

**PERAMBATAN RETAK FATIK *CRITICAL TIP OPENING*
DISPLACEMENT (CTOD) PADA MAGNESIUM AZ31B DALAM
LARUTAN *RINGER LAKTAT***

(TESIS)

Oleh

MAHERARIYAT



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

2026

ABSTRAK

PERAMBATAN RETAK FATIK *CRITICAL TIP OPENING DISPLACEMENT* (CTOD) PADA MAGNESIUM AZ31B DALAM LARUTAN *RINGER LAKTAT*

**Oleh
Maherariyat**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi mekanisme korosi serta pengaruh waktu perendaman terhadap laju korosi dan perilaku perambatan retak fatik paduan magnesium AZ31B dalam larutan *ringer laktat*. Pengujian laju korosi dilakukan menggunakan metode kehilangan berat (*weight loss*) berdasarkan standar ASTM G31 dengan variasi waktu perendaman hingga empat minggu. Analisis morfologi dan produk korosi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM–EDS) serta *X-Ray Diffraction* (XRD). Pengujian perambatan retak fatik dilakukan berdasarkan standar ASTM E647 dengan kondisi material awal (raw material) serta material yang telah mengalami korosi selama satu dan dua minggu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju korosi magnesium AZ31B meningkat seiring bertambahnya waktu perendaman, dengan peningkatan kehilangan massa hingga 52,9% setelah empat minggu. Analisis SEM–EDS mengindikasikan terbentuknya mekanisme korosi seragam, korosi transgranular, serta produk korosi utama berupa $Mg(OH)_2$, MgO , dan $CaCO_3$. Hasil pengujian fatik menunjukkan bahwa korosi mempercepat laju perambatan retak dan menurunkan umur fatik, yang ditandai dengan peningkatan eksponen Paris serta kegagalan lebih dini pada spesimen terkorosi. Temuan ini menunjukkan bahwa interaksi antara lingkungan korosif dan beban siklik berperan signifikan dalam degradasi mekanik paduan magnesium AZ31B, sehingga perlu menjadi pertimbangan utama dalam aplikasi biomaterial implan.

Kata kunci : Mg AZ31B, korosi, *ringer laktat*, perambatan retak fatik, biomaterial.

ABSTRACT

FATIGUE CRACK PROPAGATION BEHAVIOR AND CRITICAL TIP OPENING DISPLACEMENT (CTOD) OF AZ31B MAGNESIUM ALLOY IN RINGER'S LACTATE SOLUTION

By
Maherariyat

This study investigates the corrosion mechanisms and the effect of immersion time on the corrosion rate and fatigue crack propagation behavior of AZ31B magnesium alloy in Ringer's lactate solution. Corrosion rate measurements were carried out using the weight loss method in accordance with ASTM G31, with immersion periods of up to four weeks. Surface morphology and corrosion products were characterized using Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) and X-ray Diffraction (XRD). Fatigue crack propagation tests were conducted in accordance with ASTM E647 on raw material specimens as well as specimens pre-corroded for one and two weeks. The results show that the corrosion rate of the AZ31B magnesium alloy increases with increasing immersion time, with mass loss rising by up to 52.9% after four weeks. SEM-EDS analysis revealed the occurrence of uniform corrosion and transgranular corrosion, along with the formation of dominant corrosion products such as $Mg(OH)_2$, MgO , and $CaCO_3$. Furthermore, the fatigue test results indicate that corrosion significantly accelerates crack propagation and reduces fatigue life, as reflected by higher Paris law exponents and earlier failure in corroded specimens. These findings demonstrate that the combined effects of corrosive environments and cyclic loading play a critical role in the mechanical degradation of AZ31B magnesium alloy and should be carefully considered in biomedical implant applications.

Keywords: Mg AZ31B, corrosion, corrosion, Ringer's lactate, fatigue crack propagation, biomaterials

**PERAMBATAN RETAK FATIK *CRITICAL TIP OPENING*
DISPLACEMENT (CTOD) PADA MAGNESIUM AZ31B DALAM
LARUTAN *RINGER LAKTAT***

Oleh

MAHERARIYAT

Tesis

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

Pada

**Program Pasca Sarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



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

2026

Judul Tesis

**PERAMBATAN RETAK FATIK CRITICAL
TIP OPENING DISPLACEMENT (CTOD)
PADA MAGNESIUM AZ31B DALAM
LARUTAN RINGER LAKTAT**

Nama Mahasiswa

: **Maherariyat**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2425021003**

Program Studi

: **Magister Teknik Mesin**

Fakultas

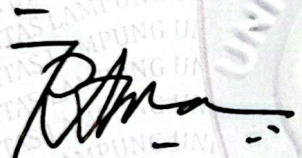
: **Teknik**

MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

Pembimbing 2


Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU.
NIP. 19700812 200112 1 001


Prof. M. Badarruddin, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19721211 199803 1 002

2. **Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin**


Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 19690620 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

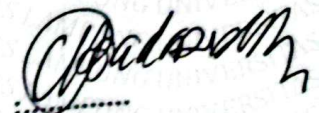
Ketua penguji

: Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU.....



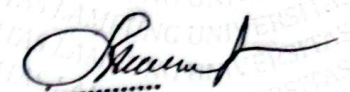
Anggota Penguji

: Prof. M. Badarruddin, S.T., M.T., Ph.D



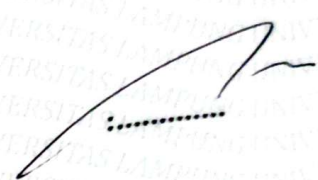
Penguji Utama I

: Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.



Penguji Utama II

: Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc

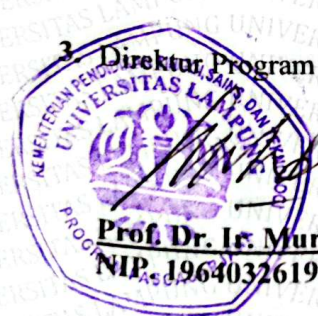


2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 28 Januari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maherariyat
Nomor Pokok Mahasiswa : 2425021003
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Tesis dengan judul “PERAMBATAN RETAK FATIK *CRITICAL TIP OPENING DISPLACEMENT* (CTOD) PADA MAGNESIUM AZ31B DALAM LARUTAN *RINGER LAKTAT*“ dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 28 Januari 2026

Yang Menyatakan



MAHERARIYAT
NPM. 2425021003

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Maherariyat dilahirkan di Gisting pada tanggal 31 Maret 2002. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Sukirman dan Ibu Surtiwi. Penulis mengawali pendidikan formal di SD Negeri 03 Campang (2008-2014), MTS MA Landsbaw (2014-2017), SMA N 1 Sumberejo (2017-2020). Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) sebagai mahasiswa penerima KIP KULIAH dan menyelesaikan Pendidikan S1 dengan gelar Sarjana Teknik (S.T) pada tanggal 7 Juni 2024. Pada tahun 2024 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Magister Teknik Mesin dan menyelesaikan Pendidikan S2 dengan Gelar Magister Teknik (M.T) pada tanggal 28 Januari 2026.

