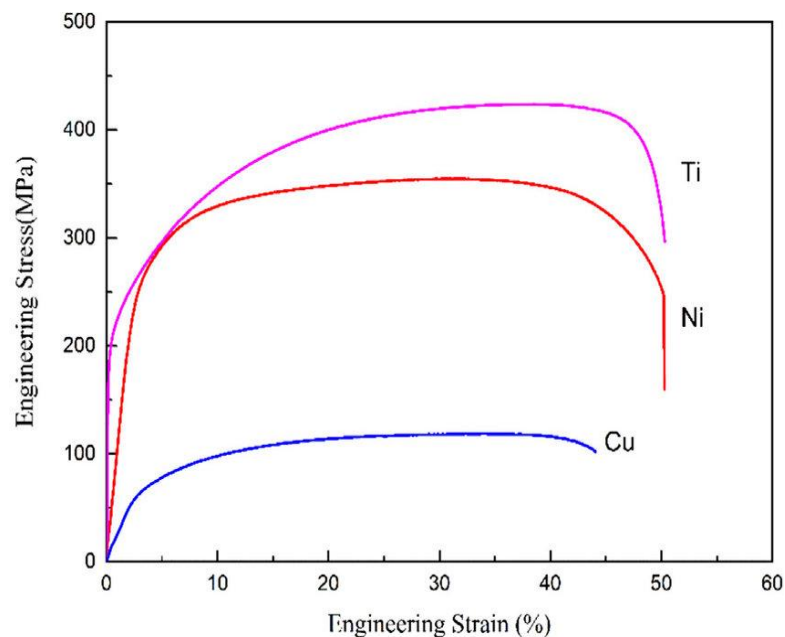
Gambar 2.6 Struktur mikro *primary* alfa (α) and *transformed* beta (β)(Ren et al., 2024)

2.7 Kekuatan Tarik

Salah satu cara untuk mengetahui sifat mekanik suatu material adalah dengan melakukan uji tarik. Dengan melakukan uji tarik akan diketahui kekuatan dari material yang diuji. Uji tarik dilakukan dengan memberi pembebanan tarik secara kontiniu dengan bertambah kuat hingga material gagal. Beban tarik diberikan secara sesumbu dengan arah yang berlawanan. Pada saat bersamaan benda uji akan bertambah panjang seiring dengan besar gaya yang diberikan.

Proses pengujian tarik dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kekuatan tarik dari bahan uji. Hasil dari uji tarik mencatat hubungan antara tegangan-regangan yang terjadi selama pengujian dilakukan.

Dengan melakukan uji tarik sehingga diperoleh beberapa data dari benda uji seperti data *ultimate* (MPa), energi plastis (KJ), energi elastis (KJ), modulus elastis (GPa), reduksi penampang (%), tegangan *yield* (MPa), dan elongasi total (%). Uji tarik juga menghasilkan kurva antara tegangan dan regangan yang menyatakan proses pembebanan yang dialami benda kerja dari awal hingga gagal. Pembebanan dan perubahan panjang dari benda kerja dikonversikan ke dalam kurva uji tarik (Budiman, 2016).



Gambar 2.7 Kurva *stress strain* (Ye et al., 2020)

Gambar 2.7 merupakan gambar kurva tegangan regangan yang diperoleh dari hasil pengukuran perpanjangan yang terjadi pada bahan uji. Tegangan (σ) yang terjadi dapat diketahui dengan cara membagi beban dengan luas penampang awal bahan uji. Untuk regangan (ϵ) dicari dengan membagi nilai perpanjangan benda uji setelah pengujian dengan panjang awal benda uji. Persamaan dari tegang dapat dituliskan pada Persamaan 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Dimana:

σ : Tegangan tarik (N/m² atau Pa)

F : Gaya (N)

A : Luas penampang (m²)

Regangan yang ditunjukkan pada kurva adalah regangan linier rata-rata yang diperoleh dengan membagi panjang ukur (*gage length*) spesimen uji (ΔL) dengan panjang awal L_0 . Persamaannya ditulis dalam Persamaan 2.2. (Salindeho, 2013):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Dimana:

ε : Regangan (%)

ΔL : Perubahan panjang material (mm)

L_0 : Panjang awal material (mm)

L : Panjang akhir material (mm)

Kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan titik luluh adalah parameter yang digunakan untuk menggambarkan kurva tegangan-regangan logam (Trisnadi, 2019). Nilai modulus elastisitas yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Dimana:

E : Modulus elastisitas (Gpa)

σ : Tegangan (MPa)

ε : Regangan (%)

Elongasi (%EL) mengacu pada perpanjangan saat patah (pecah), yang menunjukkan keuletan material, dan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.4.

$$\%EL = \left(\frac{l_0 - l_f}{l_0} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

%EL : Elongasi (%)

l_0 : Panjang sebelum pengujian (mm)

l_f : Panjang sesudah pengujian (mm)

Reduksi luas penampang (%RA) mengacu pada pengurangan luas penampang spesimen pada saat patah (*fracture*), juga merupakan karakteristik keuletan material, dinyatakan dalam Persamaan 2.5.

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

Dimana:

%RA : Reduksi luas penampang (%)

A_0 : Luas penampang sebelum pengujian (mm²)

A_f : Luas penampang sesudah pengujian (mm²)

2.8 *Strain Hardening* (Pengerasan Regangan)

Pengerasan regangan, atau dikenal juga sebagai pengerasan kerja, merupakan proses metalurgi yang signifikan dalam meningkatkan sifat mekanik titanium dan paduannya (Dieter & Dieter, 1986). Proses ini melibatkan deformasi plastis yang disengaja, yang mengakibatkan perubahan struktural pada tingkat mikroskopis dalam logam. Ketika titanium mengalami deformasi plastis, terjadi peningkatan kepadatan dislokasi dalam struktur kristalnya, yang pada gilirannya menghambat pergerakan dislokasi lebih lanjut (Callister & Rethwisch, 2013). Efek utama dari pengerasan regangan pada titanium adalah peningkatan kekuatan tarik dan kekerasan material. Namun, peningkatan ini biasanya disertai dengan penurunan keuletan dan ketangguhan. Perubahan sifat-sifat ini membuat titanium yang mengalami pengerasan regangan menjadi lebih tahan terhadap deformasi lebih lanjut,

tetapi juga lebih rentan terhadap kegagalan getas dalam kondisi tertentu. Untuk mengetahui laju pengerasan regangan perlu untuk diketahui nilai regangan sebenarnya dan tegangan sebenarnya. Nilai regangan sebenarnya dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\dot{\epsilon} = \ln (1+\epsilon) \quad (2.6)$$

Untuk nilai tegangan sebenarnya dapat dihitung dengan Persamaan 2.7:

$$\sigma_t = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2.7)$$

Untuk nilai K dan n di plot data *true strain* dan *true strain* maka diperoleh Persamaan 2.8:

$$\text{Log } \sigma = K \log + n \log \epsilon \quad (2.8)$$

Setelah diperoleh nilai K dan n maka untuk mencari nilai *strain hardening rate* maka digunakan Persamaan 2.9.

