

**ANALISIS PERILAKU Pengerasan Regangan dan
Perambatan Retak Fatik Titanium Grade 2**

(Tesis)

Oleh

HAMIMATUN NISWAH

NPM 2225021008



**PROGRAM PASCASARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS PERILAKU Pengerasan Regangan DAN PERAMBATAN RETAK FATIK TITANIUM GRADE 2

Oleh

HAMIMATUN NISWAH

Titanium adalah logam yang memiliki keuletan tinggi, tahan korosi yang baik, tahan terhadap temperatur ekstrim dan semakin banyak digunakan dalam berbagai bidang. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik dan uji perambatan retak fatik, tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan perilaku pengerasan regangan dan perambatan retak fatik dari Titanium Grade 2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju pengerasan regangan lebih tinggi pada spesimen yang tegak lurus terhadap arah pengerolan dibandingkan spesimen yang searah pengerolan. Hal ini merupakan akibat proses pengerolan yang memberikan sifat anisotropi setelah pengerolan dilakukan. Sifat anisotropi mengakibatkan material memiliki sifat mekanik yang berbeda pada arah yang berbeda. Pada tegak lurus terhadap arah pengerolan, material lebih getas dan lebih keras karena resistensi terhadap deformasi plastis lebih besar. Sedangkan pada searah pengerolan material lebih ulet dan mudah dibentuk, karena resistensi terhadap deformasi plastis lebih kecil dibandingkan material tegak lurus terhadap arah pengerolan. Untuk laju perambatan retak fatik, spesimen tegak lurus terhadap pengerolan retak cenderung lebih cepat merambat dibandingkan spesimen yang searah pengerolan. Hal ini dapat terjadi karena tidak ada halangan atau hambatan dalam bentuk serat mikrostruktur yang mendukung laju propagasi retak. Sedangkan hambatan seperti inklusi seringkali sejajar dengan arah pengerolan, sehingga perambatan retak lebih lambat terjadi karena adanya dukungan dari hambatan untuk mengontrol propagasi retak.

Kata Kunci— Perambatan retak fatik, Perilaku pengerasan pegangan, Titanium Grade 2

ABSTRACT

ANALYSIS OF STRAIN HARDENING BEHAVIOR AND FATIGUE CRACK PROPAGATION OF TITANIUM GRADE 2

By

HAMIMATUN NISWAH

Titanium is a metal that has high ductility, good corrosion resistance, resistance to extreme temperatures and is increasingly used in various fields. The tests carried out were tensile testing and fatigue crack propagation test, purpose of this test was to determine the strain hardening and fatigue crack propagation behavior of Titanium Grade 2. The test results show that the strain hardening rate is higher in specimens perpendicular to the rolling direction than in specimens parallel to the rolling direction. This is a result of the rolling process which provides anisotropic properties to the material after rolling is carried out. This anisotropic property causes the material to have different mechanical properties in different directions. At perpendicular to the rolling direction, the material is more brittle and harder because the resistance to plastic deformation is greater. While in the direction of rolling the material is ductile and easy to form, because the resistance to plastic deformation is smaller than the material perpendicular to the rolling direction. For the rate of fatigue crack propagation, specimens perpendicular to the rolling of cracks tend to propagate faster than specimens in the direction of rolling. This can happen because there are no obstacles or barriers in the form of microstructure fibers that support the rate of crack propagation. While obstacles such as inclusions are often parallel to the rolling direction, so that crack propagation occurs more slowly because of the support of obstacles to control crack propagation.

Keywords— Fatigue crack propagation, Strain hardening behavior, Titanium Grade 2

**ANALISIS PERILAKU Pengerasan Regangan dan
Perambatan Retak Fatik Titanium Grade 2**

Oleh:

HAMIMATUN NISWAH

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : **ANALISIS PERILAKU Pengerasan
REGANGAN DAN PERAMBATAN
RETAK FATIK TITANIUM GRADE 2**

Nama Mahasiswa : **Hamimatun Niswah**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2225021008

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

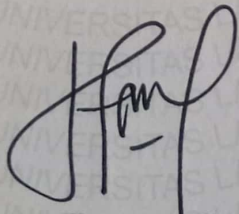


Komisi Pembimbing

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

Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.
NIP 197004121997031006

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin


Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP 196906202000031001

MENGESAHKAN

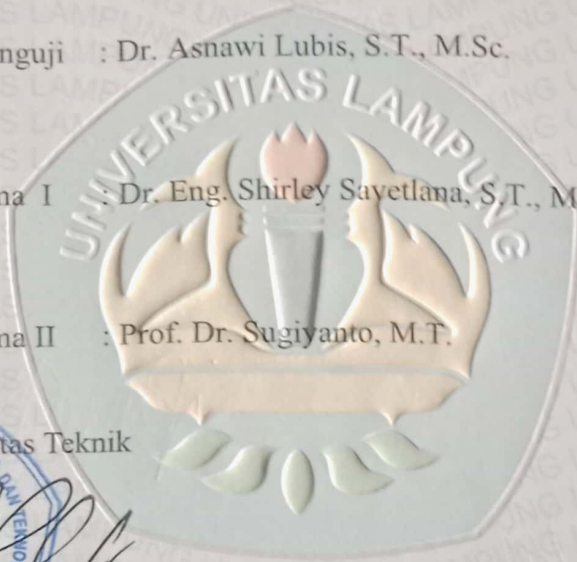
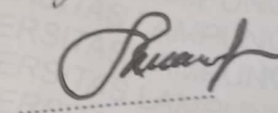
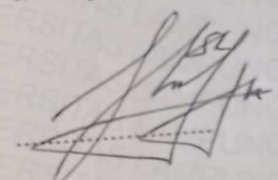
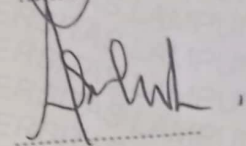
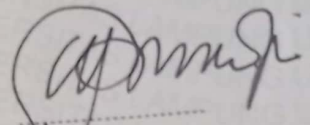
1. Tim Penguji

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

Sekretaris Penguji : Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.

Penguji Utama I : Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.

Penguji Utama II : Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.



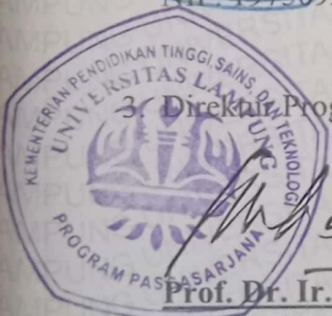
2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 197509282001121002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Muhandi, M. Si.

NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Thesis : 21 Januari 2025

PERNYATAAN PENULIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tesis dengan judul “ANALISIS PERILAKU Pengerasan Regangan dan Perambatan Retak Fatik Titanium Grade 2 “ dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat sebagaimana diatur didalam Pasal 43 Peraturan Rektor UNILA No.2 tahun 2024.

Bandar Lampung, 31 Januari 2025
Yang membuat pernyataan



Hamimatun Niswah
NPM. 2225021008

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lintau, Kecamatan Lintau Buo Utara, Kabupaten Tanah Datar, Sumatera Barat pada tanggal 29 November 1999 sebagai anak pertama dari 4 bersaudara pasangan Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu Desis Mailinda, S.P. (Alm. 2022). Setelah kepergian ibunda tercinta, pada tahun 2023 alhamdulillah keluarga penulis bertambah dengan Ibu Dr. Dewi Sartika, S.TP., M.Si. dan 3 saudara yang menjadikan penulis sebagai anak pertama dari 7 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 17 Kawai pada tahun 2005 hingga lulus pada tahun 2011, dilanjutkan dengan pendidikan menengah pertama di SMP Perguruan Islam Ar-Risalah Padang hingga lulus tahun 2014, lalu dilanjutkan dengan pendidikan menengah atas di SMA Al-Kautsar hingga lulus tahun 2017.

Setelah lulus SMA pada tahun 2017 penulis melanjutkan studi perguruan tinggi sebagai mahasiswi Jurusan Teknik Mesin Angkatan 2017 di Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN dan lulus di tahun 2022 dengan judul skripsi “PENGARUH PERLAKUAN ALKALI NaOH TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN LENTUR PADA BUKU BAMBU BETUNG”. Selama menjadi mahasiswa peneliti pernah aktif diorganisasi kemahasiswaan diantaranya Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dan Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) FOSSI. Peneliti melakukan Kerja Praktik (KP) di PT Semen Padang di Indarung, Kota Padang pada tahun 2020.

Pada tahun 2022 penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung, Fakultas Teknik program Pascasarjana Teknik Mesin

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Alhamdulillahirobbil'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan keharidat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkanNya, dan tak lupa pula shalawat serta salam yang selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “ANALISIS PERILAKU PENGERSAN REGANGAN DAN PERAMBATAN RETAK FATIK TITANIUM GRADE 2” yang merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Semoga karya tulis ini dapat membawa manfaat bagi yang membaca dan dapat dijadikan acuan untuk studi-studi selanjutnya. Dalam penyusunan Tesis ini penulis mendapatkan banyak bimbingan, dukungan dan bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

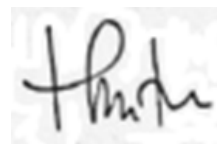
1. Orang tua penulis, Umi (Alm.) yang insyaallah selalu mendampingi penulis, Umi Dewi dan Abi yang selalu memberi dukungan, adik-adik penulis Awfa Rizqon Akhyar, M. Rosikhul Ielmi, Vilza Azzahra, Egalita Fauzia Nisa, Najhwa Fazila dan Alya Khoirunnisa.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang telah bersedia meluangkan waktu dan tenaga untuk membimbing penulis dalam penyusunan Tesis ini.
6. Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing II atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam menyelesaikan Tesis ini.
7. Dr.Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.
8. Prof. Dr. Sugiyanto, M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.
9. Seluruh Dosen dan Staf di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan pengetahuan kepada penulis.
10. Teman-teman MTM 2022 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat.