Pengalaman penulis dalam bidang organisasi FORKOM KIP KULIAH (2020-2022), Ketua Bidang Edukasi Dan Kemahasiswaan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (2022-2023), KMNU Universitas Lampung (2022-2023). Pengalaman kerja penulis di PT Semen Padang, Padang, Sumatra Barat (2022) dan PT Pelabuhan Tanjung Priok Nonpetikemas Cabang Panjang, Lampung (2025). Penulis aktif dalam bidang akademik dan riset, serta menjadi Asisten Laboratorium Material Teknik pada tahun 2023-2024. Pada tahun 2024 penulis melakukan penelitian Skripsi dengan judul “Pengaruh Perendaman Penuh (*Total Immersion*) Magnesium AZ31B dalam Larutan *Ringer Laktat* Terhadap Perilaku Korosi dan Kekuatan Tarik” di bawah bimbingan Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU dan Prof. M. Badarruddin, S.T., M.T., Ph.D. Pada tahun 2024 penulis melanjutkan penelitian Tesis dengan judul “Perambatan Retak Fatik Critical Tip Opening Displacement (CTOD) pada Magnesium AZ31B dalam Larutan Ringer Laktat ” di bawah bimbingan Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU dan Prof. M. Badarruddin, S.T., M.T., Ph.D.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الْحَمْدُ لِلَّهِ

Alhamdulillah hirobbil alamin

Segala puji bagi الله, tuhan semesta alam

Karya Tulis Ini Ku Persembahkan Untuk

Bapak Tercinta Sukirman

Ibu Tercinta Surtiwi

Kakak Tercinta Nasehan, Marhamah, Dan Nasrudin

Nenek Tercinta Tugini

Miftakhul Jannah

Teman Teman Seangkatan 2020

Magister Teknik Mesin 2024

Dan

Almamamter Tercinta

Teknik Mesin Universitas Lampung

M.T 2026

MOTTO HIDUP

“Dalam hidup ini kita dihadapkan pada masalah.
Pilihan kita hanya dua yaitu menghadapinya dengan keberanian, atau
menghindar dan kehilangan kesempatan untuk menjadi lebih kuat.

Keberanian bukan berarti tanpa masalah, tetapi memilih
menghadapinya demi menjadi lebih kuat.

MAKA

Jangan pernah menyerah , ambil semua peluang yang ada sampai
kamu benar benar merasa puas dengan kehidupanmu saat ini”

(Maherariyat)

SANWACANA

Assalamualaikum wr.wb

Alhamdulillahirobbil' alamiin, segala puji bagi ALLAH SWT tuhan semesta alam, atas segala rahmat dan hidayah-nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “PERAMBATAN RETAK FATIK *CRITICAL TIP OPENING DISPLACEMENT* (CTOD) PADA MAGNESIUM AZ31B DALAM LARUTAN *RINGER LAKTAT*” Penulis menyadari bahwa ada kekurangan dalam pengetahuan, pengalaman, dan kemampuan yang dimiliki. Meskipun demikian, Penulis berharap bahwa tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak dan berkontribusi dalam pemikiran akademis serta bidang lainnya. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih atas kritik, saran, bimbingan, dan petunjuk yang diterima dari semua pihak, yang sangat diharapkan dapat membantu dalam kelengkapan dan penyempurnaan Tesis ini. Penulis mengucapkan rasa terima kasih dan penghargaan yang tinggi:

1. Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T.,Ph.D.,IPU. selaku dosen pembimbing utama atas kesediaannya dalam membimbing serta memberikan masukan dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Prof. M. Badarruddin, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing pendamping Tugas Akhir, atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, membimbing, memberi kritik sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.
3. Prof. Dr. Sugiyanto, M.T. dan Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc selaku dosen pembahas dalam Tugas Akhir ini telah memberi kritik dan masukan yang bermanfaat bagi penulis.
4. Dr. Harmen, S.T.,M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung telah memberikan arahan mengenai perkuliahan.

5. Ahmad Suúdi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan kenyamanan selama perkuliahan.
6. Rizal Adi Saputra, S.T., M.T yang selalu memberikan bimbingan, saran serta masukan selama masa perkuliahan.
7. Kedua orang tersayang Bapak dan Ibu (Sukirman & Surtiwi) yang selalu memberikan nasehat, motivasi serta selalu mendukung penulis dari awal hingga akhir masa perkuliahan.
8. Kakak-kakakku tersayang yang selalu mensupport penulis selama masa perkuliahan.
9. Miftakhul jannah yang selalu mendampingi penulis sampai akhir pengerjaan Tesis.
10. Para staf admin Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu sedia dan sigap membantu penyelesain segala berkas yang diperlukan penulis.
11. Lakh Lhey Crew yang selalu menghibur dan membantu penulis dalam penyelesain Tugas Akhir serta memberikan motivasinya.
12. Anggota kos Pavillion (Ragil Alvin, bang Yoga , bang bavo, bang arfi, dodi, Raimondo, rizki dan teman teman yang tidak dapat disebutkan) yang selalu menghibur penulis disaat sedang jenuh.
13. Teman-teman seperjuangan Magister Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2024.

Akhir kata, Penulis sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan Tesis ini dari awal sampai akhir.

Bandar Lampung, 28 Januari 2026

MAHERARIYAT
NPM 2425021003

DAFTAR ISI

COVER	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
HALAMAN JUDUL	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN PENULIS	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
MOTTO HIDUP	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
 I. PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Magnesium	5
2.2 Magnesium AZ31B	6
2.3 Korosi	8
2.4 Laju korosi.....	8
2.5 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Laju Korosi	10
2.6 Pengujian simulasi kondisi cairan	12
2.7. Fatik.....	14
2.8. Perambatan Retak.....	16
2.9. Observasi Scanning Electron Microscope (SEM).....	23
2.10. XRD.....	24
III. METODOLOGI PENELITIAN	26

3.1 Waktu dan tempat penelitian	26
3.2 Alat dan bahan penelitian	27
3.3 Pelaksanaan Penelitian	32
3.4 Pelaksanaan pengujian	33
3.5 Diagram alir.....	39
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
4.1 Uji Laju Korosi.....	40
4.2 Hasil SEM-EDS Uji Laju Korosi	42
4.3 Hasil Patahan Uji fatik	55
4.5 Hasil Pengujian Fatik	50
4.4 Hasil SEM-EDS Patahan Uji fatik	56
V. KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Magnesium Murni (Mg)	5
Tabel 2. Komposisi Kimia Mg AZ31B (Matweb)	7
Tabel 3. Sifat Mekanik Mg AZ31B (Matweb).....	7
Tabel 4. Hubungan laju korosi dan ketahanan korosi	9
Tabel 5. Nilai Ketepatan Laju Korosi (K).....	10
Tabel 6. Konsentrasi elektrolit pada larutan SBF	12
Tabel 7. Komposisi ringer laktat	13
Tabel 8. Rencana Jadwal Penelitian.....	26
Tabel 9. Spesifikasi Mg AZ31B.....	28
Tabel 10. Spesifikasi kandungan <i>Ringer Laktat</i> Setiap 500ml	28
Tabel 11. Spesifikasi timbangan digital.	29
Tabel 12. Spesifikasi jangka sorong	30
Tabel 13. Spesifikasi Hydraulic servopulser mesin landmark MTS 100 kN	31
Tabel 14. Spesifikasi Ultrasonic Cleaner	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Solubility of oxygen in water at different temperatures</i>	11
Gambar 2. Simulasi metode uji rendam statik.....	14
Gambar 3. Kurva pertambahan retak fatik	17
Gambar 4. Komponen tegangan	18
Gambar 5. Nilai K _I untuk macam geometri retak.....	19
Gambar 6. Modulus pergeseran permukaan retak	20
Gambar 7. Skematik laju pertumbuhan retak	20
Gambar 8. Beban fatik pada perambatan retak.....	21
Gambar 9. Daerah permukaan patah (fracture) pada sampel uji fatik: a) temperatur ruang, b) 100 °C, and c) 200 °C	23
Gambar 10. Difraksi sinar X pada kristal	25
Gambar 11. Material magnesium AZ31B	27
Gambar 12. <i>Ringer laktat</i>	28
Gambar 13. Timbangan digital	29
Gambar 14. Jangka sorong	29
Gambar 15. <i>Hydraulic servopulser mesin landmark</i> MTS 100 kN.	30
Gambar 16. <i>Ultrasonic Cleaner</i>	31
Gambar 17. Spesimen fatik ASTM E647 middle tension	32
Gambar 18. Spesimen dengan Chamber.....	32
Gambar 19. Spesimen uji fatik ASTM E647 dengan chamber	33
Gambar 20. Spesimen uji korosi.....	34
Gambar 21. Penuangan larutan <i>ringer laktat</i> kedalam gelas ukur 100ml	35
Gambar 22. Perendaman spesimen.....	36
Gambar 23. <i>Scanning Electron Microscope</i>	37
Gambar 24. Grafik uji laju korosi hubungan kehilangan massa dan waktu	40
Gambar 25. Spesimen pengujian korosi (a) spesimen raw dan (b, c, d, dan e) spesimen dengan perendaman selama 1, 2, 3, dan 4 minggu.....	41
Gambar 26. Hasil morfologi SEM korosi 2 minggu permukaan <i>cross-section</i> pada perbesaran (a). 100x, (b). 1000x (c). 5000x, (d). 2500x, (e). 10000x...	43
Gambar 27. Hasil EDS perendaman 2 minggu arah <i>cross-section</i>	44