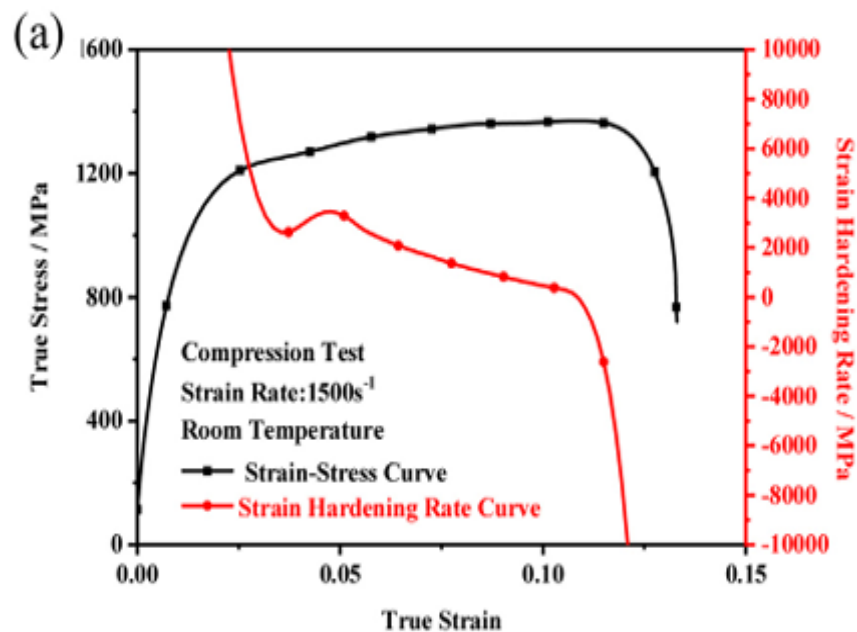
$$\sigma_T = K \epsilon_t^n \quad (2.9)$$

Dimana:

σ	= Tegangan teknik
σ_t	= Tegangan sebenarnya
ϵ	= Regangan teknik
$\dot{\epsilon}$	= Regangan sebenarnya
σ_T	= Laju pengerasan regangan
K	= Koefisien kekuatan
n	= Koefisien pengerasan regangan

Pada persamaan 2.9, K dan n adalah konstanta, nilai-nilai ini akan bervariasi dari satu paduan ke paduan lainnya dan juga akan bergantung pada kondisi material (misalnya, apakah telah mengalami deformasi plastis, perlakuan panas, dan sebagainya). Parameter n sering disebut sebagai koefisien

pengerasan regangan dan memiliki nilai kurang dari satu. Kurva laju pengerasan regangan dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Grafik *true stress-strain* dan *strain hardening rate* titanium (Yan et al., 2024)

2.9 Ductility (Keuletan)

Ductility atau keuletan adalah ukuran derajat deformasi plastis yang terjadi pada saat patah. Material yang mengalami sedikit atau tidak ada deformasi plastis pada saat patah disebut getas. Untuk setidaknya dua alasan, pengetahuan tentang keuletan material sangat penting. Pertama, ini membantu perancang mengetahui sejauh mana struktur akan mengalami kerusakan plastis sebelum patah, dan kedua, menentukan tingkat kerusakan yang diizinkan selama proses fabrikasi. Jika kesalahan dalam perhitungan tegangan desain terjadi, material yang relatif ulet dapat mengalami deformasi lokal tanpa merusak. Material yang rapuh dianggap mengalami fraktur regangan kurang dari 5%. Oleh karena itu, uji tegangan-regangan tarik dapat digunakan untuk menentukan beberapa sifat mekanik penting logam. Nilai tipikal temperatur ruangan untuk kekuatan luluh, kekuatan tarik, dan keuletan ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Sifat mekanik spesifik logam dan paduan dalam keadaan anil (Callister & Rethwisch, 2013)

<i>Metal alloy</i>	<i>Yield strenght MPa (ksi)</i>	<i>Tensile strenght MPa (ksi)</i>	<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]</i>
<i>Aluminum</i>	35 (5)	90 (13)	40
<i>Copper</i>	69 (10)	200 (29)	45
<i>Brass(70 Cu- 30Zn)</i>	75 (11)	300 (44)	68
<i>Iron</i>	130 (19)	262 (38)	45
<i>Nickel</i>	138 (26)	480 (70)	40
<i>Steel(1020)</i>	180 (28)	380 (55)	25
<i>Titanium</i>	450 (65)	520 (75)	25
<i>Molybdenum</i>	565 (82)	655 (95)	35

2.10 Fatik

Fatik merupakan kerusakan suatu bahan yang disebabkan oleh tegangan yang berfluktuasi yang besarannya lebih kecil dari tegangan *ultimate* (σ_u) ataupun tegangan luluh (*yield*). Apabila suatu logam diberikan tegangan secara terus menerus akan mengalami retak dan akan menyebabkan patah. Hal ini terjadi pada kondisi tegangan yang jauh lebih kecil daripada tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik. Keadaan awal yang ditemukan yaitu retak, retak tersebut akan merambat seiring dengan tegangan yang diberikan dan dikenal dengan istilah perambatan retak. Perambatan retak dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan umur kelelahan dari suatu bahan hingga bahan tersebut gagal (Chen, Shang, Xiao, et al., 2023). Terdapat tiga fase yang terjadi pada mekanisme kelelahan antara lain sebagai berikut :

2.10.1 *Crack initiation* (retak awal)

Secara umum, mekanisme kelelahan dimulai dengan retakan awal (*crack initiation*) yang muncul di daerah di mana tegangan berkumpul

di permukaan karena beban yang berulang atau di daerah yang memiliki kekuatan yang lebih rendah dalam bahan.

2.10.2 *Crack propagation* (retak merambat)

Pada tahap *crack propagation*, retakan mulai menyebar dari titik retak awal dan berkembang menjadi retakan kecil yang disebut *microcracks*. Perambatan atau penggabungan dari *microcracks* ini kemudian membentuk retakan yang lebih besar yang disebut *macrocracks*, yang pada akhirnya mengakibatkan kegagalan. Perambatan retak ditentukan dengan parameter ΔK dan K_{max} . Perambatan retak berlangsung seiring dengan peningkatan beban yang dikenakan pada material.

2.10.3 *Final fracture* (patah)

Patah adalah tahap terakhir dalam proses kerusakan material yang terjadi ketika material terus-menerus menerima beban. Patahan bisa terjadi karena material telah mengalami siklus tegangan-regangan yang menyebabkan kerusakan permanen. Ketika retak (*crack*) menyebar, penampang pada area tersebut akan berkurang hingga mencapai titik di mana tidak dapat menahan beban yang terakhir kali diterapkan. Pada tahap ini, perluasan retakan terjadi dengan cepat, menyebabkan bahan patah.

2.11 Perambatan Retak Fatik (*Crack Propagation*)

Metode untuk menganalisis umur kelelahan suatu struktur dengan memperhitungkan retakan awal (*crack initiation*) dikenal sebagai *fracture mechanic* dalam konsep mekanika retak. Retakan awal sering berkembang saat komponen atau struktur dikenai beban siklis selama operasi. Retakan dapat berkembang sehingga menyebabkan kegagalan struktur. Maka penting untuk diketahui berapa lama sebuah struktur dapat bertahan sejak retak awal

hingga kegagalan. Salah satu cara untuk melakukan ini adalah dengan menggunakan prinsip mekanika retak untuk menilai umur kelelahan. Berdasarkan konsep *fracture mechanic*, laju perambatan retak fatik dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak dan tegangan operasi. Hubungan dari laju perambatan retak fatik dapat dicari dengan persamaan *Paris law*. Persamaan *paris law* dinyatakan pada Persamaan 2.10.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.10)$$

Dimana :

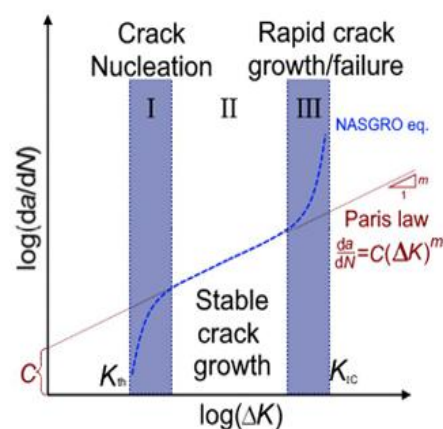
$\frac{da}{dN}$ = Laju perambatan retak (m/cycle)

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

C = Konstanta material

m = Konstanta material

Laju perambatan retak dipengaruhi oleh faktor intensitas tegangan. Retak dimulai di daerah paling lemah dan berkembang selama siklus pembebanan seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Dalam suatu *eksperiment*, perambatan retak biasanya diukur secara visual dengan menggunakan teleskop atau alat ultrasonik dan pengubah resistivitas listrik. Perubahan panjang retak dibandingkan dengan siklus dikenal sebagai pertumbuhan retak.