Penulis menyadari bahwa laporan Tesis ini tidak luput dari kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu penulis memohon maaf atas kekurangan dan kesalahan tersebut. Penulis berharap laporan Tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 31 Januari 2025
Penulis



Hamimatun Niswah
NPM 2225021008

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN.....	vi
PERNYATAAN PENULIS.....	vii
RIWAYAT HIDUP.....	i
SANWACANA.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Sistematika Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Titanium.....	5
2.2. Paduan Titanium.....	6
2.3. Jenis Paduan Titanium.....	12
2.4. Jenis-jenis Titanium.....	12

2.5.	Titanium Grade 2	15
2.6.	Proses Pembentukan Logam.....	15
2.7.	Uji Tarik.....	19
2.8.	Perilaku Pengerasan Regangan.....	21
2.9.	Uji Fatik.....	22
2.10.	Perambatan Retak	24
III.	METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1.	Tempat dan Waktu Penelittian	28
3.2.	Alat dan Bahan	28
3.3.	Metode Penelitian	34
3.4.	Diagram Alur Penelitian	37
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1.	Data Hasil Uji Tarik.....	39
4.2.	Data Hasil Uji Perambatan Retak Fatik.....	43
4.3.	Permukaan Patah Spesimen Ti Grade 2.....	49
V.	SIMPULAN DAN SARAN	56
5.1.	Simpulan.....	56
5.2.	Saran	57
	DAFTAR PUSTAKA.....	58
	LAMPIRAN.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Sifat mekanik Ti Grade 2 kondisi <i>annealed</i> (Desmarita et.al, 2018).	15
Tabel 2. Komposisi Kimia Ti Grade 2 (sumber: Matweb).....	29
Tabel 3. Sifat-sifat Mekanik Ti Grade 2 (sumber: Matweb)	29
Tabel 4. Spesifikasi <i>Clip Gage On Displacement</i> (COD).....	32
Tabel 5. Spesifikasi Jangka Sorong.....	33
Tabel 6. Hasil Uji Tarik Ti Grade 2	40
Tabel 7. Nilai konstanta Paris.....	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Titanium	5
Gambar 2. Aluminium.....	6
Gambar 3. Molibdenum	8
Gambar 4. Timah.....	9
Gambar 5. Zirkonium.....	10
Gambar 6. Kromium	10
Gambar 7. Silikon	11
Gambar 8. Kurva tegangan – regangan Ti Grade 2.....	19
Gambar 9. Pengerasan regangan pada kurva tegangan regangan	21
Gambar 10. Kurva laju pengerasan regangan titanium.....	22
Gambar 11. Grafik perambatan retak pada material	26
Gambar 12. Dimensi spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E-8.....	29
Gambar 13. Dimensi spesimen uji perambatan retak fatik sesuai standar ASTM E-647	30
Gambar 14. Mesin MTS <i>landmark</i> 100kN	31
Gambar 15. Clip gage on displacement (COD)	31
Gambar 16. <i>Clevis</i>	32
Gambar 17. <i>Vernier Caliper</i> (Jangka Sorong).....	33

Gambar 18. Scanning Electron Microscopy (SEM)	33
Gambar 19. Diagram Alur Penelitian.....	38
Gambar 20. Kurva tegangan-regangan Ti Grade 2	39
Gambar 21. Kurva laju pengerasan regangan	42
Gambar 22. Kurva panjang retak vs jumlah siklus	44
Gambar 23. Kurva hubungan laju perambatan retak (da/dN) terhadap kisaran faktor intensitas tegangan (ΔK) Ti Grade 2.....	46
Gambar 24. Bentuk patahan 45° spesimen uji tarik.....	49
Gambar 25. Foto SEM spesimen uji tarik.....	50
Gambar 26. Perbesaran permukaan patahan spesimen uji tarik (kotak putih dalam Gambar 25).....	51
Gambar 27. SEM permukaan patah spesimen uji perambatan retak fatik mencapai panjang retak 1 mm setelah takik.....	52
Gambar 28. SEM permukaan patah spesimen uji perambatan retak fatik mencapai panjang retak 18 mm setelah takik.....	53
Gambar 29. SEM permukaan patah spesimen uji perambatan retak fatik mencapai panjang retak 30 mm setelah takik (permukaan patahan statis).....	54

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Titanium adalah logam transisi dengan nomor unsur 22 pada tabel periodik dan unsur ini merupakan unsur paling melimpah ke-9 di bumi yang biasanya ditemukan pada batu, tanah liat dan pasir. Titanium merupakan salah satu material yang kuat, ringan, tahan korosi dan dapat bertahan pada temperatur rendah (*cryogenic*). Karena kelebihan yang dimilikinya, titanium ini sering digunakan dalam industri kelautan, pesawat udara dan lainnya. Titanium juga semakin banyak digunakan di bidang medis, karena memiliki biokompatibilitas yang sangat baik. Dalam aplikasi biomedis, bahan-bahan ini digunakan untuk pengganti pinggul dan lutut, penstabil tulang belakang atau prostesis, dan implan gigi (Unune et.al, 2022).

Titanium bersifat *allotropy*, yaitu memiliki dua struktur kristal yang berbeda pada temperatur yang berbeda. Pada temperatur ruang, titanium murni memiliki struktur kristal *hexagonal closed packed* (HCP). Struktur ini disebut fasa alpha, dan stabil sampai temperatur 1620°F (882°C) sebelum struktur kristalnya berubah. Pada temperatur yang lebih tinggi, struktur kristal berubah menjadi *body centered cubic* (BCC) (Shravan et.al, 2017). Struktur ini disebut fasa beta. Temperatur transisi dari alpha menjadi beta disebut beta transus. Fasa alpha beta dari 1620°F sampai titik leleh (3130°F) (Sutowo et al, 2016).

Titanium terdiri dari Titanium paduan dan Titanium murni. Titanium paduan merupakan gabungan unsur Titanium dengan unsur-unsur lain seperti Aluminium, Molibdenum, Vanadium, Zirkonium, Silikon, Timah, Kromium dan lainnya. Sedangkan Titanium murni merupakan material dengan kandungan unsur Titanium 99% dan 1% lainnya adalah unsur lain seperti Besi, Karbon, Nitrogen, Oksigen dan Hidrogen. Pada penelitian ini material

Titanium yang akan di uji adalah Titanium murni Grade 2. Ti Grade 2 ini memiliki rasio kekuatan dan berat yang baik, ketahanan baik terhadap suhu tinggi, merupakan salah satu dari kelas Titanium murni yang lebih lembut dan lebih elastis, dan resistan terhadap korosi dalam lingkungan yang mengoksidasi.

Catherine dan Hamid (2014), melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas terhadap kekuatan tarik dan keuletan Ti Grade 2. Ditemukan bahwa lapisan oksidasi pada spesimen terjadi pada tingkat yang berbeda ketika terkena suhu yang lebih tinggi. Kondisi spesimen yang diuji ada 3 kondisi yaitu T1 (spesimen tanpa perlakuan), T2 (spesimen dengan perlakuan panas pada temperatur 700 °C selama 1 jam) dan T3 (spesimen dengan perlakuan panas pada temperatur 900 °C selama 1 jam). Dua perlakuan panas yang berbeda pada Ti Grade 2 menunjukkan adanya kemungkinan pelunakan material pada suhu 700°C yang berada di bawah suhu transformasi. Selain itu, nilai-nilai perpanjangan dan persentase pengurangan luas juga menegaskan bahwa keuletan untuk spesimen T2 dan T3 telah meningkat. Diungkapkan juga bahwa kekuatan tarik menurun pada spesimen T2 tetapi kembali ke kekuatan awalnya pada spesimen T3.

Lee et.al (2021), melakukan penelitian tentang bagaimana peran laju regangan dan tekstur dalam deformasi Ti Grade 2 pada suhu ruangan (25°C atau 298K) dan suhu kriogenik (dibawah -150°C atau 123K). Ditemukan bahwa ketika laju regangan menurun, elongasi ditingkatkan dengan peningkatan resistensi saat *necking*, sedangkan perilaku ini relatif tidak sensitif terhadap laju regangan pada 298K (25 °C). Akibatnya, elongasi total meningkat dari 38% pada temperatur 298K menjadi 65% pada temperatur 123K, dan dari 28% pada temperatur 298K menjadi 35% pada temperatur 123K masing-masing dalam tarik sejajar dan melintang terhadap arah penggulungan pelat. Efek gabungan dari laju regangan dan suhu kriogenik mempengaruhi transisi dari mekanisme deformasi yang terlibat dalam *twinning* dan slip dislokasi. Hasilnya menunjukkan bahwa selain slip dislokasi, deformasi *twinning* berkontribusi terhadap peningkatan elongasi total dari α -titanium pada suhu kriogenik.

Berdasarkan beberapa referensi dan literatur yang telah didapatkan serta penelitian sebelumnya, belum banyak yang mengkaji secara detail tentang pengerasan regangan dan laju pertumbuhan retak fatik material Ti Grade 2. Maka dari itu pada penelitian ini dilakukan uji tarik dan uji perambatan retak fatik untuk mengetahui karakteristik mekanik Ti Grade 2, dari pengujian yang dilakukan dapat diketahui bagaimana mikrostruktur dan pertumbuhan retak yang terjadi pada spesimen Ti Grade 2.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai pengerasan regangan material Ti Grade 2.
2. Menentukan laju pertumbuhan retak fatik pada material Ti Grade 2.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan (Ti Grade 2) sudah mengalami pengerolan.
2. Untuk menentukan nilai pengerasan regangan data yang digunakan adalah data area plastis dari titik luluh hingga titik maksimum.
3. Spesimen CTT1 dan CTT2 merupakan spesimen dengan orientasi bidang yang tegak lurus dengan arah pengerolan, sedangkan CTR1 dan CTR2 merupakan spesimen dengan orientasi bidang searah terhadap arah pengerolan.

1.4. Sistematika Penelitian

Adapun sistematika penulisan pada tesis ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang yang mendeskripsikan tentang Ti Grade 2 beserta kelebihan, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan dari penelitian yang dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang teori-teori yang berhubungan dan dapat mendukung pembahasan tentang masalah yang dipilih seperti titanium, komposisi kimia Ti Grade 2, uji tarik, uji fatik, pertumbuhan retak, struktur mikro.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan tentang metode-metode dalam melakukan pengumpulan informasi, tempat dan waktu penelitian dan menerangkan alur penelitian serta bagaimana proses dari pengambilan data yang dilakukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan tentang hasil data pengamatan yang diperoleh, dan pembahasan data dari proses pengujian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

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

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan sumber-sumber dari literatur yang dimuat dalam tesis ini.

LAMPIRAN

Berisikan data seperti foto-foto dan data yang mendukung tesis ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Titanium

Titanium adalah logam transisi dengan nomor unsur 22 pada tabel periodik berwarna putih cerah dalam keadaan murni, yang biasanya ditemukan pada batu, tanah liat dan pasir. Titanium merupakan peringkat ke empat dalam kerak bumi yaitu 0,86% setelah aluminium, besi, dan magnesium. Titanium ini memiliki keuletan tinggi, kepadatan rendah, ketahanan korosi yang sangat baik, dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap temperatur ekstrim. Dengan kelebihan-kelebihan tersebut, cakupan untuk pengaplikasian titanium semakin besar. Bidang yang banyak menggunakan titanium dan paduannya adalah militer, industri pesawat terbang, ruang angkasa, listrik, kimia, otomotif dan medis. Dalam aplikasi biomedis, bahan-bahan ini digunakan untuk pengganti pinggul dan lutut, penstabil tulang belakang atau prostesis, dan implan gigi (Unune et.al, 2022).



Gambar 1. Titanium

2.2. Paduan Titanium

Titanium merupakan material yang memiliki unsur-unsur lain dalam paduannya, baik itu titanium paduan maupun titanium murni. Titanium paduan merupakan paduan antara unsur titanium dan unsur lain seperti aluminium, vanadium, silikon dan lainnya, yang dibuat sedemikian rupa sesuai kegunaan yang diinginkan.

1. Aluminium (Al)

Aluminium merupakan logam non ferro yang paling banyak digunakan, mempunyai sifat kelarutan yang tinggi, ketahanan korosi yang baik disebagian besar lingkungan termasuk udara, air (air garam), dan lingkungan kimia lainnya. Selain itu aluminium juga mempunyai sifat penghantar listrik dan panas yang baik. Aluminium merupakan unsur kimia golongan IIIA dalam sistim periodik unsur, dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gr/mol. Struktur kristal aluminium adalah struktur kristal FCC, sehingga aluminium tetap ulet meskipun pada temperatur yang sangat rendah. Keuletan yang tinggi dari aluminium menyebabkan logam tersebut mudah dibentuk atau mempunyai sifat mampu bentuk yang baik.