Gambar 28. Hasil morfologi SEM korosi 2 minggu pada permukaan dengan perbesaran (a). 25x, (b). 150x (c). 2000x, (d). 2000x, (e). 8000x.....	46
Gambar 29. Hasil EDS permukaan selama perendaman 2 minggu.....	47
Gambar 30. Hasil XRD perendaman selama 2 minggu.....	49
Gambar 31. Grafik hubungan panjang retak dengan jumlah siklus.....	51
Gambar 32. Hubungan <i>Crack opening displacement</i> terhadap jumlah siklus.....	52
Gambar 33. Grafik hubungan ΔK dengan da/dN	54
Gambar 34. Hasil patahan pengujian retak fatik	56
Gambar 35. Fraktografi SEM hasil patahan fatik Raw material dengan perbesaran (a). 35x, (b-d). 150x dan (e-g). Detail surface morfologi	58
Gambar 36 Fraktografi SEM hasil patahan fatik perendaman selama 1 minggu perbesaran (a). 35x, (b-d). 150x dan (e-g). Detail surface morfologi ...	59
Gambar 37. Fraktografi SEM hasil patahan fatik perendaman selama 2 minggu perbesaran (a). 35x, (b-d). 150x dan (e-g). Detail surface morfologi.....	60
Gambar 38. Hasil EDS permukaan patahan uji retak fatik Raw material	62
Gambar 39. Hasil EDS permukaan patahan uji retak fatik perendaman 1 minggu ..	63
Gambar 40. Hasil EDS permukaan patahan uji retak fatik perendaman 2 minggu ..	64

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Paduan magnesium, khususnya AZ31B, menjadi material yang sangat menjanjikan dalam aplikasi biomedis karena memiliki sifat mekanik yang mirip dengan tulang manusia dan kemampuan biodegradable-nya. Karakteristik ini membuat paduan magnesium berpotensi besar sebagai material implan temporer yang dapat terurai secara alami dalam tubuh setelah jaringan pulih, sehingga tidak memerlukan operasi kedua untuk pengangkatan implan. Namun, tantangan utama dalam penggunaan magnesium adalah kerentanannya terhadap korosi, terutama dalam lingkungan yang mengandung ion klorida, seperti cairan tubuh. Korosi tidak hanya mengurangi umur pakai material tetapi juga mempengaruhi integritas mekanisnya, termasuk ketangguhan fraktur dan kemampuan menahan pertumbuhan retak

Biomaterial adalah jenis material yang diperuntukan langsung berinteraksi dengan sistem biologis pada organisme hidup. Penggunaan biomaterial bertujuan untuk menggantikan atau memulihkan fungsi organ yang mengalami kegagalan atau kerusakan. Oleh karena itu, biomaterial harus memenuhi beberapa kriteria penting, terutama material harus bersifat biokompatibel, yaitu mampu berintegrasi dengan tubuh tanpa menimbulkan reaksi penolakan (Sukmana, 2020). Selain itu, biomaterial juga harus memiliki ketahanan terhadap korosi agar dapat bertahan lama dalam tubuh selama proses penyembuhan. Hal ini penting karena lingkungan dalam tubuh manusia cenderung bersifat korosif. Selain itu, biomaterial juga harus memiliki sifat mekanik yang sejajar dengan tulang manusia untuk memastikan bahwa saat bekerja dan mengalami beban, biomaterial mampu memenuhi fungsinya sebagai pengganti tulang yang rusak dan sendi (Staiger et al., 2006).

Ketahanan terhadap korosi yang tinggi merupakan salah satu persyaratan kunci untuk biomaterial. Korosi adalah bentuk degradasi material akibat reaksi kimia dengan lingkungan sekitarnya. Perbaikan kinerja material terkait sifat-sifatnya dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan memvariasikan komposisi melalui peningkatan konsentrasi atau penambahan elemen padu. Oleh karena itu, dalam konteks medis atau kesehatan, diperlukan material atau teknologi rekayasa yang mampu mengatasi masalah dan membantu proses penyembuhan tanpa menimbulkan efek samping bagi pasien. Pemilihan material yang optimal harus mempertimbangkan sifat mekanik dan fisik yang baik, terutama dalam konteks rekayasa jaringan dalam tubuh manusia. Magnesium dipilih karena memiliki sifat mekanik yang mirip dengan tulang dan dapat terdegradasi, di mana hasil degradasinya dapat diabsorpsi oleh tubuh tanpa menimbulkan efek berbahaya (non-toksik) terhadap metabolisme tubuh, serta bersifat biokompatibel (Sukmana et al., 2016).

Salah satu parameter penting dalam mengevaluasi ketangguhan fraktur material adalah Critical Tip Opening Displacement (CTOD). CTOD mengukur perpindahan pada ujung retak saat material mencapai kondisi kritis, yaitu saat retak mulai tumbuh (ASTM, 2003). Parameter ini sangat relevan untuk material ductile seperti magnesium, karena CTOD mencerminkan akumulasi regangan plastis di daerah ujung retak, yang merupakan karakteristik penting dari material ductile. Studi terbaru menunjukkan bahwa CTOD dapat digunakan untuk memprediksi laju pertumbuhan retak fatik dan mengevaluasi pengaruh lingkungan korosif terhadap ketangguhan fraktur material.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi pengujian pada spesimen magnesium AZ31B terhadap laju korosi yang terjadi dengan menggunakan pengukuran hilangnya berat dengan teknik perendaman penuh. Untuk selanjutnya akan dilaksanakan pengujian tarik guna mengetahui pengaruh dari korosi terhadap kekuatan tarik.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilaksanakan adalah :

1. Memahami mekanisme degradasi material magnesium AZ31B dalam kondisi yang menyerupai lingkungan tubuh.
2. Menganalisis pengaruh waktu paparan terhadap ketahanan fatik.
3. Mengidentifikasi parameter-parameter kritis yang mempengaruhi umur pakai implan.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Spesimen yang digunakan Mg AZ31B.
2. Fluida yang digunakan untuk pengujian laju korosi menggunakan *ringer laktat*.
3. Metode yang digunakan dalam pengujian laju korosi adalah metode *weight loss*.
4. Kandungan oksigen, pH dan suhu cairan tidak ditinjau.
5. Laju korosi yang diujikan untuk sampel uji tarik hanya pada waktu singkat (*short-time*)

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari laporan penelitian tugas akhir ini yaitu sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Memuat tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Membahas tentang tulang manusia, magnesium AZ31B, *simulation body fluid* (SBF), korosi, arah pengerolan, jenis pengujian, sifat mekanik spesimen, Scanning Electron Microscope (SEM), Uji Tarik dan Uji *Fatigue*.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan penelitian, dan diagram alir serta uraian tahap-tahap dalam penelitian seperti studi literatur, persiapan penelitian, uji tarik, uji laju korosi, uji fatik, SEM-EDS, analisa dan pembahasan serta simpulan.