Gambar 2.9 Hubungan antara intensitas tegangan dan laju pertumbuhan retak (Seleš et al., 2021)

Keterangan :

1. Daerah I : Perambatan retak pada daerah ini menunjukkan karakteristik “*fatigue threshold*” yang merupakan fluktuasi kenaikan nilai *stress intensity factor* dengan parameter ΔK_{th} . Nilai ΔK harus memungkinkan terjadinya perambatan retak. Nilai da/dN antara daerah I dan daerah II dapat diketahui menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{da}{dn} = C (\Delta K^m - \Delta K + h^m) \quad (2.11)$$

2. Daerah II : Pada daerah II perambatan-perambatan retak mulai terjadi. Kecepatan perambatan retak dapat dihitung menggunakan hukum Paris-Erdogan:

$$\frac{da}{dn} = C (\Delta K)^m \quad (2.12)$$

Nilai da/dN antara daerah II dan daerah III (bila efek R diperhitungkan) adalah :

$$\frac{da}{dn} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R)KC - \Delta K} \quad (2.13)$$

3. Daerah III: Pada daerah III perambatan retak yang terjadi lebih cepat daripada daerah II, merupakan awal terjadinya kepecahan. Nilai da/dN antara daerah I, II dan III (bila efek R diperhitungkan) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\frac{da}{dn} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_y E} \left(\frac{\Delta K - \Delta K + h}{(1-R)(KC - \Delta K)} \right)^2 \quad (2.14)$$

Dimana :

da/dN = Kecepatan perambatan retak (mm/cycles)

ΔK = Range faktor intensitas tegangan (MPa. $\sqrt{m}$)

K = Faktor intensitas tegangan (MPa. $\sqrt{m}$)

KC = Harga kritis K (MPa. $\sqrt{m}$)

R = Rasio tegangan $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

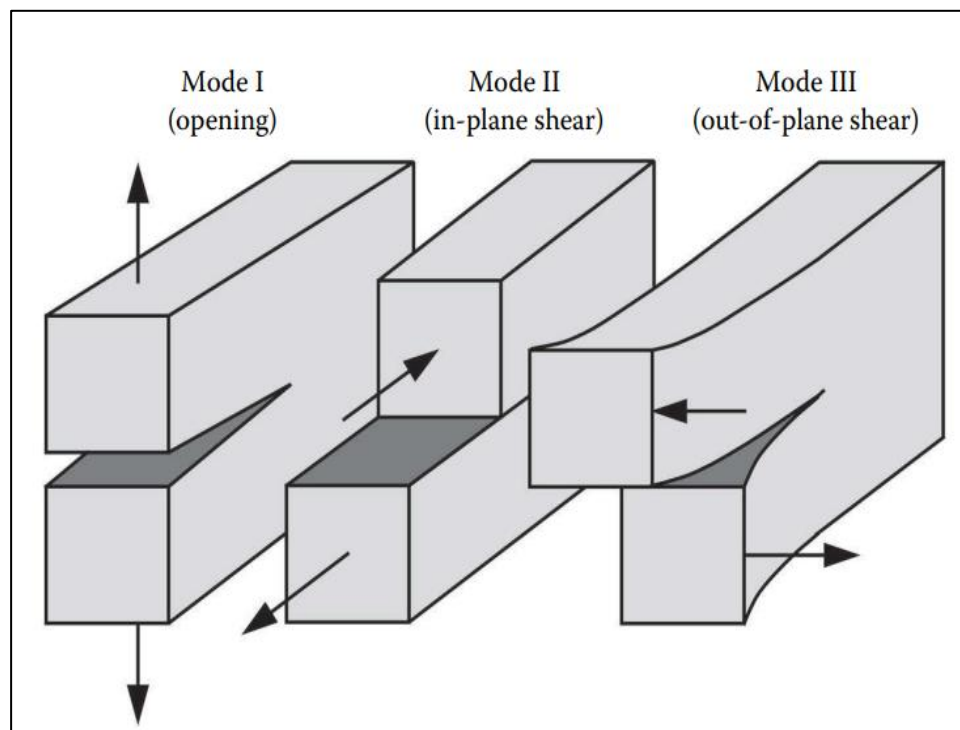
C = Parameter pertumbuhan retak

m = Parameter pertumbuhan retak

2.12 *Strees Intesity Factor (SIF)*

Strees intesity factor (SIF) adalah konsep kunci dalam mekanika fraktur yang digunakan untuk menggambarkan intensitas medan tegangan di sekitar ujung retak dalam material. *Strees intensity factor* menyediakan ukuran kuantitatif tentang seberapa besar konsentrasi tegangan di dekat ujung retak. Konsep ini sangat penting dalam analisis kegagalan struktur dan prediksi pertumbuhan retak.

Strees intesity factor biasanya dilambangkan dengan huruf K dan memiliki satuan $MPa\sqrt{m}$ (megapascal akar meter). Nilainya bergantung pada geometri struktur, ukuran retak, dan beban yang diterapkan. *Strees intensity factor* dapat dihitung untuk tiga mode dasar pembebanan: Mode I (pembukaan), mode II (geser dalam bidang), dan mode III (geser luar bidang), masing-masing dilambangkan sebagai KI, KII, dan KIII. Model pembebanan yang diterapkan pada retakan dapat dilihat pada Gambar 2.10 .



Gambar 2.10 Tiga mode pembebanan yang dapat diterapkan pada retakan (Anderson, 2017)

Keterangan :

1. Mode I: Mode membuka (*opening mode*), Beban tarik yang bekerja tegak lurus pada bidang retakan, cenderung membuka retakan lebih lebar. Ini adalah mode pembebanan yang paling umum terjadi.
2. Mode II: Mode geser *in-plane* (*in-plane shear mode*), Beban geser yang bekerja sejajar dengan bidang retakan dan tegak lurus dengan arah depan retakan, menyebabkan bidang retakan bergeser secara horizontal.
3. Mode III: Mode robek *out-of-plane* (*out-of-plane shear mode*), Beban geser yang bekerja sejajar dengan bidang retakan tetapi sejajar dengan arah depan retakan, menyebabkan robeknya bidang retakan.

Dalam analisis fraktur, *Stress intensity factor* (*SIF*) dibandingkan dengan ketangguhan fraktur material (*KIC*) untuk menentukan apakah retak akan merambat atau tidak. Jika *stress intensity factor* melebihi nilai kritis (*KIC*), retak akan mulai merambat. Hal ini membuat *tress intensity factor* menjadi parameter penting dalam desain komponen dan struktur, terutama dalam industri yang membutuhkan keandalan tinggi seperti *aerospace* dan nuklir. *Stress intensity factor* (*SIF*) merupakan alat penting dalam analisis distribusi tegangan di area sekitar ujung retak. Konsep fundamental dalam mekanika fraktur menyatakan bahwa kondisi tegangan di sekitar ujung retak pada suatu spesimen atau elemen struktural dapat dikarakterisasi secara komprehensif menggunakan parameter tunggal yang disebut intensitas tegangan (*KI*).