Gambar 2. Aluminium

Unsur Al dapat mengurangi MAS dari titanium, kandungan 6% Al (aluminium) dimanfaatkan sebagai unsur penguat karena membentuk presipitasi fasa intermetalik $TiAl_3$. Unsur Aluminium juga

berfungsi sebagai penstabil fasa α (alpha) yaitu unsur yang dapat menaikkan temperatur beta transus dengan menstabilkan fasa alpha .

2. Vanadium (V)

Vanadium (V) adalah logam transisi keras pada blok d, nomor atom 23, berwarna abu-abu keperakan, dapat ditempa muncul pada periode panjang pertama tabel periodik antara titanium dan kromium. Vanadium memiliki titik leleh tinggi 1910°C, titik didih 3407°C, merupakan unsur litofil (unsur yang menunjukkan afinitas terhadap fase silikat dan terkonsentrasi di bagian silikat (kerak dan mantel) bumi) dan siderofil (memiliki afinitas terhadap fase cair logam) dalam inti besi dan kondrit (meteorit batu yang belum dimodifikasi) yang agak tidak kompatibel. Vanadium adalah unsur paduan yang paling banyak digunakan untuk memperkuat baja yang digunakan dalam bangunan dan jembatan. Vanadium tidak ditemukan sebagai logam bebas di alam, ia berasal dari sumber-sumber primer seperti bijih (yaitu, endapan oksida besi), terak metalurgi (yaitu, pemrosesan bijih Uranium dan Titanium), endapan batu bara, atau minyak tertentu, seperti minyak mentah dan serpih (Pourret *and* Dia, 2016).

3. Molibdenum (Mo)

Molibdenum adalah logam transisi dengan nomor atom 42, berbentuk logam abu-abu atau bubuk hitam. Molibdenum bersifat keras, tahan api, tidak larut dalam air, dan memiliki titik leleh yang tinggi yaitu 2623°C. Paduan dari Molibdenum ini dirancang untuk mengatasi kekurangan molibdenum metalik dalam hal ketangguhan suhu rendah, kemampuan las, ketahanan oksidasi, dan rekristalisasi. Dengan demikian, paduan Molibdenum dengan logam tahan api lainnya dapat memperluas kegunaan Molibdenum sebagai logam. Molibdenum adalah logam tahan api dan langka, yang memiliki kelemahan berupa kesulitan besar dalam pemrosesan. Warnanya putih keperakan dan dapat teroksidasi dalam atmosfer lembap (>60% kelembapan) hingga menyebabkan perubahan warna. Bahan baku untuk produksi bubuk

Molibdenum adalah Amonium Molibdat dan Molibdenum Trioksida (Sarkar, 2014).



Gambar 3. Molibdenum

Molibdenum (Mo) biasanya dipilih sebagai elemen paduan untuk membuat paduan Ti–Mo dan paduan Co–Cr–Mo untuk pembuatan implan bedah. Namun, suhu rekristalisasi, kekuatan, dan kekerasan pada suhu tinggi paduan Molibdenum tidak dapat memenuhi persyaratan pengembangan ilmiah dan teknologi yang semakin meningkat. Molibdenum memiliki karakteristik intrinsik berupa struktur elektronik dalam logam body centered cubic (bcc), khususnya kerapuhan non-ekstrinsik disebabkan oleh pemisahan atom-atom interstisial seperti oksigen dan nitrogen pada batas butir. Hal ini tidak hanya menyebabkan masalah kerapuhan pada suhu rendah dan ketahanan oksidasi suhu tinggi yang tidak memadai, tetapi juga menyebabkan kesulitan dalam pemrosesan molibdenum secara mendalam.

Molibdenum terutama digunakan sebagai agen paduan karena berkontribusi pada pengerasan dan kelenturan baja temper dan meningkatkan kekuatan baja pada suhu tinggi. Molibdenum (Mo) sebagai penstabil fasa β (betha), yaitu unsur yang dapat menurunkan temperatur beta transus dengan menstabilkan betha. Paduan Ti6Al6Mo merupakan paduan Ti $\alpha\beta$ yang memiliki kekuatan dan ketahanan korosi lebih tinggi dibandingkan paduan Ti α . Adanya fasa betha dengan

struktur kristal kubik memudahkan dalam pembentukan melalui pengerjaan panas.

4. Timah (Sn)

Timah (Sn) merupakan unsur dengan berat atom 118,71 dan nomor atom 50. Kelimpahan logam ini di kerak bumi adalah 2 ppm. Titik leburnya yang cukup rendah (232 °C) sehingga mudah dilelehkan dan dileburkan. Karakter tersebut membuat timah mudah dipadukan dengan tembaga untuk membuat perangkat bagi keperluan berburu, berperang, dan rumah tangga. Selain itu logam timah bersifat mengkilap dan tidak mudah teroksidasi sehingga tahan karat, ditemukan dalam banyak *alloy*, dan digunakan untuk melapisi logam lainnya untuk mencegah karat.



Gambar 4. Timah

Timah diperoleh terutama dari mineral *cassiterite/tinstone* (SnO_2) yang terbentuk sebagai oksida. *Cassiterite* adalah mineral timah oksida dengan rumus SnO_2 . Berbentuk kristal dengan banyak permukaan mengkilap sehingga tampak seperti batu perhiasan. Kristal tipis *Cassiterite* tampak translusen.

5. Zirkonium (Zr)

Zirkonium adalah sebutan untuk logam berwarna perak abu-abu, berbentuk kristal (amorf), lunak, ulet, kuat, dapat ditempa dan diulur bila murni juga tahan terhadap udara bahkan api. Logam ini ditemukan dalam bentuk mineral *zircon*,

tidak ditemukan di alam dalam bentuk bebas tetapi sebagai oksida atau silikat dalam kerak bumi dan bebatuan dalam kadar kecil.



Gambar 5. Zirkonium

Zirkonium memiliki lambang Zr dengan nomor atom 40, massa jenis $6,52 \text{ kg/m}^3$ titik lebur $1854 \text{ }^\circ\text{C}$ (2127 K) dan titik didih $4406 \text{ }^\circ\text{C}$ (4679 K). Sifat kimia dan fisika logam ini mirip dengan titanium. Zirkonium sangat tahan terhadap panas dan korosi. Zirkonium lebih ringan daripada baja dan kekerasannya mirip dengan tembaga.

6. Kromium (Cr)

Kromium merupakan unsur kimia dengan nomor atom 24, merupakan unsur pertama dalam golongan 6 pada tabel periodic, berwarna abu-abu seperti baja, berkilau, keras, dan memiliki titik leleh yang tinggi yaitu 1907°C . Pertumbuhan sub butir serta rekristalisasi butir bebas regangan ditemukan pada lembaran kromium tergantung pada kemurnian kromium, tingkat deformasi (misalnya, 10%-73%) dan kondisi anil (misalnya, 770°C - 975°C).



Gambar 6. Kromium

Kromium memiliki kemampuan pembentukan yang buruk pada suhu ruangan yang mengakibatkan tidak dapat dilakukan proses *cold rolled* tanpa menyebabkan retakan pada benda kerja. Oleh karena itu,

dilakukan upaya untuk melakukan pengerollan kromium pada suhu tinggi. Peningkatan kemampuan bentuk plastis pada suhu yang lebih tinggi melibatkan pengujian sampel kromium dalam mode deformasi yang berbeda. Karena kromium adalah material bcc dan suhu transisi ulet - getas (DBTT)-nya lebih tinggi daripada 300°C , kromium diperkirakan berperilaku getas di bawah suhu ini.

7. Silikon (Si)

Silikon (juga disebut zat pasir) adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Si dan nomor atom 14, densitas $2,33 \text{ kg/m}^3$, titik leleh 1410°C (1687 K), titik didih 2355°C (2538 K). Silikon merupakan unsur periode ketiga yang paling banyak terdapat di alam, 28% dari massa kulit bumi mengandung silikon. Silikon adalah unsur kedua yang paling berlimpah di kerak bumi, setelah oksigen. Silikon tidak ditemukan bebas di alam.



Gambar 7. Silikon

Silikon terdapat dalam bentuk senyawa oksida silika SiO_2 , dan mineral yang disebut silikat. Kristal SiO_2 murni mudah dijumpai yang dikenal dengan nama pasir atau kuarsa, sedangkan Kristal SiO_2 yang tidak murni (dengan runutan bahan kotoran, di antaranya adalah agata (akik), oniks, opal, batu kecubung (ametis), dan *flint*).

2.3. Jenis Paduan Titanium

Dalam bidang konstruksi titanium murni harus memiliki ketahanan terhadap korosi yang tinggi, terutama untuk peralatan kimia dan pekerjaan tambang minyak yang berada disekitar perairan laut (Elias et.al, 2019). Titanium dan paduannya memiliki 3 jenis struktur, yaitu :

1. Paduan alpha (α) memiliki kekuatan dan ketahanan oksidasi tertinggi pada suhu tinggi (588-811 K), namun bahan ini tidak bereaksi terhadap perlakuan panas dan memiliki kekuatan paling rendah pada suhu ruangan, paduan alpha yang paling populer adalah Ti-5Al-2.5Sn.
2. Paduan alpha-beta memiliki kekuatan lebih tinggi dan merespon perlakuan panas, namun kurang dapat dibentuk dibandingkan paduan alpha, beberapa paduan alpha-beta adalah Ti-3Al-2.5V, Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti-17), Ti- 6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, dan Ti-6Al-6V-2Sn.
3. Paduan beta (β) mudah diolah dengan panas, dengan kemampuan pengerasan yang lebih tinggi dibandingkan paduan alpha dan paduan alpha-beta, meskipun kekuatan pada suhu ruangnya baik namun kekuatan pada suhu tingginya buruk, contoh beberapa paduan beta adalah Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr, Ti-4.5Sn-6Zr-11.5Mo, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al, dan Ti-13V-11Cr-3Al (Majumdar dan Manna, 2015).

2.4. Jenis-jenis Titanium

Terdapat 2 pembagian utama pada titanium yaitu titanium murni dan titanium paduan, berikut adalah pembagian dari titanium:

1. Titanium Murni/ *Unalloyed Titanium (Commercially Pure Titanium)*

Berikut ini bagian-bagian dari titanium murni /*unalloyed titanium (commercially pure titanium)*:

- a. Titanium Grade 1

Kekuatan lebih rendah, paling lunak, titanium murni dengan keuletan tertinggi, mampu dibentuk saat suhu dingin, dengan ketahanan yang sangat baik terhadap pengurangan ringan

hingga media pengoksidasi yang tinggi dengan atau tanpa klorida. Dapat diaplikasikan pada jam, bingkai kaca, alat untuk desalinasi dan penguapan air garam, peralatan bedah, peralatan mencuci dan komponen kapal angkatan laut.

b. Titanium Grade 2

Titanium murni dengan kekuatan sedang dan kemampuan las yang baik, mampu dibentuk saat suhu dingin, kemampuan fabrikasi yang baik, dan ketahanan yang sangat baik terhadap pengurangan yang ringan hingga media pengoksidasi yang tinggi dengan atau tanpa klorida. Dapat diaplikasikan pada saluran pesawat, peralatan kontrol polusi udara, pemurnin hidrokarbon, implan medis, komponen sistem pendingin pembangkit listrik, dan peralatan pengeboran/produksi hidrokarbon lepas pantai.

c. Titanium Grade 3

Titanium yang lebih kuat sedikit daripada *grade 2*, dengan ketahanan korosi serupa dengan kemampuan las yang baik dan sifat mampu dibentuk/keuletan pada suhu dingin yang wajar. Dapat diaplikasikan pada peralatan pemrosesan kimia, komponen kapal angkatan laut, dan komponen sistem pendingin pembangkit listrik.

d. Titanium Grade 4

Titanium yang jauh lebih kuat daripada *grade 2* dan *grade 3*, namun sifat mampu dibentuk dan keuletan pada suhu dingin yang lebih rendah. Dapat diaplikasikan pada saluran pesawat, pertambangan, dan peralatan pemrosesan kimia.