BAB IV. DATA DAN PEMBAHASAN

Memuat data-data yang diperoleh dari hasil pengujian tarik dan pengujian laju korosi dengan semua metode yang digunakan.

BAB V. PENUTUP

Memuat kesimpulan dan saran penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnesium

Magnesium (Mg) adalah unsur kimia logam alkali tanah berwarna putih keperakan, ringan, dan kuat dengan nomor atom 12. Pada tahun 1808, magnesium (Mg) pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey. Logam ini digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi khusus di industri nuklir, logam, dan pesawat militer (Mordike & Ebert, 2001). Secara umum, magnesium memiliki karakteristik seperti densitas yang rendah dibandingkan dengan logam lainnya, memiliki tingkat kekerasan yang tinggi, tahan terhadap korosi, memiliki konduktivitas listrik dan termal yang lebih baik, serta memiliki kekuatan tarik yang sedang (Friedrich & Mordike, 2006). Magnesium termasuk golongan logam dasar yang ringan karena massa jenis atau densitas berkisar antara $1,74 - 1,83 \text{ g/cm}^3$.

Untuk meningkatkan karakteristik fisik, mekanik, komposisi, dan bentuk magnesium, dapat dicampur dengan unsur lain sebagai paduan, seperti logam aluminium. Kekuatan tarik dan kekerasan magnesium dapat ditingkatkan dengan mencampurkan dengan berbagai unsur. Contoh dari paduan magnesium ini adalah Magnesium AZ31B, yang terdiri dari magnesium, aluminium, dan seng. Ketersediaan magnesium dalam kerak bumi cukup melimpah, sekitar 2-3%, dengan magnesium murni memiliki persentase sekitar 99,9%. (Jayasathyakawin et al., 2020). Klasifikasi Mg murni alkali tanah seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Magnesium Murni (Mg) (Friedrich & Mordike, 2006)

Nama unsur	Lambang	Nomor atom	Massa atom	Golongan	Periode
Magnesium	Mg	12	24,3050(6)	2	3

2.2 Magnesium AZ31B

Magnesium AZ31B (Mg AZ31B) adalah jenis paduan magnesium dengan kandungan aluminium, seng, dan besi. Penggunaan magnesium ini sedang intensif dikaji oleh peneliti material modern karena potensinya sebagai bahan dalam aplikasi kedokteran atau *medicals and clinical sciences* khususnya tulang manusia (*orthopedic*) (MERT, 2017). Mg AZ31B menarik perhatian yang besar dalam bidang biomedis karena sifat mekaniknya yang luar biasa, seperti kemampuan biodegradasi dan biokompatibilitas. Kepadatan dan modulus elastisitasnya sejalan dengan tulang manusia alami, menjadikannya pilihan pengganti tulang yang optimal. Berbeda dengan biomaterial logam lainnya, Mg AZ31B dapat diserap oleh jaringan tanpa memerlukan pembedahan kedua setelah penyembuhan. Dalam hal ini, implan yang dapat terurai secara hayati larut dalam lingkungan fisiologis setelah memenuhi fungsinya, terutama penting dalam bidang kardiovaskular.

Modulus elastisitas (*Young's modulus*) magnesium berkisar antara 40 hingga 50 GPa, menyerupai kekakuan tulang manusia yang berkisar antara 10 hingga 40 GPa. Meskipun magnesium memiliki kekuatan tarik yang tidak sekuat baja dan kekakuannya relatif rendah, namun memiliki sifat dan kemampuan yang membuatnya cocok sebagai bahan implan tulang manusia serta harganya jauh lebih rendah dibandingkan dengan material implan lainnya (Staiger et al., 2006). Logam Magnesium memiliki keunggulan unik yang tidak dipunyai oleh logam lain nya, termasuk sifat *biodegradable*, *non – toxic* dan *mechanical properties* layaknya tulang manusia pada umumnya . Sifat *Biodegradable* ini telah membuat magnesium menjadi pilihan utama dalam berbagai bidang seperti *materials*, *mechanical*, *science*, dan *tissue engineering*, sebagai kandidat untuk bahan implan tulang (Witte et al., 2005).

Material implan yang ideal, seperti yang berbasis Mg, diinginkan untuk memiliki sifat penghalang korosi dengan tingkat korosi awal yang rendah di lingkungan tubuh. Hal ini memungkinkan implan untuk berfungsi sebagai penyangga sementara hingga pembentukan jaringan baru terjadi, dan setelah itu,

bagian yang tersisa akan terurai dengan cepat tanpa menimbulkan efek toksik. (Sezer et al., 2018). Sejumlah elemen paduan, seperti kalsium (Ca), stronsium (Sr), seng (Zn), dan silikon (Si), bersama dengan unsur-unsur toksik rendah seperti timah (Sn) dan seng (Zr), telah dicampur ke dalam matriks magnesium. Tujuan dari penambahan ini adalah untuk mencapai ketahanan korosi yang diinginkan dan menjaga sifat mekanik selama proses degradasi berlangsung. (Witte et al., 2005). Komposisi kimia dari Mg AZ31B tercantum dalam Tabel 2 dan sifat mekaniknya terdapat pada Tabel 3.

Tabel 2. Komposisi Kimia Mg AZ31B (Matweb)

Unsur	%wt
Aluminum, Al	2.5 - 3.5 %
Nickel, Ni	<= 0.0050 %
Calcium, Ca	<= 0.040 %
Zinc, Zn	0.60 - 1.4 %
Copper, Cu	<= 0.050 %
Iron, Fe	<= 0.0050 %
Silicon, Si	<= 0.10 %
Magnesium, Mg	96%
Manganese, Mn	>= 0.20 %

Tabel 3. Sifat Mekanik Mg AZ31B (Matweb)

Sifat Mekanik (<i>Mechanical Properties</i>)	Satuan <i>Metric</i>
Kekerasan (<i>Hardness Brinell</i>)	49
Kekuatan Tarik Maksimum (<i>Ultimate Tensile Strength</i>)	260 MPa
Kekuatan tarik luluh (<i>Tensile Strength, Yield</i>)	200 MPa
	Strain 0.200 %
Kekuatan Mulur (<i>Elongation</i>)	15%
Kekakuan (<i>Young's Modulus</i>)	45.0 GPa
<i>Compressive Yield Strength</i>	97.0 MPa
<i>Ultimate Bearing Strength</i>	385 MPa
<i>Bearing Yield Strength</i>	230 MPa
Rasio Poisso	0.35
Modulus Geser	17.0 GPa
Kekuatan Geser	130 MPa
<i>Charpy Impact</i>	1.30J

2.3 Korosi

Korosi, secara umum, merujuk pada dampak yang timbul akibat reaksi kimia. Pada material yang terbuat dari logam, proses korosi terjadi ketika elektron dilepaskan dari logam (anoda) dan kemudian menempel ke logam lain (katoda). Tahap ini terjadi ketika terdapat zat yang bertindak sebagai elektrolit untuk menghantarkan arus listrik. Korosi merupakan fenomena yang kompleks dan tidak hanya berlaku pada bahan logam, akan tetapi pada bahan non-logam. Secara umum, korosi akan terjadi pada permukaan logam yang dikenal sebagai korosi umum.