Strees intesity factor (*SIF*) dapat ditentukan dari panjang retak fatik alfa (α) dalam setiap rentang beban (ΔP). Hal tersebut akhirnya mengakibatkan retak menjalar didalam struktur material. *Stess intensity factor* terhadap panjang retak dapat dihitung menggunakan persamaan 2.15 (ASTM-E647, 2000). Persamaan ini berfungsi sebagai dasar dalam menentukan nilai kuantitatif dari *stress intensity factor* untuk berbagai konfigurasi retak dan kondisi pembebanan:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2.15)$$

dimana:

α : a/W ; valid jika $a/W \geq 0.2$

ΔP : Rentang beban

B : Tebal spesimen (mm)

W : Lebar spesimen (mm)

Selisih antara nilai tertinggi dan terendah faktor intensitas tegangan di ujung retakan bisa dinyatakan sebagai $\Delta K = K_{maks} - K_{min}$. Persamaan 2.15 mengasumsikan bahwa benda uji memiliki sifat elastis linear, isotropik, dan seragam. Namun, rumus tersebut tidak memperhitungkan kemungkinan adanya pengaruh tegangan sisa atau penutupan retakan terhadap nilai ΔK yang diperhitungkan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan Laboratorium Mineral BRIN Tanjung Bintang Lampung Selatan berlangsung dari Oktober 2024 hingga Februari 2025.

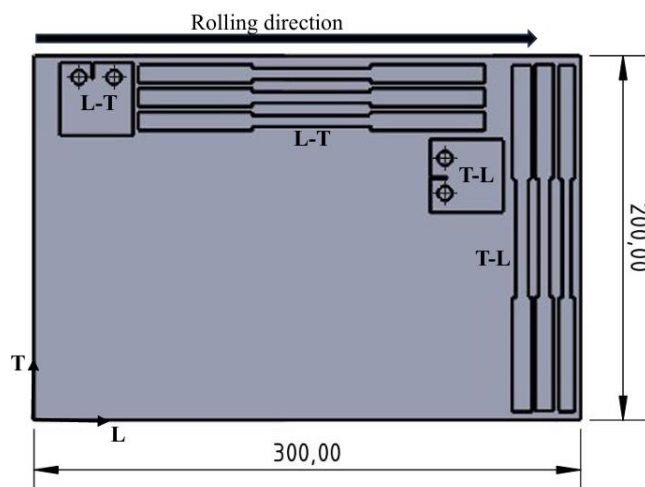
3.2 Bahan Yang Digunakan

Dalam pelaksanaan penelitian ini menggunakan bahan bahan berikut, antara lain:

3.2.1 Titanium *grade 2*

Bahan yang digunakan sebagai spesimen untuk penelitian adalah titanium *grade 2*. Dimensi spesimen pengujian disesuaikan dengan standar ASTM.

3.2.2 Pengambilan spesimen uji

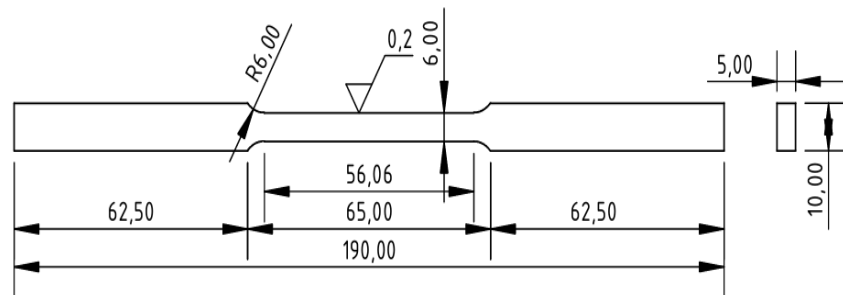


Gambar 3.1 Arah pengerolan titanium *grade 2*

Gambar 3.1 merupakan gambar posisi pengambilan spesimen uji terhadap arah pengerolan titanium *grade 2*.

3.2.3 Spesimen uji tarik

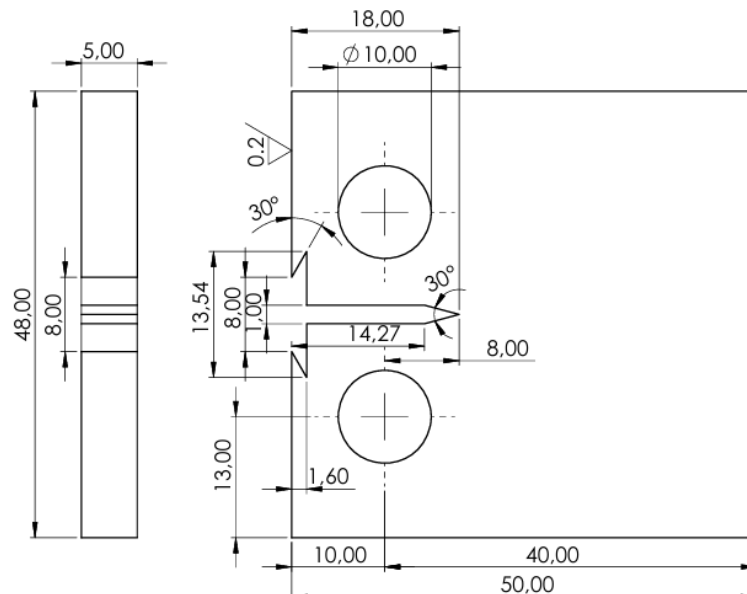
Spesimen uji tarik yang digunakan sesuai dengan standar ASTM E8. Dimensi spesimen uji tarik dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Spesimen uji tarik standar ASTM E8

3.2.4 Spesimen uji perambatan retak fatik

Spesimen uji perambatan retak fatik disesuaikan dengan standar ASTM E647. Dimensi pengujian perambatan retak fatik dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Spesimen pengujian perambatan retak fatik (ASTM E647)

3.3 Peralatan Yang Digunakan

Adapun alat yang digunakan pada pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.3.1 Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Mesin MTS *Landmark* 100 kN digunakan untuk uji tarik dan uji perambatan retak fatik pada spesimen.



Gambar 3.4. MTS *Landmark* 100 kN

3.3.2 Jangka sorong (*vernier caliper*)

Panjang spesimen uji sebelum dan sesudah pengujian tarik dan fatik diukur dengan jangka sorong untuk menunjukkan perbedaan panjangnya. Jangka sorong yang digunakan ditampilkan Gambar 3.5.

Tabel 3.1 Spesifikasi jangka sorong (*vernier caliper*)

Detail spesifikasi	
Nama	Mutituyo
Akurasi	0.02 mm / 0.001 in (100 mm)
Range	0-150 mm/ 0-6 in
Indikasi Minimum	0.01 mm/0.0005 in
Standart Temperature	20 °C
Berat	800 gram



Gambar 3.5 Jangka sorong (*vernier caliper*)

3.3.3 *Clip Gauge on Displacement (COD)*

Clip Gauge on Displacement (COD) digunakan untuk mengukur variasi celah di antara takik pada spesimen selama pengujian rambatan retak fatik. *Clip Gauge on Displacement* dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan spesifikasinya pada Tabel 3.2.