2. Titanium Paduan (*Alloy Titanium*)

Berikut ini adalah beberapa bagian dari titanium paduan (*alloy titanium*):

a. Ti-6Al-4V (Grade 5) [Ti-6-4]

Paduan Ti yang dapat diolah dengan panas, berkekuatan tinggi, dan paling banyak tersedia secara komersial, untuk penggunaan hingga suhu 400°C memberikan kombinasi antara kekuatan, ketangguhan, dan keuletan yang luar biasa tinggi serta kemampuan las dan fabrikasi yang baik. Dapat diaplikasikan pada saluran pesawat, pertambangan, komponen badan pesawat, komponen otomotif, rompi antipeluru, komponen mesin turbin uap, komponen roda pendaratan, struktur / kendaraan luar angkasa dan komponen rudal.

b. Ti-0.15Pd (Grade 7) [Ti-Pd]

Paduan Ti paling tahan terhadap korosi dalam mereduksi asam dan serangan lokal pada media halida panas, dengan sifat fisik/mekanik setara yang dengan Ti *Grade* 2, dan kemampuan las/fabrikasi yang sangat baik. Dapat diaplikasikan pada peralatan kontrol polusi udara, peralatan pemrosesan kimia, ekstraksi hidrometalurgi, dan penguapan air garam.

c. Ti-0.3Mo-0.8Ni (Grade 12) [Ti-12]

Paduan Ti yang sangat mudah dilas dan dibuat, memberikan peningkatan kekuatan, desain kode tekanan yang diijinkan, korosi celah air garam panas, dan mengurangi ketahanan asam dibandingkan dengan titanium *Grade* 1, 2, dan 3. Dapat diaplikasikan pada peralatan pemrosesan kimia, ekstraksi hidrometalurgi, dan ekstraksi energi panas bumi dengan air garam.

d. Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Grade 19) [Ti Beta-C™]

Paduan Ti yang dapat diolah dengan panas, bagian dalam materil yang dapat mengeras, berkekuatan sangat tinggi, memiliki sifat ketangguhan/kekuatan yang baik, modulus elastisitas rendah, dan ketahanan yang tinggi terhadap tegangan dan korosi lokal dalam air garam manis dan asam bersuhu tinggi. Dapat diaplikasikan pada ekstraksi energi panas bumi dengan air garam, komponen produksi hidrokarbon, komponen roda pendaratan,

struktur / kendaraan luar angkasa dan komponen rudal (Ahmed et.al, 2014).

2.5. Titanium Grade 2

Titanium Grade 2 juga dikenal sebagai Timetal 50A, Titan Grade 2 dan Allvac 40. Titanium Grade 2 ini memiliki densitas 4.51 g/cm^3 dan titik lebur maksimum $1665 \text{ }^\circ\text{C}$. Titanium *Grade 2* ini memiliki rasio kekuatan dan berat yang baik, ketahanan baik terhadap suhu tinggi, merupakan salah satu dari kelas Titanium murni yang lebih lembut dan lebih elastis, dan resistan terhadap korosi dalam lingkungan yang mengoksidasi. CPTi Grade 2 bersifat *allotrophy* yaitu memiliki 2 fasa tergantung pada temperature. Saat di temperature kamar, CPTi Grade 2 stabil pada struktur kristal HCP fasa α (alpha), dan bila dipanaskan hingga suhu diatas $882,5^\circ\text{C}$ maka stabil pada struktur kristal BCC fasa β (beta) (Shravan et.al, 2017). Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan sifat-sifat mekanik dari CPTi Grade 2 dalam kondisi *annealed*:

Tabel 1. Sifat mekanik Ti Grade 2 kondisi *annealed* (Desmarita et.al, 2018)

Sifat-sifat Mekanik	Metrik
Tensile Strength (Mpa)	345
Yield Strength (Mpa)	275
Elongation (%)	20
Reduction of Area (%)	30
Modulus of Elasticity (Gpa)	102
Poison ratio	0,34
(Wt %) Ti	99,2

2.6. Proses Pembentukan Logam

Proses pembentukan logam, juga dikenal sebagai proses kerja mekanis, adalah pembentukan utama proses di mana massa logam atau paduan dikenai gaya mekanik. Di bawah tindakan gaya tersebut, bentuk dan ukuran potongan logam mengalami perubahan. Pembentukan logam adalah proses untuk

mengubah benda kerja (*work piece*) dengan cara memberikan gaya luar sehingga terjadi deformasi plastis dan menjadi bentuk yang diinginkan. Pembentukan logam bertujuan untuk mengubah bentuk benda kerja menjadi bentuk yang diinginkan, memperbaiki sifat benda kerja dengan cara memperbaiki struktur mikro, kekuatan mekanik dll. Pembentukan logam dimungkinkan jika logam atau paduan tersebut cukup lunak dan ulet. Pekerjaan mekanis mensyaratkan bahwa material dapat mengalami "deformasi plastis" selama pemrosesannya (Hermani dan Muhtar, 2022). Pembentukan logam terklasifikasi menjadi 2 berdasarkan temperature pengerjaan yaitu pengerjaan panas (*hot working*) dan pengerjaan dingin (*cold working*). Pengerjaan panas dilakukan di atas temperatur rekristalisasi dan pengerjaan dingin dilakukan di bawah temperatur rekristalisasi. Pembentukan logam terklasifikasi menjadi 2 berdasarkan bentuk benda kerja yaitu deformasi massal (*bulk deformation*) dan pengerjaan logam lembaran (*sheet metalworking*).

1. Deformasi Massal (*Bulk Deformation*)

Defromasi massal atau *bulk deformation* merupakan proses pembentukan logam yang mengubah bentuk secara signifikan dalam jumlah besar. Karakteristik lainnya yaitu perbandingan luas permukaan bidang benda kerja dengan volumenya relatif kecil.

a. *Rolling Processes*

Rolling adalah proses penekanan (kompresi) untuk mengurangi ketebalan sebuah logam oleh sepasang mekanisme *roller*. Pengerjaan *rolling* terbagi dua, yaitu *hot rolling* dan *cold rolling*. *Hot-rolled* memiliki ciri-ciri seperti permukaan kasar, toleransi tinggi, gaya rol rendah, dan umumnya untuk deformasi plastik yg besar. *Cold-rolled* berciri-ciri permukaan akhir lebih baik (halus) dan untuk toleransi rendah.

b. *Forging Processes*

Forging atau penempaan adalah proses deformasi di mana benda kerja ditekan di antara dua *die* (cetakan). Penekanan dapat dilakukan dengan tekanan kejut atau tekanan berangsur-angsur

(perlahan). Proses penekanan tersebut akan menghasilkan bentuk benda kerja yang sesuai dengan apa yang diinginkan. Proses *hot forging* dilakukan bila logam yang ingin ditempa perlu dikurangi kekuatannya dan ditingkatkan sifat kemampuan bentuknya. Karena logam yang akan ditempa kekuatannya berkurang dan mampu bentuknya meningkat, *hot forging* relatif memerlukan gaya yang lebih kecil dibanding *cold forging*. *Cold forging* atau penempaan dingin memerlukan gaya yang lebih besar dibandingkan dengan *hot forging*. Syarat dari logam harus mampu dibentuk pada suhu ruang supaya perubahan bentuk dapat terjadi tanpa timbulnya retak atau patah. Dibandingkan dengan *hot forging*, *cold forging* memiliki akurasi ukuran dan kualitas permukaan yang lebih baik.

c. *Extrusion Processes*

Proses ekstrusi merupakan proses pembentukan logam yang bertujuan untuk mereduksi atau mengecilkan penampang. Dengan cara menekan bahan logam melalui rongga cetakan, metode pembentukan logam ini menggunakan gaya tekan yang relatif besar. Proses ini biasanya digunakan untuk membuat batang silinder, tabung berongga dan sebagainya. Ada dua proses ekstrusi yaitu *forward extrusion* (searah) dan *reverse extrusion* (berlawanan arah).

2. Pengerjaan Logam Lembaran (*Sheet Metalworking*)

Sheet metalworking merupakan proses pembentukan dan pemotongan pada logam lembaran (*sheet*), logam *strip*, dan *coil*. Bahan baku pada proses ini memiliki perbandingan luas permukaan bidang dengan volume yang tinggi. Perlakuan yang diterapkan pada lembaran logam biasanya berupa tekanan. Oleh karena itu proses ini dapat pula disebut dengan istilah *pressworking*.

a. *Bending Operations*

Pembengkokan (logam) atau penekukan atau bending adalah proses deformasi secara plastik dari logam terhadap sumbu

linier dengan hanya sedikit atau hampir tidak mengalami perubahan luas permukaan dengan bantuan tekanan piston pembentuk dan cetakan (*die*). Sepotong besi dapat menjadi bengkok akibat tekanan mesin sederhana dengan menggunakan *press* yang disebut *bending*. Biasanya pekerjaan bending menggunakan sepotong besi panjang, lembaran logam ataupun piring. Bending biasanya memakai die berbentuk V, U, W atau yang lainnya. Bending menyebabkan logam pada sisi luar sumbu netral mengalami tarikan, sedangkan pada sisi lainnya mengalami tekanan.

b. *Shearing Processes*

Shearing (pengguntingan), juga dikenal sebagai *die cutting* adalah proses pemotongan bahan tanpa pembentukan *chip* atau tanpa menggunakan *burning* atau *melting*. Jika *cutting blade* lurus dinamakan *shearing* sedangkan jika *cutting blade* berbentuk lengkungan, bisa dinamakan *blanking*, *piercing*, *notching* dan *trimming*. *Shearing* adalah pemotongan *sheet metal coil* atau *sheet metal* menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dengan *shear cutting machine*. Hasil pemotongan akan menjadi material untuk proses selanjutnya, seperti proses *drawing* atau *forming*. Proses pengguntingan (*shearing*) merupakan proses pemotongan dengan cara menekan dua sisi pisau tajam ke lembaran logam (*sheet metal*).