Dalam proses korosi, logam mengalami oksidasi, sementara oksigen dari udara mengalami reduksi. Korosi adalah fenomena elektrokimia di mana terjadi perubahan kimia yang melibatkan aliran arus listrik. Sebagian dari logam berperan sebagai elektroda negatif (anoda), sementara yang lainnya berperan sebagai elektroda positif (katoda). Aliran elektron terjadi dari anoda ke katoda, memicu terjadinya korosi (Ashadi & Gusniani, 2002):

2.4 Laju korosi

Laju korosi adalah proses yang terjadi dalam korosi, di mana oksigen meningkatkan kecepatan korosi di sekitar sel oksida. Korosi terjadi lebih cepat ketika oksigen bergerak ke arah katoda dan elektron dari anoda, di mana reaksi korosi terjadi. Pada suhu rendah atau larutan yang encer, reaksi ini tidak selalu terjadi dan arus elektron yang digunakan dapat kurang dari yang diharapkan sesuai dengan kurva katoda. Fenomena ini dikenal sebagai polarisasi katodik yang telah lama diketahui, dapat digambarkan dengan modifikasi kurva katoda. Hubungan antara laju korosi dan ketahanan korosinya dapat dilihat dalam Tabel 4. (Ayu SA et al., 2015).

Data yang diperoleh dari pengukuran ketebalan dan pengamatan visual kerusakan pada plat magnesium. Laju korosi dapat dihitung berdasarkan

penurunan berat yang sebanding dengan waktu ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hubungan laju korosi dan ketahanan korosi

Ketahanan korosi relative	Laju Korosi				
	<i>Mpy</i>	<i>mm/yr</i>	$\mu\text{m/yr}$	<i>nm/hr</i>	<i>Pm/s</i>
Sangat baik	< 1	< 0,02	< 25	< 2	< 1
Baik	1-5	0,02-0,1	25-100	2- 10	1-5
Cukup	5-20	0,1-0,5	100-500	10-50	5-20
Kurang	20-50	0,5-1	500-1000	50-150	20-50
Buruk	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200

Laju penyerangan atau laju korosi adalah kecepatan di mana logam menembus atau mengalami kehilangan berat per unit luas, tergantung pada metode pengukuran yang dipilih, dan diukur dalam satuan mmpy (*millimeter per year*) dan besarnya laju korosi dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{Corrosion rate } (mm/y) = \frac{k \times w}{D \times A \times T} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana,

k = konstanta $8,76 \times 10^4$,

w = massa yang hilang (g) ,

D = massa jenis sampel uji (g/cm^3) = $5,937 \text{ g/cm}^3$,

A = luas permukaan terkorosi (cm^2) ,

T = waktu pengujian (hour)

Untuk dapat mencari nilai kehilangan berat (W) dari pelat magnesium yang telah terkorosi, dengan cara melakukan penimbangan spesimen sehingga diketahui berat awal dan berat akhir atau dinyatakan dengan kehilangan berat. Mencari nilai kehilangan berat dapat menggunakan persamaan berikut ini :

$$\Delta W = W_0 - W_2 \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

ΔW = Kehilangan berat, (g)

W_0 = Berat awal, (g)

W_2 = berat akhir setelah perendaman, (g)

Nilai ketepatan laju korosi (K) dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Nilai Ketepatan Laju Korosi (K)

Corrosion Rate Units Desired	Constanta (K) In Corrosion Rate Equation
Mils per year (mpy)	3.45×10^6
Inches per year; (ipy)	3.45×10^3
Inches per month (ip/m)	2.87×10^2
Millimeters per year (mm/y)	8.76×10^4
Micrometers per year ($\mu\text{m/y}$)	8.76×10^7
Picometers per second (pm)	2.78×10^6

Dengan demikian, kita dapat memproyeksikan laju korosi atau corrosion rate yang mungkin terjadi pada plat magnesium yang sedang digunakan. Jika laju korosi tinggi, plat magnesium tidak akan bertahan lama. Oleh karena itu, diperlukan pengendalian terhadap laju korosi dengan menerapkan perlindungan yang sesuai terhadap jenis korosi yang mempengaruhi plat tersebut. Langkah ini bertujuan untuk memastikan agar plat magnesium yang digunakan dapat mempertahankan keandalannya dalam jangka waktu yang panjang dengan mengurangi atau menghambat laju korosi yang terjadi..

2.5 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Laju Korosi

Beberapa faktor memengaruhi kecepatan korosi dalam sistem larutan elektrolit, termasuk:

2.5.1 Komponen ion larutan dan konsentrasinya

Konsentrasi larutan merujuk pada jumlah zat terlarut dalam satu satuan larutan atau pelarut. Dalam larutan dengan konsentrasi tertentu, komponen larutan akan terdisosiasi menjadi ion-ion (baik kation maupun anion) yang membentuknya. Ion-ion ini memungkinkan larutan untuk menghantarkan muatan listrik yang tersebar di dalamnya. Muatan yang dihasilkan dari suatu larutan elektrolit ini akan mempengaruhi kecepatan

reaksi elektrokimia yang terjadi antara anoda dan katoda. Larutan dengan konduktivitas yang tinggi akan mempercepat reaksi korosi, sehingga meningkatkan laju korosi.

2.5.2. pH

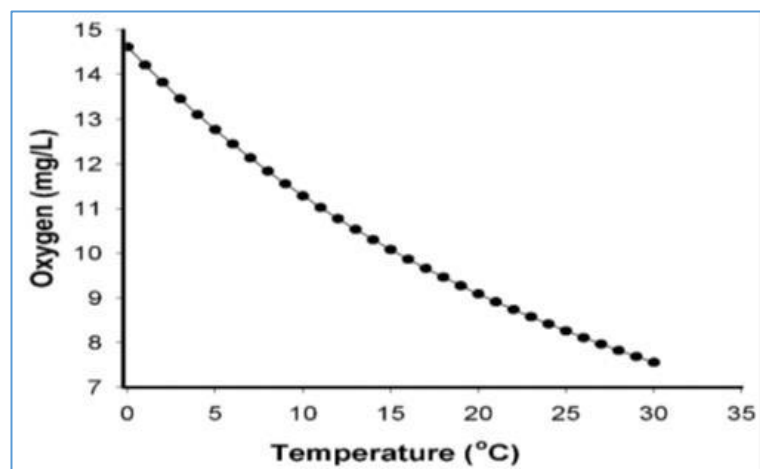
Nilai pH dalam larutan berkaitan dengan jumlah ion H^+ yang terlarut di dalamnya. Sebaliknya, nilai pH berbanding terbalik dengan konsentrasi ion H^+ di dalam larutan. Semakin rendah nilai pH menunjukkan semakin tingginya konsentrasi ion H^+ yang terlarut. Karena adanya peningkatan konsentrasi H^+ , elektron (e^-) yang berasal dari reaksi anodik akan berinteraksi dengan ion H^+ , menyebabkan jumlah ion logam positif yang dilepaskan untuk menyeimbangkan muatan positif berlebih akan semakin tinggi. Hal ini dapat meningkatkan arus batas katodik, sehingga laju pelarutan logam akan semakin tinggi.

2.5.3. Kadar Oksigen

Oksigen terlarut akan meningkatkan reaksi katoda sehingga logam akan semakin teroksidasi (terkorosi).

2.5.4. Temperatur

Peningkatan suhu umumnya meningkatkan laju korosi, meskipun secara faktual kelarutan oksigen akan menurun seiring dengan peningkatan suhu. Jika logam terpapar pada suhu yang tidak seragam, maka terdapat kemungkinan besar untuk terbentuk korosi.



Gambar 1. *Solubility of oxygen in water at different temperatures*

2.5.5. Kecepatan (pergerakan fluida)

Fluida yang mengalir dalam pipa dengan kecepatan di atas ambang kritis dapat menyebabkan potensi terjadinya korosi. Kerusakan pada permukaan logam akibat aliran yang sangat kuat ini disebut sebagai erosi. Proses erosi dapat dipercepat oleh adanya partikel-padatan dalam fluida yang mengalir atau oleh adanya gelembung-gelembung gas. Akibat dari kerusakan pada permukaan logam ini, lapisan film pelindung juga terganggu, sehingga memudahkan terjadinya korosi.