Gambar 3. 6 *Clip Gage on Displacement (COD)*

Tabel 3. 2 Spesifikasi *clip gauge on displacement (COD)*

Detail Spesifikasi	
Nama	Epsilon
Model	3541-008M-040M-ST
Eksitasi	5-10 VDC

Detail Spesifikasi	
<i>Gauge Length</i>	8 mm
Linearitas	$\leq 0.2\%$
Travel	+4 mm, -1 mm
Temperatur	-40°C To 100 °C
Kekuatan Operasi	9 - 14 N (2 - 3 lbs)

3.3.4 Clevis

Dalam pengujian perambatan retak fatik, spesimen uji dicekam dengan alat *clevis* pada mesin *MTS Landmark 100 kN*. *Clevis* yang digunakan pada pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Clevis*

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Persiapan spesimen

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan adalah pelat titanium *grade 2* yang mengalami proses pembentukan *hot rolling*.

3.4.2 Pembuatan spesimen uji

Spesimen uji dibuat sesuai dengan standar dimensi ASTM E8 untuk spesimen uji tarik dan ASTM E647 untuk spesimen uji fatik. Spesimen dibuat melalui proses permesinan *Vertical Machining Center (CNC milling machine)*.

3.4.3 Uji tarik statis

Untuk mendapatkan nilai tegangan luluh (σ_y) dan modulus elastisitas (E), pengujian tarik harus dilakukan terlebih dahulu. Parameter yang digunakan pada proses uji tarik statis ditampilkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Parameter pengujian tarik

No	Parameter	Nilai
1	Standar	ASTM E8
2	<i>Speed</i> (kN/s)	0,125
3	<i>Gage length</i> (mm)	50
4	Tebal spesimen (mm)	4,12
5	Lebar spesimen (mm)	5,90
6	Frekuensi (Hz)	20
7	Tipe geometri	<i>Rectangle for tension</i>

Langkah langkah pengujian tarik statis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji.
2. Memastikan spesimen uji telah sesuai dengan standar ASTM E 8, mengukur dan mencatat dimensi spesimen (panjang, diameter, *gauge length*).
3. Menghidupkan *Hydraulic Power Unit (HPU)* dan *chiller*.
4. Menghidupkan temperatur kontroler dan MTS *Landmark* 100 kN.
5. Memastikan MTS *Landmark* 100 kN, *chiller*, *Hydraulic Power Unit (HPU)*, temperatur kontroler, dan komputer dalam kondisi baik dan berfungsi dengan normal.
6. Membuka program *controller 793B* pada komputer.

7. Pada station manager, klik *checklist* pada *exclusive control* dan *enable manual command* pada *manual command*.
8. Pada station manager di *controls detector*, ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *interlock* ke *disable*. Klik *reset* pada *interlock 1* di *station manager*.
9. Klik *HPU Power Low* dan tunggu sampai lampu kuning pada tombol berhenti berkedip. Klik *HPU Power High* dan tunggu beberapa detik. Untuk *HSM*, klik *HSM Power High* dan tunggu sampai lampu kuning berhenti berkedip.
10. Setelah menemukan posisi aktuator pada *manual command*, klik sedikit pada aktuator untuk membuka katup. Pastikan posisi aktuator aman terhadap *grip crosshead* atas. Kemudian naikan aktuator ke posisi nol (*zero*).
11. Pada *detector*, ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *disable* ke *interlock*.
12. Membuka *software MTS Test Suite* (MPE), memilih template uji tarik statis.
13. Memasang spesimen uji pada *cross head grip* atas kemudian cekam spesimen.
14. Selanjutnya, *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk ke *grip* bawah dengan kedalaman 45 mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk bagian *grip* spesimen.
15. Meluruskan *grip* bawah dengan *grip* atas. Pada *manual command*, klik *mode control mode* dan ganti *displacement* ke *force*. Cekam *grip* bagian bawah.
16. Mereset *interlock 1* di *station manager* dan *un-checklist enable manual command* pada *manual command*.
17. Pada *software MTS test suite*, klik *new test run*.
18. Mengatur *variabel setup tensile test*, masukkan data panjang spesimen, *gauge length*, diameter, *initial speed*, dan *secondary speed* (mm/s).
19. Mengklik klik *ok* dan *run test*.

3.4.4 Pengujian perambatan retak fatik

Menentukan rentang beban pengujian perambatan retak fatik digunakan Persamaan 3.1 berikut (ASTM-E647, 2000).

$$P_f = 0,2Bb_0^2\sigma_Y/(2W + a_0) \quad (3.1)$$

Dimana :

P_f = Rentang beban

B = Tebal spesimen

b_0 = $W - a_0$

σ_Y = $(Yield\ strength + Ultimate\ strength) / 2$

W = Lebar spesimen dari pusat pin

a_0 = Jarak retak dari pusat pin

Parameter pengujian yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.4. berikut.

Tabel 3. 4 Parameter pengujian retak fatik

No	Parameter	Nilai
1	Standar	ASTM E647
2	$F_{Max\ precrack}$ (kN)	1,3125
	$F_{Min\ precrack}$ ((kN)	0,1312
3	$F_{Max\ FCG}$ (kN)	1,3781
	$F_{Min\ FCG}$ ((kN)	0,1378
4	Rasio	0,1
5	Frekuensi (Hz)	10
6	Panjang (mm)	50
7	Lebar (mm)	48
8	Tebal (mm)	4.12
9	Temperatur (°C)	22

Pengujian perambatan retak fatik dilakukan dua tahapan yaitu tahap *precrack* dan pengujian perambatan retak fatik:

3.4.4.1 Tahap *precrack*

Pada pengujian perambatan retak fatik, prosedur berikut adalah prosedur yang diikuti :

1. Menyiapkan spesimen *CT* (*Compact Tension*) dengan mengikuti standar ASTM E647.
2. Menghidupkan *chiller* dan *Hydraulic Power Unit (HPU)*
3. Menghidupkan temperatur kontroler, *MTS Landmark 100* kN dan lampu penerang.
4. Menghidupkan komputer dan membuka program *station manager*.
5. Pada *station manager*, aktifkan *exclusive control* dan *enable manual command*.
6. Ubah pengaturan *axial displacement* dari *interlock* ke *disable*.
7. Klik *HPU Power Low* dan tunggu sampai lampu kuning pada tombol berhenti berkedip. Klik *HPU Power High* dan tunggu beberapa detik. Untuk *HSM*, klik *HSM Power High* dan tunggu sampai lampu kuning berhenti berkedip.
8. Setelah menemukan posisi aktuator pada *manual command*, klik sedikit pada aktuator untuk membuka katup. Pastikan posisi aktuator aman terhadap *grip crosshead* atas. Kemudian naikan aktuator ke posisi nol (zero).
9. Pada detektor, ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *disable* ke *interlock*.
10. Memasang COD pada spesimen pada bagian takikan yang telah disediakan.
11. Memasang spesimen *CT* pada *grip* atas menggunakan *pin loading*.