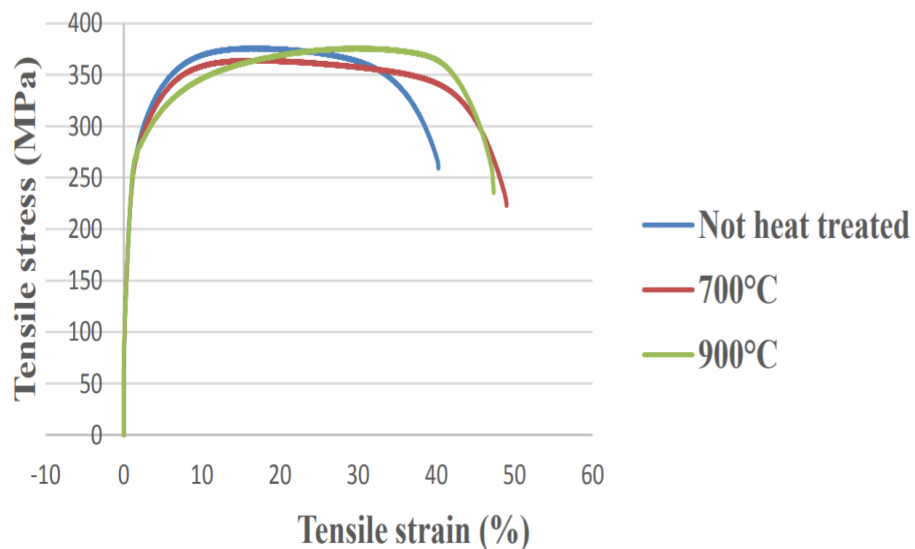
c. *Deep Drawing*

Deep Drawing adalah proses pembentukan pelat lembaran menjadi benda bentuk mangkuk atau *box* dengan alat bantu berupa *punch* dan *dies forming*, tanpa terjadi perubahan ketebalan material yang berarti dari tebal pelat asalnya. Ketika kedalaman produk lebih besar daripada diameter maka disebut *Deep Drawing*, ketika kedalaman produk lebih kecil daripada diameter disebut *Shallow Drawing*. *Deep drawing* bertujuan untuk

memperoleh bentuk tertentu dan biasanya ketebalan material berubah setelah melalui proses ini.

2.7. Uji Tarik

Metode yang digunakan untuk menguji kekuatan dari suatu bahan atau material dengan beban gaya yang sesumbu disebut uji tarik. Dasar dari pengujian mekanik yang dilakukan terhadap suatu material adalah pengujian tarik. Spesimen uji yang telah distandarisasi terlebih dahulu diberikan pembebanan uniaxial sehingga mengalami penambahan panjang dan peregangan hingga akhirnya spesimen uji patah. Hasil dari pengujian tarik merupakan informasi yang dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran dari spesimen uji dan akan digunakan untuk memperoleh harga-harga yang distandarisasi, oleh karena itu spesimen uji tarik diseragamkan atau dinormalisasi (Putra, dkk, 2019). Gambar 8 menunjukkan kurva tegangan-regangan titanium.



Gambar 8. Kurva tegangan – regangan Ti Grade 2

Berikut merupakan data atau nilai yang dapat diperoleh dari kurva tegangan- regangan pada Gambar 8:

- a. Tegangan Luluh (*Yield Stress*).

Tegangan luluh adalah perbandingan dari gaya tarik pada benda

per luas penampang benda. Tegangan luluh menunjukkan perubahan pada material yang mana dari kondisi elastis menjadi kondisi plastis, dan pada titik ini juga menunjukkan bahwa material uji mulai terdeformasi plastis.

b. Modulus Elastisitas (*Modulus Young*).

Modulus elastisitas ini adalah sebuah perbandingan antara tegangan dan regangan dalam deformasi elastis. Modulus elastisitas berada di bawah titik tegangan luluh (*yield stress*) dan biasanya disebut sebagai angka elastisitas bahan, dan juga merupakan nilai kemiringan kurva tegangan-regangan.

c. Tegangan Maksimal (*Ultimate Tensile Stress*)

Tegangan maksimal adalah nilai beban maksimal yang dapat ditahan oleh suatu material dalam pengujian tarik, sebelum material akan mengalami patah.

Berikut ini adalah rumus yang digunakan untuk mengetahui nilai tegangan, regangan dan modulus elastisitas:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots(2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

σ = Tegangan (kN / mm²)

F = Gaya Tarik / Tekan (kN)

A = Luas Penampang (mm²)

ε = Regangan (mm/mm)

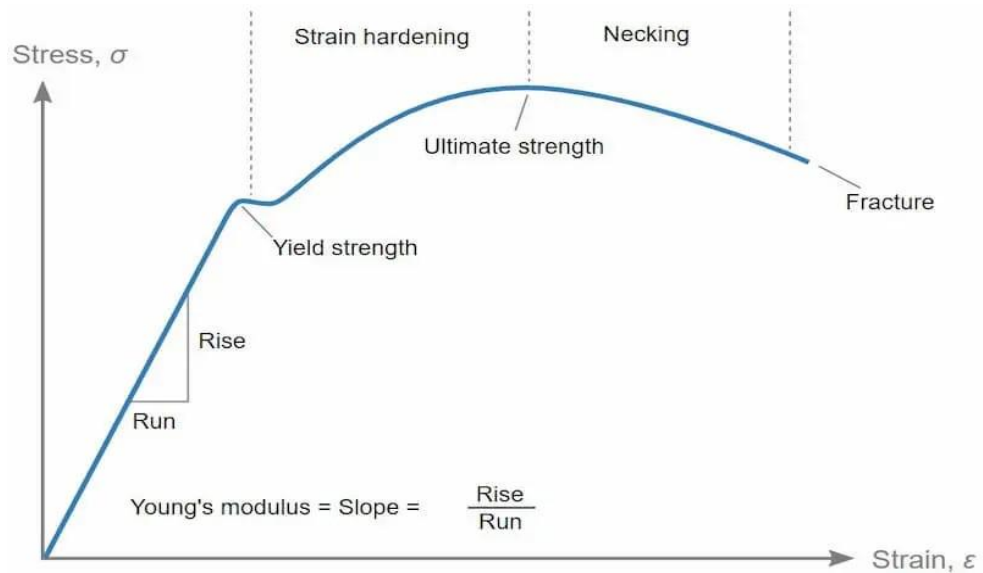
Δl = Pertambahan Panjang (mm)

l_0 = Panjang Mula-mula (mm)

E = Modulus Elastisitas (kN / mm² atau MPa)

2.8. Perilaku Pengerasan Regangan

Pengerasan regangan merupakan suatu proses untuk membuat logam menjadi lebih keras dan kuat dengan meningkatkan kerapatan dislokasi akibat dari deformasi plastis. Dislokasi dihasilkan ketika deformasi plastis terjadi, dislokasi ini akan berinteraksi dan menjadi terjepit atau kusut. Hal ini dapat menghalangi pergerakan dislokasi lebih lanjut dan meningkatkan kekuatan material (Pan et.al, 2021). Karakteristik inilah yang membedakan antara material *ductile* (ulet) dan *brittle* (getas). Gambar 9 menunjukkan pengerasan regangan pada kurva tegangan-regangan.



Gambar 9. Pengerasan regangan pada kurva tegangan regangan

Untuk mendapatkan nilai pengerasan regangan, tegangan teknik dan regangan teknik harus diubah menjadi tegangan sebenarnya dan regangan sebenarnya. Rumus yang digunakan untuk mengubah tegangan-regangan teknik menjadi tegangan-regangan sebenarnya dan rumus mendapatkan laju pengerasan regangan adalah:

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon) \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_t = \sigma(1 + \epsilon) \dots\dots\dots (5)$$

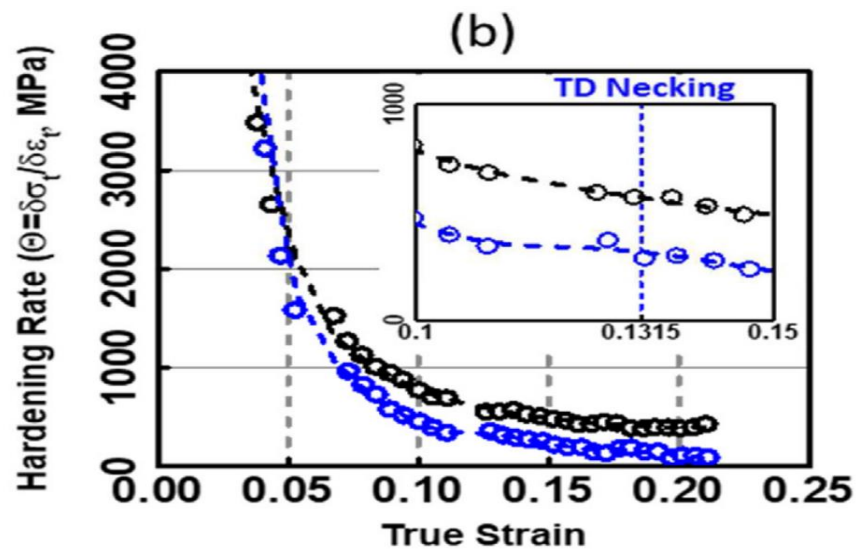
$$\sigma_t = K \epsilon_t^n \dots\dots\dots (6)$$

$$\theta = \frac{\partial \sigma_t}{\partial \varepsilon_t} \dots \dots \dots (7)$$

Dimana:

- σ_t = Tegangan sebenarnya (MPa)
- ε_t = Regangan sebenarnya
- K = Konstanta pengerasan regangan(MPa)
- n = Eksponen pengerasan regangan
- θ = Laju pengerasan regangan (MPa)
- $\partial \sigma_t$ = Turunan tegangan sebenarnya (MPa)
- $\partial \varepsilon_t$ = Turunan regangan sebenarnya

Dilaporkan bahwa eksponen pengerasan regangan tidak konstan tetapi berubah seiring dengan perubahan laju regangan. Perubahan laju regangan ini menurun seiring dengan penurunan kepadatan dislokasi. Laju pengerasan regangan ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 10. Kurva laju pengerasan regangan titanium

2.9. Uji Fatik

Fatigue atau disebut juga kelelahan menurut Badaruddin et.al (2018) adalah suatu bentuk dari kegagalan yang terjadi pada suatu struktur bahan yang dikarenakan beban fluktuasi. *Fatigue* pada suatu material dapat terjadi

yaitu pada kondisi beban yang lebih tinggi atau lebih rendah dari pada kekuatan luluh material. *Fatigue* adalah proses perubahan dari struktur material secara permanen, yang akan menghasilkan fluktuasi tegangan dan regangan di bawah kekuatan tariknya.

Fatigue juga dapat mengakibatkan retakan hingga patahan pada material karena terjadinya pada satu titik atau banyak titik. Pada *fatigue* terdapat 3 fase yang menyebabkan terjadinya suatu kegagalan perpatahan dari suatu material, adapun 3 fase tersebut yaitu:

1. Permulaan Retak

Pada fase permulaan retak ini biasanya dimulai dari retakan yang terjadi pada daerah permukaan material yang lemah, atau di daerah yang terdapat konsentrasi tegangan di permukaan. Hal ini dapat terjadi akibat dari pembebanan berulang sehingga menyebabkan seperti goresan, lubang pits, dan *notch*.

2. Penyebaran Retak

Pada fase selanjutnya yaitu penyebaran retak, pada fase ini permulaan dari retakan menjadi perpaduan *microcracks* dan akan berkembang lagi dan membentuk *macrocracks*. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya perpatahan (*failure*) pada material.