2.6 Pengujian simulasi kondisi cairan

SBF (Simulated Body Fluid) merupakan media pengujian yang paling banyak digunakan untuk menyelidiki sifat material seperti bioaktivitas dan ketahanan korosi dalam media biologis, serta banyak diaplikasikan dalam pelapisan biomimetik implan jaringan keras. Simulated Body Fluid dirancang secara khusus untuk memiliki konsentrasi ion yang mendekati plasma darah manusia. Larutan ini digunakan dalam penelitian biomaterial untuk mensimulasikan lingkungan fisiologis tubuh manusia, terutama dalam pengujian *in-vitro* (laboratorium) guna mengevaluasi kemampuan suatu bahan implan (seperti keramik, logam, atau polimer) dalam membentuk lapisan apatit (hidroksiapatit) pada permukaannya (Yilmaz et al., 2020). Adapun komposisi dari larutan SBF ini adalah sebagai berikut.

Tabel 6. Konsentrasi elektrolit pada larutan SBF(Kokubo & Takadama, 2006)

Ion	mmol/l
Na ⁺	142.0
K ⁺	5.0
Mg ²⁺	1.5
Ca ²⁺	2.5
Cl ⁻	147.8
HCO ₃ ⁻	4.2
HPO ₄ ²⁻	1.0
SO ₄ ²⁻	0.5

Meskipun SBF menawarkan simulasi plasma yang lebih lengkap, dalam konteks pengujian korosi biomaterial, larutan Ringer Laktat sering dipilih sebagai media alternatif. Hal ini terutama karena komposisi larutan hampir sama, berikut komposisi larutan riger laktat.

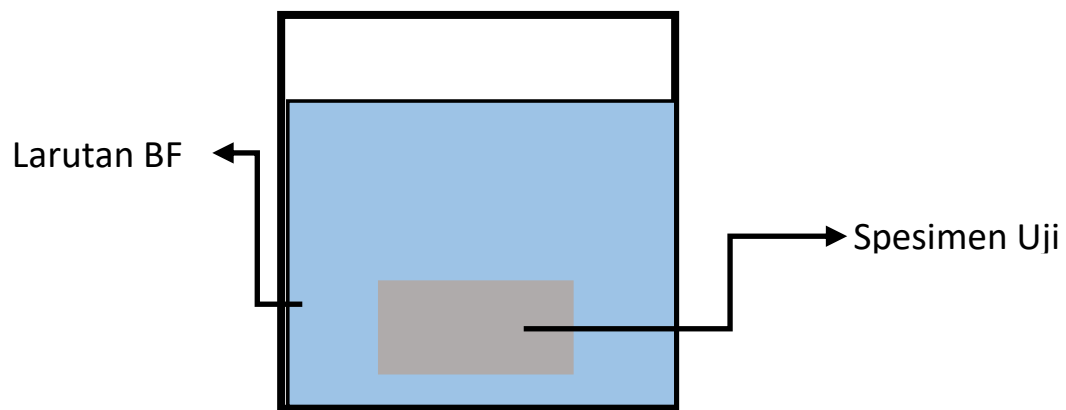
Tabel 7. Komposisi ringer laktat (Ag, 2023)

Daftar Spesifikasi	
<i>Sodium Lactate</i>	1.55 g
<i>Sodium Chloride</i>	3.0 g
<i>Potassium Chloride</i>	0.15 g
<i>Calcium Chloride</i>	0.1 g
<i>Water for injection</i>	500 ml
Osmolaritas	274 mOsm/l
Na ⁺	130.3 mEq/l
Cl ⁻	109.4 mEq/l
K ⁺	4 mEq/l
Ca ⁺⁺	2.7 mEq/l
<i>Lactate</i>	27.7mEq/l

Larutan Ringer Laktat dan Simulated Body Fluid (SBF) memiliki kesamaan sebagai media simulasi cairan tubuh yang dirancang untuk meniru komposisi ionik plasma darah manusia. Kedua larutan ini mengandung elektrolit-elektrolit utama plasma, termasuk natrium, kalium, kalsium, dan klorida dalam konsentrasi yang mendekati nilai fisiologis. Larutan ringer laktat memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah larutan ini memiliki relevansi klinis yang tinggi karena identik dengan cairan infus yang digunakan dalam praktik medis sehari-hari, kandungan ion klorida sebesar 109.4 mmol/l menciptakan lingkungan yang agresif dan realistis untuk menginduksi korosi, ketiadaan ion magnesium dalam *Ringer Laktat* menghasilkan laju korosi yang lebih akurat dan konservatif (Anawati et al., 2021).

Pengujian simulasi bertujuan untuk memonitor proses degradasi pada berbagai area simulasi yang diterapkan pada sampel material uji. Simulasi ini melibatkan variasi metode perendaman material dalam medium larutan. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa setiap pengujian mencerminkan kondisi cairan yang ada di berbagai jenis tulang manusia.

Uji Rendam merupakan proses pengujian di mana sampel uji direndam dalam larutan SBF. Pengujian ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi cairan di sekitar tulang kortikal (tulang spons). Simulasi metode uji rendam statik dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Simulasi metode uji rendam statik

2.7 Fatik

Fatigue adalah kerusakan pada material yang ditimbulkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (ultimate tensile strength) (σ_u) maupun tegangan luluh (yield). Apabila suatu logam diberikan tegangan berulang maka logam tersebut akan patah pada tegangan yang jauh lebih rendah daripada dengan tegangan yang diperlukan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik (Ibrahim, 2021).

Crack atau retak merupakan mekanika kelelahan yang dipakai untuk menganalisis ketika perambatan retak diberikan beban berulang. Perambatan retak inilah yang nantinya digunakan untuk menentukan umur kelelahan sebelum terjadi kegagalan struktur (Xie et al., 2022). Mekanika kelelahan dibagi menjadi beberapa tahap yaitu tahap awal terjadinya retakan (crack initiation), tahap perambatan retak (crack propagation) dan patah (final fracture).

2.7.1. Crack Initiation (retak awal)

Tahap ini merupakan tahap awal retak yang terjadi pada suatu material. Retak ini timbul karena adanya cacat pada saat fabrikasi atau dapat juga terjadi karena adanya pembebanan secara terus-menerus pada suatu material.

2.7.2. Crack propagation (Perambatan retak)

Tahap ini material mengalami perambatan retak setelah retak awal terjadi karena pembebanan berulang yang bekerja pada material. Perambatan retak ditentukan oleh dua parameter fracture fatigue, yaitu ΔK dan K_{max} (Ronchei et al., 2022). Perambatan retak berbanding lurus dengan jumlah pembebanan. Saat pembebanan normal, perambatan retak terjadi sangat lambat. Dari perhitungan perambatan retak ini dapat diketahui suatu prediksi umur lelah struktur (fatigue life).

2.7.3. Final Fracture

Tahap ini merupakan tahap paling akhir yang terjadi pada suatu material. Pada struktur terjadi kerusakan yang mengakibatkan kegagalan. Pada tahap ini, perambatan retak terjadi sangat cepat. Retak yang terjadi adalah brittle fracture (cleavage), ductile fracture (rupture) atau gabungan dari keduanya.