12. Menurunkan *cross head* dan pasang *pin loading* pada *grip* bawah selanjutnya pastikan spesimen terpasang lurus dan sejajar.
13. Kemudian, reset pada *interlock 1 station manager* dan *unlocklist enable manual command* pada *manual command*.
14. Membuka program *MTS Test Suite (MPE)*. Pilih *template* pengujian *Fatigue Crack Growth Test Titanium 2024*.
15. Dalam program *MTS Test Suite*, klik tombol *Run New Test*. Kemudian, mengatur variabel *fatigue crack growth testing* yaitu dengan memasukkan data tebal spesimen, *compliment koefisien* C0-C5 sesuai standar ASTM E467 V0, total *cycles* 500000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament* 1000, *compliment koefisien* C0-C5, initial crack 8.00 mm, *final crack* 9.00 mm dan *Fmax* 1,3125 kN dan *Fmin* 0,1312 kN.
16. Memulai pengujian dengan mengklik *run test*

3.4.4.2 Tahap pengujian perambatan retak fatik

Setelah tahap *precracking* maka dilakukan pengujian perambatan retak fatik. Proses pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Mengklik *new test run* pada *software MTS Test Suite*.
2. Memilih *template* hasil *precrack* yang telah dilakukan sebelumnya.
3. Mengubah variabel beban *Fmax* menjadi 1,3781 kN dan *Fmin* menjadi 1,3781 (ditambah sebesar 5 % dari beban *precrack*), mengubah total *cycles* menjadi 1000000, *cycle increament* menjadi 2000, *Initial crack* 9.00 mm dan *final crack* 32.00 mm.
4. Memastikan data yang dimasukkan sesuai.
5. Memulai pengujian dengan mengklik *run test*.

3.5 Pengambilan Data

Data yang diperoleh dari hasil penelitian ini dilampirkan dalam tabel berikut.

3.5.1 Pengujian tarik

Tabel 3.5. Data hasil uji tarik

Spesimen	Tegangan (MPa)		Energi plastis (kJ)	Energi elastis (kJ)	Modulus elastis (MPa)	Elongasi (%)
	Luluh	Maksimum				
Titanium <i>grade 2</i>						

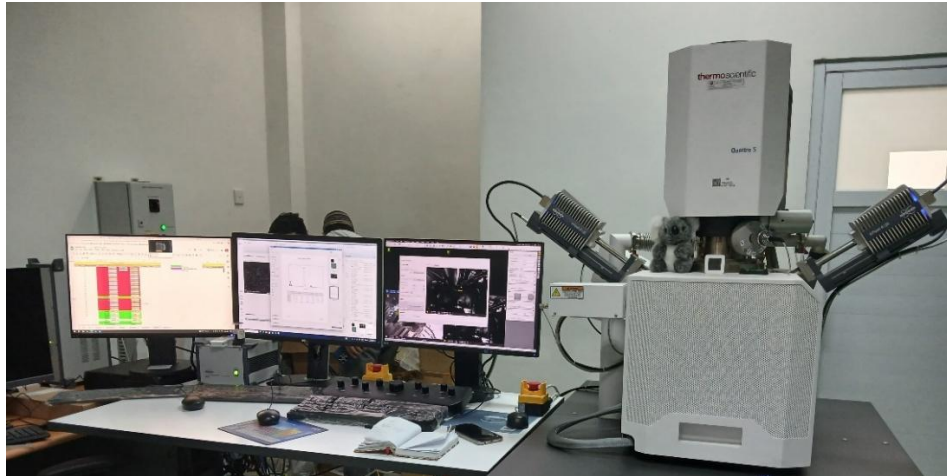
3.5.2 Pengujian perambatan retak fatik

Tabel 3.6. Data hasil uji perambatan retak fatik

No	Jumlah siklus	Panjang retak (mm)
1	2000	
2	4000	
3	6000	
4	8000	
dst		

3.6 SEM Fraktografi

Setelah pengujian perambatan retak fatik pada spesimen titanium *grade 2*, fraktografi SEM dilakukan untuk mengetahui perpatahan yang terjadi. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan alat *scanning electron microscopy* Gambar 3.8 dengan spesifikasi ditampilkan pada Tabel 3.7.



Gambar 3. 8 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Tabel 3. 7 Spesifikasi alat uji *SEM-EDS*

No	<i>SEM Thermo Scientific Quattro S</i>	Spesifikasi
1	<i>Magnification</i>	Pembesaran hingga 150.000 kali
2	Kelengkapan	Dekstop <i>SEM</i> yang dilengkapi dengan <i>EDS</i>

3.7 Observasi Mikrostruktur

Dengan menggunakan alat mikroskop optik (OM), observasi mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro dan mempelajari fasa-fasa yang terjadi pada titanium *grade 2*. Mikroskop Optik yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 *Inverted Optycal Microscope Olympus GX 51*

3.8 Metode Menghitung Laju Pertumbuhan Retak

Metode yang digunakan untuk menghitung perambatan retak (da/dN) pada penelitian ini adalah metode polinomial (*polynomial method*). Nilai perbandingan panjang retak dan jumlah siklus diperoleh dari hasil pengamatan spesimen uji. Setelah diketahui perbandingan jumlah panjang retak dan jumlah siklus maka dapat dicari laju perambatan retak fatik (da/dN) dengan metode *polynomial*. Untuk menghitung da/dN , *polynomial* orde kedua digunakan ke rangkaian $(2n+1)$ titik data yang tersusun berurutan, biasanya n memiliki nilai yang sama dengan 1, 2, 3, 4 atau 5 (ASTM-E647, 2000).

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (3.2)$$

Dimana:

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) \leq +1$$

Nilai b_0 , b_1 , dan b_2 adalah parameter regresi yang ditentukan dengan menggunakan metode kuadrat terkecil minimalisasi kuadrat deviasi antara nilai ukuran retakan yang diamati dan nilai yang ditetapkan pada rentang $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$. nilai dari $\hat{a}$ merupakan nilai retak di N_i . Parameter $C_1 = \frac{1}{2} (N_{i-n} + N_{i+n})$ dan $C_2 = \frac{1}{2} (N_{i+n} - N_{i-n})$ digunakan untuk mengurangi kesulitan numerik dengan menskalakan data masukan terkait dengan proses menghitung parameter regresi. Laju pertumbuhan retak pada N_i , dihitung dari turunan parabola sebelumnya, diperoleh dari Persamaan 3.2.

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{\hat{a}_i} = \left(\frac{b_1}{b_2} \right) + 2b_2 \left(\frac{(N_i - C_1)}{C_2^2} \right) \quad (3.3)$$

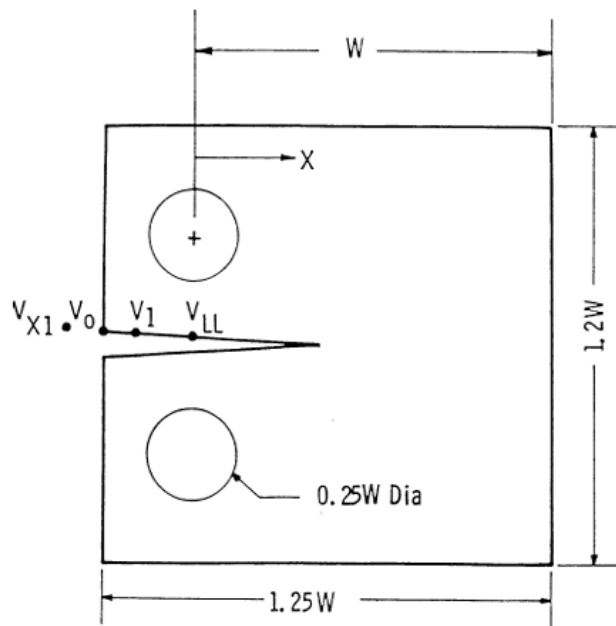
Nilai ΔK pada da/dN adalah nilai ukuran retak pada $\hat{a}_i$ sesuai dengan N_i . Nilai ΔK dapat dicari dengan persamaan 3.4.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)^{\frac{3}{2}}}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} Y \quad (3.4)$$

$$Y = (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3.5)$$

Dengan $\alpha = a/W$

$$\alpha = \frac{a}{W} = C_0 + C_1U + C_2U^2 + C_3U^3 + C_4U^4 + C_5U^5 \quad (3.6)$$