3. Perpatahan

Pada fase ini material akan mengalami perpatahan yaitu proses akhir dari kerusakan pada struktur setelah mengalami siklus tegangan dan regangan sampai struktur tersebut mengalami perpatahan dan akan menghasilkan kerusakan yang permanen (Amiruddin dkk, 2018).

Fatigue dapat dikategorikan lebih lanjut menjadi dua jenis yaitu yang pertama adalah kegagalan fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) dan kegagalan fatik siklus tinggi (*high cycle fatigue*), adapun penjelasannya sebagai berikut:

1. Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*)

Fatik siklus rendah biasanya dapat terjadi pada material dengan jumlah siklusnya di bawah $\leq 10^5 = 100000$, fatik siklus rendah terjadi

pada kondisi regangan plastis. Pada fatik siklus rendah ini biasanya dirancang dengan mengabaikan seluruh efek dari *fatigue* atau mengurangi level tegangan yang diijinkan.

2. Fatik Siklus Tinggi (*High Cycle Fatigue*)

Fatik siklus tinggi terjadi pada material dengan jumlah siklusnya diantara $10^3 = 100$ sampai $10^7 = 10000000$, fatik siklus tinggi ini terjadi pada kondisi di luar kondisi elastis, dimana kegagalan material di bawah tegangan luluhnya (Badaruddin dkk, 2018).

Kemudian pada *fatigue* juga terdapat siklus tegangan, yang mana jenis-jenis siklus tegangan berfluktuasi dapat mengakibatkan kelelahan pada material. Terdapat tiga jenis siklus tegangan yang pertama adalah tegangan sempurna bolak balik, yang terjadi mulai dari tegangan rata-rata nol dengan amplitude yang konstan. Pada jenis tegangan ini, tegangan maksimum dan minimum sama besarnya, dimana tegangan tarik dianggap positif sedangkan tegangan tekan dianggap negatif. Kedua adalah tegangan berulang, yang dimulai diatas garis rata-rata nol dengan amplitudo yang konstan, yang mana tegangan maksimum dan tegangan minimum pada jenis tegangan ini tidak sama dan keduanya adalah tegangan tarik. Selanjutnya yang ketiga adalah tegangan acak atau di sebut juga tegangan dinamis acak atau tidak beraturan, jenis tegangan ini contohnya seperti pada sayap pesawat yang menerima beban yang tidak terduga besarnya oleh tekanan udara (Harahap, 2015).

2.10. Perambatan Retak

Perambatan retak adalah tahap kedua dari ketiga tahap proses kegagalan atau kerusakan. Dalam tahap ini retak tumbuh dan menjalar hingga mencapai batas kritis (*critical size*). Dari konsep fracture mechanics, laju perambatan retak dapat dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak dan tegangan operasi. Berikut adalah persamaan *Paris Law* yaitu:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

ΔK = Rentang faktor intensitas tegangan

C = Konstanta laju perambatan retak fatik

m = Konstanta hubungan antara respon material dengan *applied stress range*

Untuk mendapatkan nilai ΔK (rentang faktor intensitas tegangan), dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f(a/W) \dots\dots\dots (9)$$

Dimana:

ΔK = Rentang faktor intensitas tegangan (MP.m^{1/2})

ΔP = Rentang gaya

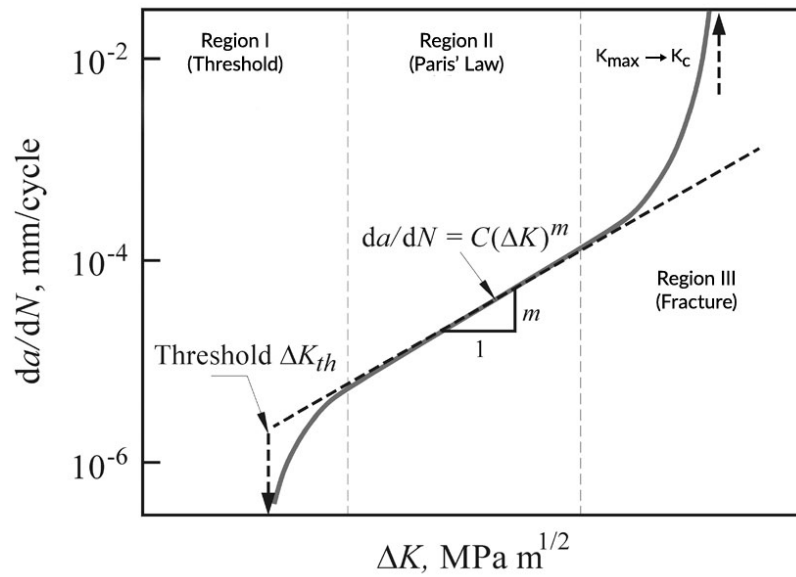
B = Tebal

W = Lebar

a = Panjang retak

$f(a/W)$ = fungsi retak berdasarkan konfigurasi pembebanan untuk spesimen bentuk CT secara detil dinyatakan dalam Persamaan (12).

Laju perambatan retak merupakan fungsi dari faktor intensitas tegangan. Retak berawal dari daerah yang paling lemah kemudian berkembang seiring dengan berjalannya siklus pembebanan. Pertumbuhan retak adalah perubahan panjang retak terhadap siklus. Perilaku perambatan retak pada material dapat ditunjukkan dengan grafik hubungan antara laju perambatan retak dan selisih faktor intensitas tegangan. Garfik tersebut dibuat dalam skema logaritmik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik perambatan retak pada material

Untuk mendapatkan nilai perambatan retak dapat dilakukan dengan metode reduksi data. Berikut adalah beberapa metode reduksi data:

1. Metode *Secant*

Metode *secant* atau *point to point* adalah metode untuk menghitung laju pertumbuhan retak yang hanya melibatkan perhitungan kemiringan garis lurus yang menghubungkan dua titik data yang berdekatan pada kurva a/N . Bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}} = \frac{(a_{i+1}-a_i)}{(N_{i+1}-N_i)} \dots\dots\dots(10)$$

Dimana:

a = retakan (*crack*)

N = Jumlah Siklus

2. Metode Polinomial Inkremental

Metode untuk menghitung da/dN ini melibatkan polinomial orde kedua (parabola) ke set titik data berurutan $(2n + 1)$, di mana n biasanya 1, 2, 3, atau 4. Berikut adalah bentuk persamaannya.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\hat{a}_i} = \frac{b_i}{c_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2^2}\right) \dots\dots\dots(11)$$

Dimana:

\hat{a}_i = Panjang retak pada siklus N_i

b = parameter regresi

$$C_1 = \frac{1}{2} (N_{i-1} + N_{i+1})$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (N_{i+1} + N_{i-1})$$

N = Jumlah Siklus

Selanjutnya, kisaran faktor intensitas regangan pada ujung retak (ΔK) ditentukan menggunakan persamaan (12) dari hasil perhitungan dengan polinomial inkremnetal sesuai standar ASTM E647, sebagai berikut:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.6\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \dots\dots\dots(12)$$

Dimana:

ΔK = Rentang faktor intensitas tegangan (MP.m^{1/2})

ΔP = Rentang gaya

B = Tebal

W = Lebar

a = \hat{a}_i/W

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung dari bulan maret - mei 2024, pengujian uji tarik dan fatik dilakukan di Laboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, pengujian SEM Fraktografi dilakukan di Laboratorium Mineral Terpadu BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

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

1. Titanium Grade 2

Material yang digunakan sebagai spesimen pengujian adalah Titanium Grade 2, pengujian yang dilakukan adalah uji tarik dan uji perambatan retak fatik. Untuk pengujian tarik mengikuti standar ASTM E-8, spesimen yang diuji adalah spesimen TT1, TT2 dan TT3 dengan arah pembebanan tegak lurus dengan arah pengerolan dan spesimen TR1, TR2 dan TR3 searah pengerolan. Sedangkan untuk pengujian perambatan retak fatik mengikuti standar ASTM E-647, spesimen yang diuji adalah 4 spesimen. Pada pengujian ini 2 spesimen (CTT1 dan CTT2) memiliki orientasi bidang yang tegak lurus dengan arah pengerolan dan 2 spesimen (CTR1 dan CTR2) memiliki orientasi bidang yang searah terhadap arah pengerolan. Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia dari material Titanium Grade 2 dan Tabel 3 menunjukkan sifat-sifat mekanik dari material Titanium Grade 2.

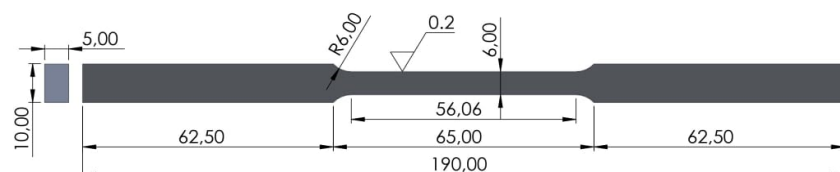
Tabel 2. Komposisi Kimia Ti Grade 2 (sumber: Matweb)

Komposisi Kimia	Wt. %
C (Karbon)	Max 0.1
Fe (Besi)	Max 0.3
H (Hidrogen)	Max 0.015
N (Nitrogen)	Max 0.03
O (Oksigen)	Max 0.25
Ti (Titanium)	99.2

Tabel 3. Sifat-sifat Mekanik Ti Grade 2 (sumber: Matweb)

Sifat-sifat Mekanik	Metrik
Tegangan Tarik Maksimum (σ_{maks})	344 MPa
Tegangan Luluh (σ_y)	275-410 MPa
Modulus Elastisitas (E)	105 GPa
% Elongasi	20%
Poisson's Rasio	0.37
Kekuatan Fatik	300 MPa (1E+7 siklus)
	425 MPa (30000 siklus)

Gambar 12 menunjukkan geometri dan dimensi spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E-8. Panjang spesimen adalah 190mm, tebal spesimen 5mm, lebar spesimen adalah 10mm, dan lebar *gage length* spesimen adalah 6mm.



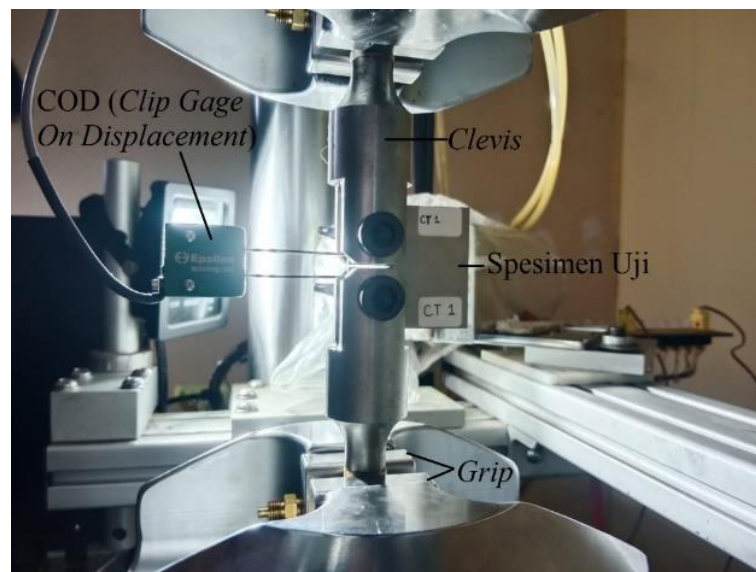
Gambar 12. Dimensi spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E-8



Gambar 14. Mesin MTS *landmark* 100kN

3. *Clip Gage On Displacement (COD)*

Clip Gage On Displacement (COD) merupakan alat yang digunakan untuk mengukur variasi celah di antara takik pada spesimen saat pengujian fatik dilakukan.