Fatigue terdapat dua siklus yang membedakan, yaitu Low Cycle Fatigue (LCF) dan High Cycle Fatigue (HCF). Berikut merupakan pengertian kedua siklus tersebut. Low Cycle Fatigue (LCF) yaitu fatik dengan siklus rendah. Pada low cycle fatigue memiliki nilai jumlah siklus dibawah $\leq 10^3 = 1000$ siklus dalam kondisi plastis. Sebagai contoh aplikasi fatik siklus rendah ini adalah stud pada roda truk, grendel pada laci kecil dekat stir mobil dan masih banyak lagi. High Cycle Fatigue (HCF) yaitu fatik dengan siklus tinggi. pada high cycle fatigue memiliki nilai jumlah siklus antara 10^4 sampai 10^7 dan di luar kondisi elastis. Sebagai contoh aplikasi high cycle fatigue adalah panel badan pesawat, engsel pintu kendaraan dan pemukul softball aluminium.

2.8 Perambatan Retak

Perambatan retak merupakan tahapan kedua dari ketiga tahapan proses kerusakan/kegagalan. Pada tahapan ini, retak tumbuh serta merambat sampai mencapai batas kritis (*critical size*). Dari data mengenai perambatan retak suatu perkiraan usia fatik (*fatigue life*) mampu dikembangkan (Cecchel et al., 2022). Merujuk konsep fracture mechanics, laju dari pertumbuhan retak dijelaskan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat bahan, tegangan operasi dan panjang retak (Masoudi Nejad & Berto, 2021). Melalui persamaan Paris-Erdogan dapat diinterpretasikan bahwa laju perambatan retak sebagai berikut.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \dots\dots\dots (3)$$

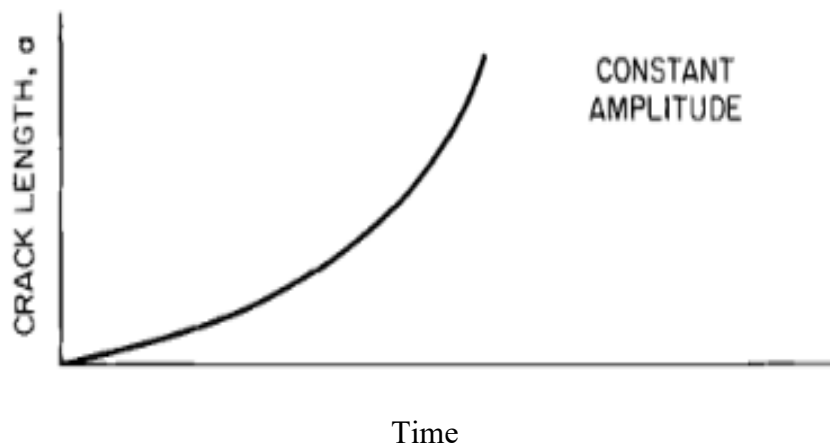
Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

C = Konstanta bahan

m = Nilai eksponensial

Laju dari perambatan retak adalah kegunaan dari faktor pada intensitas tegangan. Retak mulanya berawal dari bidang sangat rapuh, selanjutnya berkembang bersamaan dengan berjalannya siklus pembebanan. Pada suatu percobaan lazimnya perambatan retak mampu diukur dengan visual menggunakan teleskop serta dapat diukur menggunakan alat ultrasonik. Pertumbuhan retak merupakan suatu perubahan panjang retak terhadap siklus. Jika, disaat panjang retak a di plot dengan siklus N , maka dapat ditunjukkan pada gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3 Kurva pertambahan retak fatik

Dengan asumsi bahwasanya panjang retak a pada suatu panjang konstan dan serta hanya tegangan yang bervariasi. Hal tersebut ditunjukkan untuk suatu kalibrasi K sederhana.

$$K = S\sqrt{a} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana :

- K = Faktor intensitas tegangan
- S = Tegangan (MPa)
- a = Panjang retak (mm)

$$\Delta K = \Delta S\sqrt{a} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana :

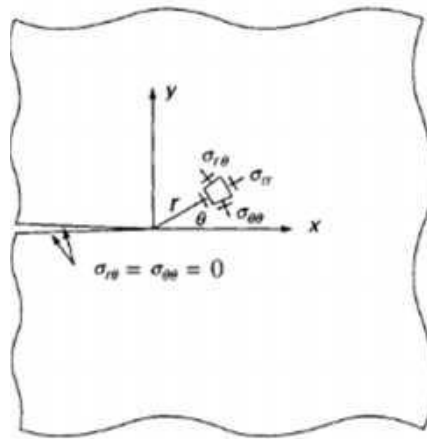
- ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan
- ΔS = Selisih tegangan (MPa)
- a = Panjang retak (mm)

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{A}\sqrt{a} \dots \dots \dots (6)$$

Dimana :

- ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan
- ΔP = Range beban (MPa)
- A = Penampang (mm^2)
- a = Panjang retak (mm)

Guna memprediksi usia fatik dalam suatu bagian yang mempunyai cacat ataupun ketidak-sempurnaan maka didalam konsep mekanika retakan (fracture mechanics) dikembangkan serta dipakai secara luas baik secara eksperimen, numeric dan analitis. Faktor Intensitas Tegangan pada Linear Elastic fracture mechanics (LEFM), umur atau ketangguhan yang merupakan komponen dari pertumbuhan retak dispesifikan melalui suatu parameter yang dikatakan dengan stress intensity factor, KI. Nilai K mengemukakan suatu ukuran dari besaran medan konsentrasi tegangan diarea sekitar ujung retak. Anggap jika suatu struktur yang mempunyai retak dikenai tegangan tarik yang tegak lurus didaerah retak. Seperti yang ada digambar 4 tegangan yang terjadi diujung retak sebagai berikut.



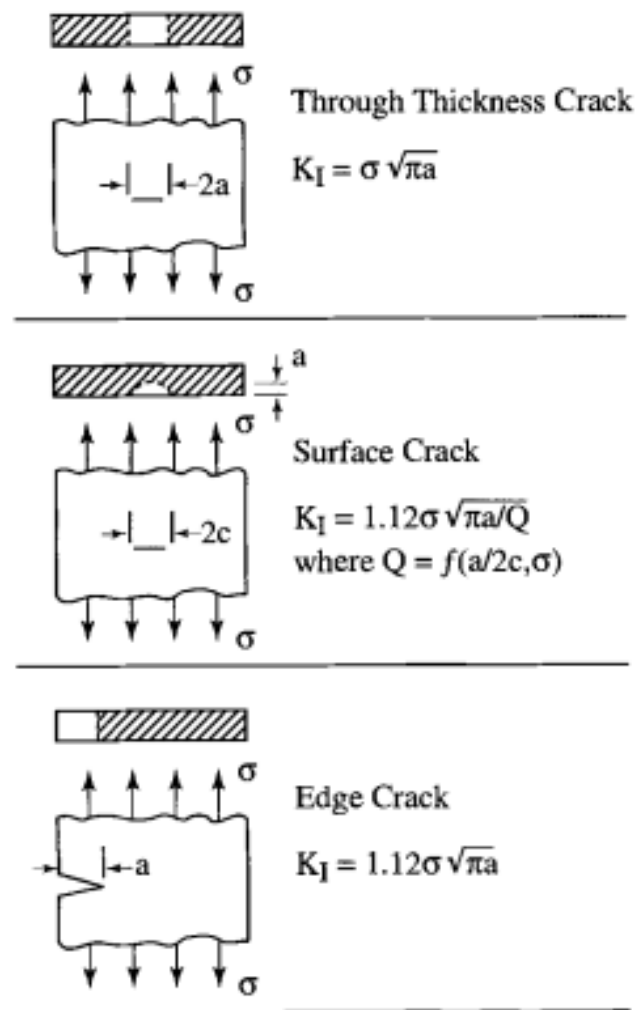
Gambar 4 Komponen tegangan

$$\sigma_x = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \dots \dots \dots (7)$$

$$\sigma_y = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \dots \dots \dots (8)$$

$$\tau_{xy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \dots \dots \dots (9)$$