Gambar 3. 10 Geometri spesimen C(T)

Tabel 3. 8 Ukuran retak yang distandarkan sebagai fungsi dari kesesuaian elastisitas tegangan untuk spesimen C (T)

Meas location	x/w	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C(T) Specimen							
V_{X1}	-0,345	1,0012	-4,9165	23,057	-323,91	1798,3	-3513,2
V_0	-0,250	1,0010	-4,6695	18,460	-236,82	1214,9	-2143,6
V_1	-0,1576	1,0008	-4,4473	15,400	-180,55	870,92	-1411,3
V_{LL}	0	1,0002	-4,0632	11,242	-106,04	464,33	-650,68

Nilai U diperoleh dengan Persamaan (3.7)

$$U = \frac{1}{(1+\sqrt{ECB})} \quad (3.7)$$

$$ECB = \left(E \left(\frac{1}{slope}\right)\right) B \quad (3.8)$$

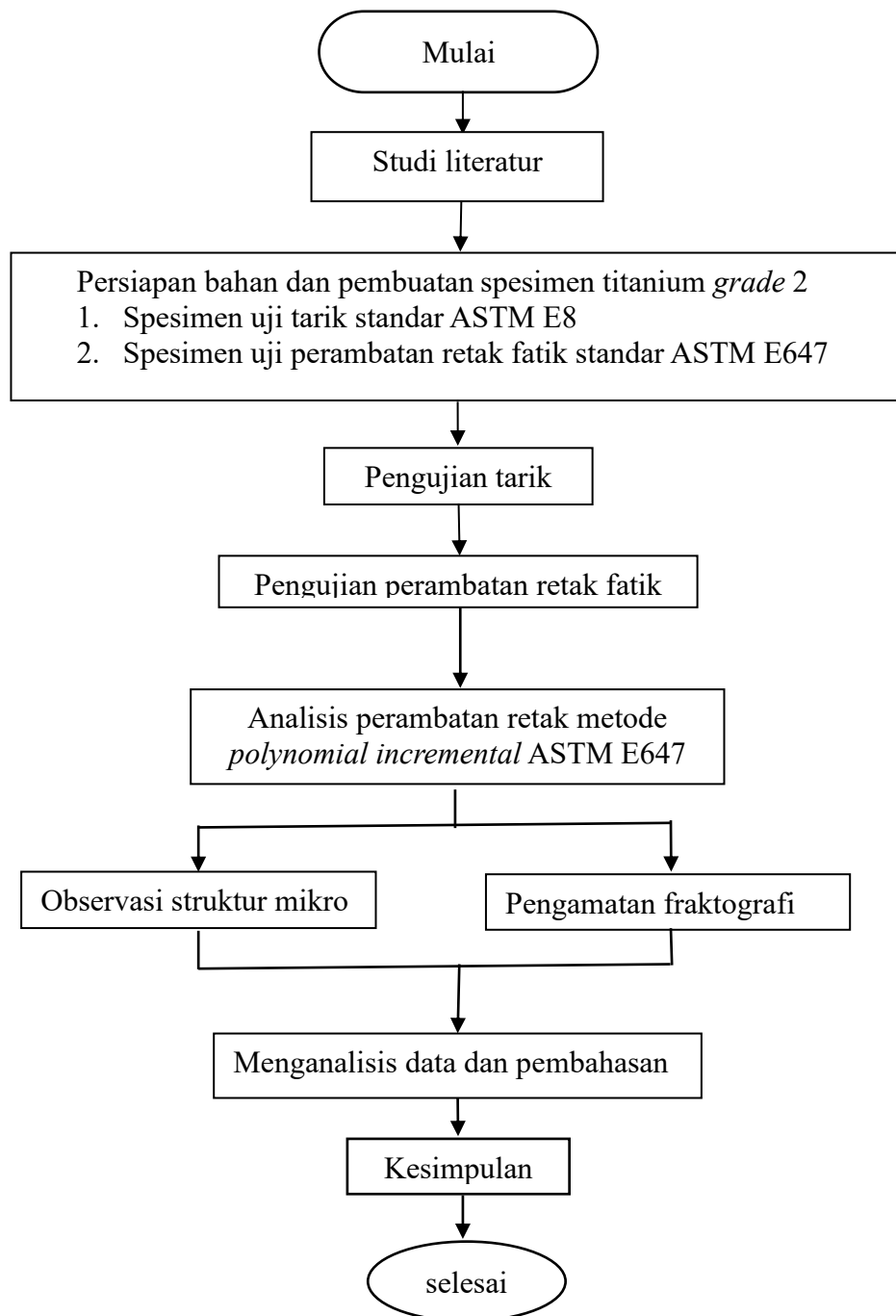
Dimana :

- α : a/W ; valid jika $0,2 \leq a/W \leq 0,975$
- ΔP : Rentang beban
- B : Tebal spesimen (mm)
- C : v/p (*compliance*)
- E : Modulus elastisitas
- U : Fungsi *compliance* pada panjang retak
- W : Lebar spesimen (mm)

Analisis data hasil pengujian retak fatik dihitung menggunakan metode *polynomial incremental* dengan menggunakan program komputer *quick basic* 64. Geometri C(T) spesimen ditentukan dengan K-kalibrasi spesimen. Keluaran program mengandung nilai tabulasi dari data *input* dan data *output* serta informasi tentang spesimen, variable pembebanan, dan lingkungan. Nilai total retakan A(Mcas.) dan A(Reg.). Nilai ΔK dan da/dN diberikan dalam satuan yang sama dengan variabel input.

3.9 Diagram Alur Penelitian

Diagram alur penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 11 Diagram alur penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang dapat penulis berikan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Nilai kekuatan tarik pada pembebanan searah pengerolan (LT) sebesar $675 \pm 0,338$ MPa dan elongasi yang terjadi sebesar $16,69 \pm 0,672$ %. Sedangkan pada pembebanan tegak lurus arah pengerolan (TL), nilai kekuatan tarik diperoleh sebesar $621 \pm 6,415$ MPa dengan elongasi sebesar $21,65 \pm 0,430$ %. Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada arah LT karena butir-butir yang terelongasi dan terdeformasi searah pengerolan memberikan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Karakteristik perambatan retak fatik dengan arah pembebanan LT lebih baik dibandingkan dengan arah pembebanan TL. Spesimen pembebanan LT mendapatkan nilai konstanta eksponensial (m) sebesar 3,4566 lebih kecil dari arah pembebanan TL yaitu sebesar 3.5117. Dimana semakin besar nilai konstanta eksponensial (m) maka semakin cepat perambatan retak fatik yang terjadi. Maka perambatan retak fatik pembebanan TL lebih cepat dibanding pembebanan LT.
2. Laju pengerasan regangan tertinggi terjadi pada awal deformasi (regangan rendah). Pada pembebanan tegak lurus arah pengerolan (TL) nilai awal *strain hardening rate* pada awal deformasi 10604 MPa dan menurun seiring dengan terjadinya deformasi. Sedangkan pada pembebanan searah pengerolan (LT) nilai awal *strain hardening rate* 6577 MPa. Pengerasan regangan pada arah TL konsisten bertahan lebih tinggi pada deformasi yang terjadi. Keberadaan batas butir dan presipitat menjadi faktor yang mempengaruhi *strain hardening rate* yang terjadi.