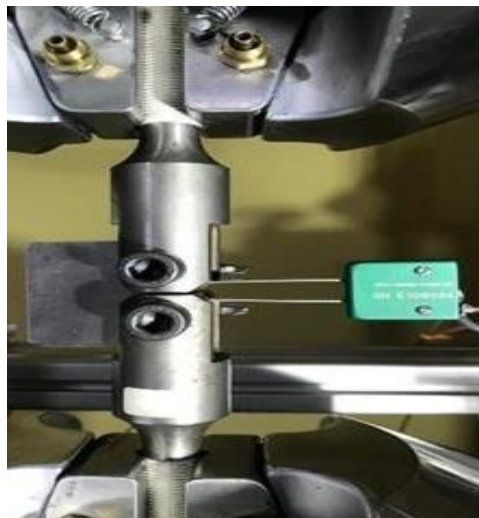
Gambar 15. Clip gage on displacement (COD)

Tabel 4. Spesifikasi *Clip gage On Displacement (COD)*

Detail Spesifikasi	
Nama	Epsilon
Merek	3541-008M-040M-ST
Model	8.00 mm
Gauge Length Travel	+4.00 mm, -1.00mm
Temperature	-40°C to 100°C (-40°F to 120°F)

4. *Clevis*

Clevis merupakan alat yang digunakan pada mesin MTS *Landmark* 100 kN untuk mencekam spesimen uji yang akan diuji perambatan retaknya. *Clevis* dipasangkan ke *grip* mesin MTS *Landmark* 100 kN supaya spesimen tetap stabil saat dilakukannya pengujian.

Gambar 16. *Clevis*

5. *Vernier Caliper* (Jangka Sorong)

Jangka sorong digunakan untuk mengukur panjang spesimen uji sebelum pengujian.



Gambar 17. *Vernier Caliper* (Jangka Sorong)

Tabel 5. Spesifikasi Jangka Sorong

Detail Spesifikasi	
Nama Merek	Mitutoyo
Akurasi	0.02 mm / 0.001 in (100 mm)
Range	0-150 mm / 0-6 in
Indikasi Minimum	0.01 mm / 0.0005 in
Standar Temperatur	20 °C
Berat	800gram

6. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Uji *Scanning Electron Microscopy* digunakan untuk melihat dan mengobservasi retakan dan patahan pada permukaan spesimen TiGr2 yang diuji.



Gambar 18. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

3.3. Metode Penelitian

Adapun prosedur dalam metode penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap yaitu persiapan spesimen, pembuatan spesimen dan pengujian:

1. Persiapan Spesimen

Material yang diuji dalam penelitian ini adalah Ti Grade 2.

2. Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen pengujian dilakukan dengan mengikuti standarisasi dimensi pengujian baja yaitu standar ASTM E8 untuk spesimen uji tarik dan ASTM E647 untuk spesimen uji fatik. Pembentukan spesimen uji dilakukan oleh CV. Matahri Terbit yang beralamat di Jl. Makrik, RT.004/RW.004, Bojong Rawalumbu, Kec. Rawalumbu, Kota Bekasi, Jawa Barat.

3. Uji Tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini harus dilakukan terlebih dahulu untuk mendapatkan data-data yaitu tegangan luluh (σ_y) dan modulus elastisitas (E). Adapun prosedur pengujian tarik sebagai berikut:

- a. Menyiapkan spesimen uji tarik sesuai dengan standard ASTM E8.
- b. Menghidupkan *Chiller* dan HPU (*Hydraulic Power Unit*).
- c. Menghidupkan MTS *Landmark* 100 kN dan temperature kontroler.
- d. Memilih program *controller 793B* lalu pilih manual *command*, klik *displacement mode*, dan naikkan *actuator* pada posisi nol.
- f. Memasang spesimen uji pada *cross head grip* atas kemudian mencekam spesimen.
- g. Menurunkan *cross head grip* sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam *grip* bawah.
- h. Menekan manual *command* dan menekan *control mood* ke *force*.
- i. Memilih *auto offset* untuk *force*, kemudian mencekam *grip* bawah sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak mengalami perubahan.
- j. Memasang *extensometer* pada spesimen dengan posisi *zero* pin

kemudian menekan manual *offset* untuk *extensometer* dan *zero* pin dilepas dari *extensometer*.

- k. Memilih program MTS *Test Suite* (MPE), memilih *template* untuk uji tarik statis.
 - l. Masukkan data spesimen meliputi Panjang, lebar dan tebal.
 - m. Masukkan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
 - n. Setelah semua data sudah di input kemudian klik *RUN*.
4. Uji Perambatan Retak Fatik

Dalam pengujian perambatan retak fatik dilakukan *precrack* terlebih dahulu dengan F_{max} sebesar 2.956 kN dan F_{min} 0.295 untuk spesimen CTT1 dan F_{max} sebesar 3.104 kN dan F_{min} 0.3104 kN untuk spesimen CTT2, CTR1 dan CTR2. Setelah itu baru dilakukan FCG *test* dengan F_{max} sebesar 3.112 kN dan F_{min} sebesar 0.3112 kN untuk spesimen CTT1 dan F_{max} sebesar 3.259 kN dan F_{min} sebesar 0.3259 kN untuk spesimen CTT2, CTR1 dan CTR2. Adapun prosedur pengujian perambatan retak fatik yang dilakukan yaitu:

- a. Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E 647.
- b. Menghidupkan *Chiller* dengan menekan tombol merah terlebih dahulu kemudian tombol hijau pada *chiller* kemudian membuka katup salah satu pompa yang akan digunakan dan terakhir naikan saklar.
- c. Menghidupkan HPU (*Hydraulic Power Unit*) dengan menekan tombol *on/off* kemudian pada panel kontroler HPU klik *main display-set up-main controler*.
- d. Menghidupkan MTS *Landmark* 100 kN dan temperatur kontroler.
- e. Menghidupkan lampu penerang pada MTS *Landmark* 100 kN.
- f. Membuka program *Station Manager* kemudian klik *project-open-FCG-open* (parameter set di FCG COD) lalu memilih file *precrack 2022* dan *configuration file* tanpa *Extensometer* yaitu *Axial Basic* lalu klik open.
- g. Pada *station manager* klik *ceklist* pada *Exclusive Control* lalu pada *manual command ceklist* pada *Enable Manual Command*.

- h. Pada *station manager* di *controls detector* ubah *Upper Action* pada *axial displacement* dari *interlock* ke *disable* lalu klik *reset* pada *interlock 1* di *station manager*.
- i. Lalu klik HPU *power low* dan tunggu hingga lampu kuning pada tombol berhenti berkedip, kemudian klik HPU *powerhigh* dan tunggu beberapa detik. Lalu melakukan hal yang sama pada HSM, klik HSM *power low* dan tunggu beberapa saat, lalu terakhir klik HSM *power high*.
- j. Pada *manual command* setelah posisi *actuator* terdeteksi lalu klik posisi *actuator* sedikit untuk membuka katup, setelah posisi *actuator* aman terhadap *cross head grip* atas aman, maka selanjutnya menaikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- k. Pada *detector*, ubah *upper action* ada *axial displacement* dari *disable* ke *interlock*.
- l. Membuka program *MTS Test Suite (MPE)*, memilih *template* untuk *fatigue crack growth testing*.
- m. Memasangkan spesimen pada *cross head grip* atas dengan rapi kemudian spesimen dicekam.
- n. Kemudian menurunkan *cross head* sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam *grip* bawah dengan kedalaman 45mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk *grip* spesimen.
- o. Meluruskan *grip* bawah sesuai dengan *grip* atas, lalu pada *manual command*, klik *control mode* dan ganti *displacement* ke *force* dan *grip* bagian bawah dicekam
- p. Kemudian *reset* pada *interlock 1 station manager* dan *unchecklist enable manual command* pada *manual command*.
- q. Menekan *new test run* pada *software MTS Test Suite*, dan mengatur *setup variables fatigue crack growth testing* yaitu dengan memasukkan data tebal spesimen, *compliment koefisien C₀-C₉* sesuai standar ASTM E467 *V₀, P_{max} dan P_{min}*, total *cycles* 1000000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament, compliment*

koefisien C₀-C₉, dan beban uji fatik menggunakan kontrol beban yang sudah ditentukan dari nilai *yield strength* yang diperoleh dari hasil uji tarik.

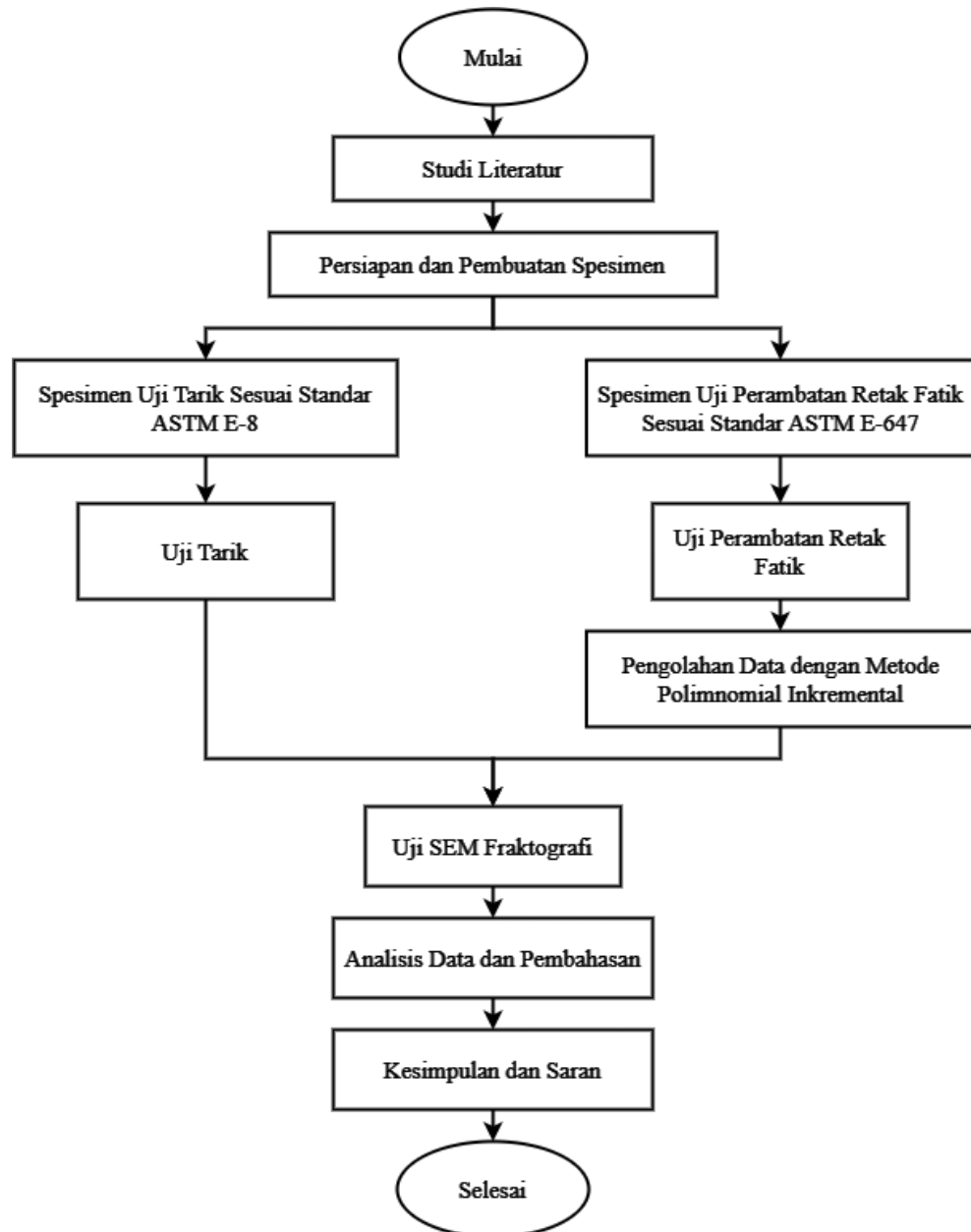
- r. Pada *precrack* test masukan nilai *crack length deck* 9 mm.
- s. Kemudian klik OK dan *Run Test*.
- t. Kemudian tunggu sampai FCG *crack length* nya mencapai nilai yang ditentukan yaitu 9 mm.
- u. Setelah test *precrack* dilakukan dan patahan sudah mencapai retak *precrack*, kemudian mulai FCG test.
- v. Menekan *new test run* pada *software* MTS *Test Suite*, dan mengatur *setup variables fatigue crack growth testing* yaitu memasukan data tebal spesimen, compliment koefisien C₀-C₅ sesuai standar ASTM E467 V₀, P_{max} dan P_{min}, total *cycles* 1000000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament*, *final crack length* dan beban uji fatik menggunakan control beban yang sudah ditentukan dari 30% nilai *ultimate strength* yang diperoleh dari hasil uji tarik.
- w. Kemudian klik OK dan *Run Test*.