3. Butir struktur memanjang searah dengan arah pengerolan. Orientasi struktur mikro titanium yang dihasilkan memiliki pengaruh terhadap respon mekanik material ketika diberi pembebanan. Pada pembebanan searah pengerolan (LT), butir-butir yang terelongasi dan terdeformasi searah pengerolan memberikan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Sebaliknya ketika pembebanan diberikan tegak lurus terhadap arah pengerolan (TL) memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dan keuletan yang lebih tinggi. Hal ini dipengaruhi batas butir dan ditemukannya presipitat yang berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi, sehingga dengan lebih sedikitnya batas butir melintang pada arah pengerolan dislokasi lebih sulit bergerak maka material menjadi lebih kuat.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk mendukung penelitian lanjutan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan antara lain:

1. Sebaiknya dilakukan pengujian perambatan retak fatik titanium *grade 2* pada berbagai temperatur operasi.
2. Sebaiknya melakukan perlakuan panas titanium *grade 2* supaya diketahui nilai kekuatan tarik, laju perambatan retak fatik, dan struktur mikro dari masing masing perlakuan panas yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, Fourth Edition* (Fourth Edition ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315370293>
- ASM Aerospace Specification Metals Inc. Retrieved February 09, 2025 from <https://aerospacemetals.com/titanium-plates-sheets/>
- ASTM-E647. (2000). Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. *ASTM International, West Conshohocken*.
- Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). Perspectives on Titanium Science and Technology. *Acta Materialia*, 61(3), 844-879. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.043>
- Budiman, H. (2016). ANALISIS PENGUJIAN TARIK (TENSILE TEST) PADA BAJA ST37 DENGAN ALAT BANTU UKUR LOAD CELL. *Jurnal J-Ensitem, Vol 03|No. 01*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition: Ninth Edition*. John Wiley and Sons, Incorporated. <https://books.google.co.id/books?id=TmxbAgAAQBAJ>
- Chen, C.-L., Shang, D.-G., Tang, Z.-Q., Li, D.-H., Yin, X., & Guo, Y.-E. (2023). Fatigue failure mechanism of Ti60 titanium alloy in HCF and VHCF regime at different temperatures. *Engineering Failure Analysis*, 151, 107393. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107393>
- Chen, C.-L., Shang, D.-G., Xiao, N.-M., Li, X.-W., Sha, A.-X., Li, J., Li, J.-X., Tang, Z.-Q., Han, Z.-Y., Guo, Y.-E., & Li, D.-H. (2023). Fatigue life prediction of Ti60 titanium alloy under very high cycle loading at different temperatures. *International Journal of Fatigue*, 176, 107838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107838>
- Dieter, G., & Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.co.id/books?id=4pZRAAAAMAAJ>
- Donachie, M. J. (2000). *Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition*. ASM International. <https://books.google.co.id/books?id=HgzukknbnGAC>

- Du, C., Pan, Q., Chen, S., & Tian, S. (2020). Effect of rolling on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 DS-FSW plate. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138692. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138692>
- Fang, Z., Paramore, J., Sun, P., Chandran, K. S. R., Zhang, Y., Xia, Y., Cao, F., Koopman, M., & Free, M. (2017). Powder metallurgy of titanium – past, present, and future. *International Materials Reviews*, 63, 1-53. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1366003>
- Gholami Bazehhour, B., Srinivasan, S., Kale, C., Peralta, P., & Solanki, K. (2023). Fatigue crack growth behavior of titanium with oxygen impurities: Experiments and modeling. *Engineering Fracture Mechanics*, 289, 109380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109380>
- Hu, J., Zhang, D., Hu, Z., Wang, S., Xiao, L., Gao, B., Yin, D., Zhou, H., & Zhao, Y. (2024). Improving the uniform elongation of ultrafine-grained pure titanium through judicious allocation of work hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 330, 118484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118484>
- Jia, R., Zeng, W., Zhao, Z., Wang, B., Chen, H., Xu, J., & Wang, Q. (2024). Crack nucleation and dislocation activities in titanium alloys with the strong transverse texture: Insights for enhancing dwell fatigue resistance. *International Journal of Plasticity*, 175, 103938. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.103938>
- Joshi, V. A. (2006). Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features.
- Liu, F., Chen, Y., Li, L., Wang, C., Wang, Q., & Liu, Y. (2024). Influence of welded pores on fatigue behavior of TC17 titanium alloy welded joints subjected to gigacycle regime at room and high temperatures. *Journal of Materials Science & Technology*, 178, 1-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.09.006>
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). Titanium : Engineering Materials and Processes.
- Mote, A., Lacy, T. E., & Newman, J. C. (2024). Assessing fatigue crack growth thresholds for a Ti-6Al-4V (STOA) alloy using two experimental methods. *Engineering Fracture Mechanics*, 301, 110006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110006>
- Ren, J. Q., Li, L., Wang, Q., Xin, C., Gao, Q., Li, J. C., Xue, H. T., Lu, X. F., & Tang, F. L. (2024). Effect of environmental media on the growth rate of fatigue crack in TC4 titanium alloy: Seawater and air. *Corrosion Science*, 230, 111941. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.111941>

- Salindeho, R., D. , Jan Soukota, Rudy Poeng. (2013). Pemodelan Pengujian Tarik Untuk Menganalisis Sifat Mekanik Material. *JURNAL POROS TEKNIK MESIN UNSRAT*, 2(2).
- Shirzadi, A., Laik, A., Tewari, R., Orsborn, J., & Dey, G. (2018). Gallium-assisted diffusion bonding of stainless steel to titanium; microstructural evolution and bond strength. *Materialia*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.09.009>
- Suhartono, H. A. (2006). Perambatan Retak Akibat Pembebanan Multiaksial. *Indonesian Journal of Materials Science*, 7(3). <https://doi.org/10.17146/jsmi.2006.7.3.4990>
- Syed, A. K., Zhang, X., Davis, A. E., Kennedy, J. R., Martina, F., Ding, J., Williams, S., & Prangnell, P. B. (2021). Effect of deposition strategies on fatigue crack growth behaviour of wire + arc additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 814, 141194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141194>
- Trisnadi, W. (2019). A Zenk Galvalum Analisa kekuatan tarik Seng Galvalum terhadap beban yang di berikan. *Machine : Jurnal Teknik Mesin*, 5, 9-14. <https://doi.org/10.33019/jm.v5i1.767>
- Wang, J., Lu, H., Wen, Z., Lian, Y., Li, Z., & Yue, Z. (2022). Prediction of fatigue life of TC4 titanium alloy based on normalized equivalent initial flaw size model. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 122, 103563. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103563>
- Wen, X., Wan, M., Huang, C., Tan, Y., Lei, M., Liang, Y., & Cai, X. (2019). Effect of microstructure on tensile properties, impact toughness and fracture toughness of TC21 alloy. *Materials & Design*, 180, 107898. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107898>
- Yan, Q., Lin, X., Yu, J., Lu, X., & Huang, W. (2024). Strain hardening mechanism induced by basal/pyramidal dislocation reactions in a 3D-printed high-strength titanium alloy. *Materials Research Letters*, 12, 852-859. <https://doi.org/10.1080/21663831.2024.2395433>
- Zhang, D., Zhang, M., Lin, R., Liu, G., Li, J., & Feng, Y. (2021). Strengthening and strain hardening mechanisms of a plain medium carbon steel by multiscale lamellar structures. *Materials Science and Engineering: A*, 827, 142091. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142091>
- (Syed et al., 2021; Wang et al., 2022)

LAMPIRAN