5. Uji SEM Fraktografi

Uji SEM Fraktrografi dilakukan untuk mengetahui bentuk permukaan patah spesimen setelah pengujian tarik dan uji perambatan retak fatik.

3.4. Diagram Alur Penelitian

Adapun diagram alur penelitian yang dilakukan penulis ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19. Diagram Alur Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Hasil pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik pada material Titanium Grade 2 dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Data hasil uji tarik menunjukkan bahwa nilai rata-rata pengerasan regangan yang lebih baik adalah pada spesimen dengan orientasi bidang tegak lurus terhadap arah pengerolan. Karena saat mengalami proses pengerolan, butir akan memanjang sesuai arah pengerolan yang mempermudah terjadinya dislokasi pada arah pengerolan. Sedangkan pada spesimen tegak lurus terhadap arah pengerolan, akan lebih sulit mengalami dislokasi karena orientasi butir yang tegak lurus. Hal ini menyebabkan meningkatnya daya tahan material terhadap deformasi plastis dan juga meningkatnya kekerasan material.
2. Permukaan spesimen uji tarik pada bagian patah menunjukkan permukaan yang kasar dan permukaan yang halus. Hasil foto SEM pada permukaan yang kasar terdapat *void* dan *dimple*. *Void* dan *dimple* ini merupakan akibat dari deformasi plastis yang terjadi pada material. *Void* terbentuk karena atom-atom terlepas dari posisi aslinya, sedangkan *dimple* biasanya terbentuk saat patah ulet.
3. Laju perambatan retak fatik lebih cepat terjadi pada spesimen tegak lurus terhadap arah pengerolan karena batas butir yang lebih pendek menjadi tempat yang mudah memicu inisiasi retakan. Sedangkan pada spesimen searah pengerolan laju perambatan retak fatik lebih lambat karena bentuk butir yang sejajar dengan arah pengerolan mendukung propagasi retak secara terkontrol, retak melewati jalur mikrostruktur yang membutuhkan lebih banyak energi untuk terus merambat.

4. Hasil foto SEM permukaan spesimen uji perambatan retak fatik pada bagian patah menunjukkan adanya permukaan kasar, permukaan tidak rata, permukaan beralur, patah belahan, retak mikro, cekungan, struktur berlapis. Pada area 1mm setelah takik bentuk permukaan kasar, tidak rata dan ada patah belahan. Pada area 18mm setelah takik permukaan terlihat beralur, lapisan dan terlihat retak mikro. Sedangkan pada area 30mm setelah takik terlihat ada cekungan yang dalam dan tampak celah.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian-penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini material yang diuji belum diberikan perlakuan panas, sementara secara teoritis perlakuan panas dapat mengubah struktur material. Untuk mendapatkan perambatan retak yang lebih baik dapat diperoleh melalui perlakuan panas seperti *austempering*, *tempering* dan lainnya.
2. Perilaku pada pengujian ini diamati pada jumlah sampel yang terbatas (untuk uji tarik beban belum divariasikan, untuk uji perambatan retak fatik hanya 2 variasi orientasi bidang). Oleh karena itu, untuk mendapatkan perilaku yang lebih representatif perlu dilakukan pengamatan pada variasi kondisi yang beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, Yassin Mustafa., Sahari, Khairul Salleh Mohamed., Ishak, Mahadzir. and Khidhir, Basim Ali. 2014. Titanium and its Alloy. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3: 11.
- Alshoaibi, Abdalnaser M. 2023. Fatigue Crack Growth Analysis in Modified Compact Tension Specimen with Varying Stress Ratios: A Finite Element Study. *Applied Science*, 13: 1-17.
- Amiruddin, A. and Lubis, F.A. 2018. Analisa Pengujian Lelah Material Tembaga Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine. *Jurnal Ilmiah "MEKANIK" Teknik Mesin ITM*, 4 (2): 93-99.
- Ashrafi, Hamid and Shamanian, Morteza. 2020. Void Formation and Plastic Deformation Mechanism of a Cold Rolled Dual-Phase Steel During Tension. *Acta Metallurgica Sinica*, 33 (2): 299-306.
- Badaruddin, M., Kuncoro. dan Kuncoro, P.S., Suudi, A. and Sugiyanto. 2018. Low Cycle Fatigue Analysis of an Annealed AISI 4140 Steel. *Prosiding SNTTM XVII*, Rekayasa Material-11, 56-61.
- Bertolo, Virginia., Jiang, Quanxin., Tiringier, Urs̃a., Walters, Carey L., Sietsma, Jilt. and Popovich, Vera. 2022. Cleavage fracture micromechanisms in thick-section quenched and tempered S690 high-strength steels. *Journal of Material Science*, 57: 20033–20055.
- Catherine, L.D.K., and Hamid, Darulihshan Bin Abdul. 2018. The effect of heat treatment on the tensile strength and ductility of pure titanium grade 2. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 429: 1-5.

- Desmarita, Leni D., Gunawarman., Yetri, Yuli. and Affi, Jon. 2018. Perilaku Titanium Murni (CPTi grade 2) terhadap Lapisan Hydroxyapatite Untuk Aplikasi Medis. *Jurnal Rang Teknik*, 1 (1): 27-33.
- Elias, Carlos Nelson., Fernandes, Daniel Jogaib., Souza, Francielly Moura de., Monteiro, Emília dos Santos. and Biasi, Ronaldo Sérgio de. 2019. Mechanical and clinical properties of titanium and titanium based alloys (Ti G2, Ti G4 cold worked nanostructured and Ti G5) for biomedical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8: 1060-69.
- Harahap, D.G. 2015. Studi Literatur Perbandingan Hasil Uji Lelah Tipe Cantilever Dan Four Rotating Bending Pada Baja Tahan Karat AISI 304. (Skripsi). Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik. Universitas Teuku Umar. Aceh Barat.
- Hermani, Bambang. and Muhtar, Dicky Omar. 2022. Perancangan Mesin Roll Produk Metal Forming Sheet Tebal Bahan of 0.3 mm. *Maestro Jurnal Ilmiah*, 4.
- Guo, Shun., Li, Yinan., Gu, Jieren., Liu, Jie., Peng, Yong., Wang, Pengkun., Zhou, Qi. and Wang, Kehong. 2023. Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V/ B4C titanium matrix composite fabricated by selective laser melting (SLM), 23: 1934-1946.
- Lee, Min-Su., Jo, A-Ra., Hwang, Sun Kwang., Hyun Yong-Taek. and Jun, Tea-Sung. 2021. The role of strain rate and texture in the deformation of commercially pure titanium at cryogenic temperature. *Materials Science and Engineering*, 827.
- Lee, Min-Su, Lee, Jeong-Rim., Jeon, Jeong-Rim., Won, Jeong-Rim., Hyun, Jeong-Rim. and Jun, Tea-Sung. 2023. In-situ study of anisotropic strain-hardening and grain boundary mediated deformation in commercially pure titanium. *Journal of Materials Research and Technology*, 24: 15.
- Majumdar, J. Dutta. and Manna, Indranil. 2015. Laser Surface Engineering, *In Book: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer, 2639-2676.
- Pan, Hongjian., He, Yue. and Zhang, Xiaodan. 2021. Interactions between dislocations and boundaries during deformations. *Materials*, 14(4), 1-47.
- Pourret, Olivier. and Dia, Aline. 2016. Vanadium, *In Book: Encyclopedia of Geochemistry*. Springer, 2.
- Putra, W. T., Winangun, K. and Fadelan. 2019. Analisa Kekuatan Tarik Seng Galvanis Terhadap Beban Yang Di Berikan. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(1), 9-15.

- Shravan, Aitha., Madhukar, Samatham., Akhil, Bootla. and Krishna, Dr. A. A. Sri Rama. 2017. Experimental and Numerical Analysis of Metal Removal Rate and Surface Finish on Al- Ti Alloy. *The Journal of Scientific and Engineering Research*, 3: 407-11.
- Sutowo, Cahya., Rokhmanto, Fendy., Senopati, Galih. and Ilman, Kholqillah Ardian. 2016. Pembentukan Struktur Mikro Paduan Titanium TI6AL6MO As Cast Sebagai Bahan Dasar Implan. *In Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 5.
- Unune, Deepak Rajendra., Brown, Georgina R. and Reily, Gwendolen C. 2022. Thermal based surface modification techniques for enhancing the corrosion and wear resistance of metallic implants: A review. *Vacuum*, 203: 19.
- Wang, Haibo., Niu, Qiang. and Yan, Yu. 2024. Study of Anisotropic Behavior in Sheet Metal Forming. *Materials*, 17: 1-18.
- Won, Jong-Woo., Suh, Byeong-Chan., Jeong, Jae-Suk., Hyun Yong-Taek., Lee, Min-Su. and Jun, Tea-Sung. 2023. Tensile strain-hardening behavior and related deformation mechanism of pure titanium at cryogenic temperature. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 1669-1676.
- Wu, Haoran., Jiang, Jinghua., Liu, Huan., Sun, Jiapeng., Gu, Yanxia ., Tang, Ren., Zhao, Xincan. and Ma, Aibin. 2017. Fabrication of an Ultra-Fine Grained Pure Titanium with High Strength and Good Ductility via ECAP plus Cold Rolling. *Metals*,7(563): 1-15.