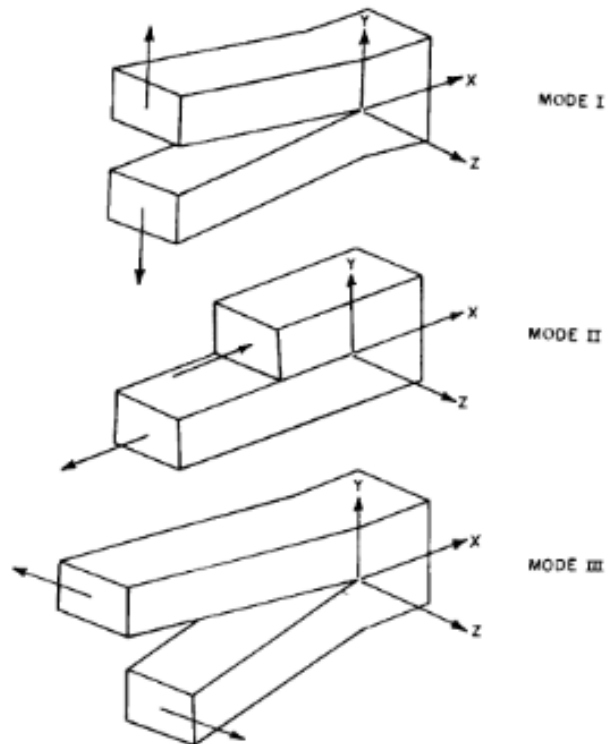
Faktor stress intensity adalah KI yang merupakan kegunaan dari panjang retak serta tegangan. Akan tetapi memiliki macam-macam variasi terhadap jenis-jenis retak serta beban pada seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Nilai K_I untuk macam geometri retak

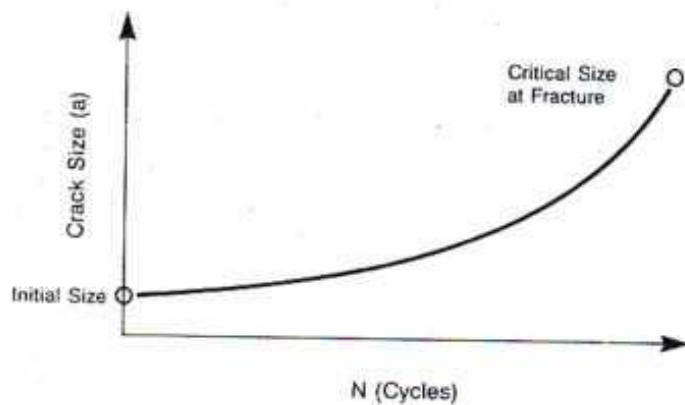
Fracture Toughness nilai ketangguhan material merupakan sifat ketangguhan bahan didalam menahan laju retakan. Sifat material pada suatu keadaan statis yang dapat dinyatakan sebagai ultimate strength atau yield strength. Gambaran terpenting dalam memperkirakan laju retak yang memiliki kaitan untuk perkiraan usia fatik, nilai K_{IC} memiliki tujuan melakukan evaluasi dari ketahanan retak dengan menggunakan cara melakukan perbandingan nilai K_I serta nilai K_{IC} . Dimana nilai K_I berada jauh dari K_{IC} maka dapat dinyatakan bahwa suatu konstruksi masih dapat dikatakan aman. Namun, jika terjadi sebaliknya saat nilai K_I mendekati nilai K_{IC} maka dapat dinyatakan suatu konstruksi akan mengalami patah/gagal. Terdapat tiga modus pergeseran

permukaan patah yaitu modulus I (tarikan), modulus II (geseran) dan modulus III sebagai robekan seperti ditampilkan pada Gambar 6 sebagai berikut.

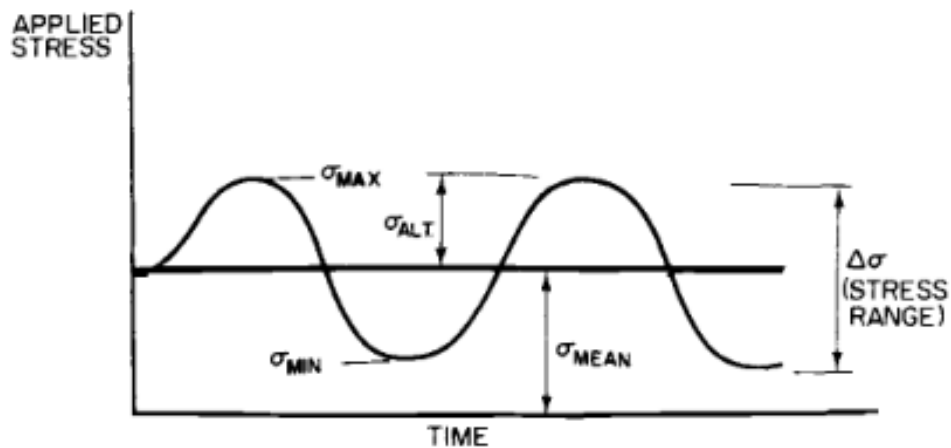


Gambar 6 Modulus pergeseran permukaan retak

Fatigue Crack Growth untuk bisa memprediksi laju pertumbuhan retak maka dibutuhkan data laju pertumbuhan retak dari bahan yang diuji secara fatik, seperti yang ditampilkan pada Gambar 7 dan 8 sebagai berikut.



Gambar 7 Skematik laju pertumbuhan retak



Gambar 8 Beban fatik pada perambatan retak

Patah terjadi disaat panjang retak yang kritis dimana bahan tidak mampu dan tidak dapat lagi menahan beban yang didapatkan. Patah dapat terjadi saat nilai ketangguhan retak (fracture toughness) K_{Ic} material tercapai. berarti nilai $K_I = K_{Ic}$,

Metode yang akan digunakan pada penelitian ini ialah Incremental Polynomial Method. Metode ini dipakai guna menghitung da/dN dengan pendekatan polinomial. Perhitungan perambatan retak yaitu pada retak sisi tunggal spesimen uji fatik yang berada pada tepi takik. Untuk menghitung intensitas tegangan yang sesuai dengan tingkat pertumbuhan retak sisi tunggal menghitung ΔK sebagai berikut.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} (0,866 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \dots (10)$$

Dimana :

ΔK = Faktor intensitas tegangan

ΔP = Perubahan beban (kN)

B = Tebal (mm)

w = Lebar (mm)

α = a_r/W

LT01 dan LT02 mewakili dua spesimen FCG pada arah LT, dan dua lainnya pada arah TL, ditetapkan sebagai TL01 dan TL02. Panjang retak fatik (a_n), seperti yang ditunjukkan pada gambar. 1b, adalah 8.00 mm. Spesimen dibebani dengan rentang beban konstan (ΔP_p) = 5.520 kN pada tegangan (R) = 0.1 dengan menggunakan gelombang sinusoidal pada frekuensi (f) 10 Hz. Pembebanan pra-kelelahan dihentikan setelah total panjang pra-retak (a_p) mencapai 9.20 mm. Selanjutnya, Pengujian FCG dilanjutkan di bawah beban konstan (ΔP_{FCG}) sebesar 6.957 kN at $R = 0.1$ dan $f = 10$ Hz sampai spesimen mencapai titik gagal. Untuk mengukur bukaan retak (CMOD), menggunakan alat ukur perambatan retak (COD) dengan panjang alat ukur 8.00 mm. Perhitungan panjang retak (a) untuk spesimen CT dilakukan dengan menggunakan metode method, seperti yang diuraikan dalam persamaan (11) dibawah ini:

$$a = W(1.000 - 4.500U + 13.157U^2 - 172.551U^3 + 879.9441514.671U^5) \dots (11)$$

Selain itu, nilai U dihitung dengan menggunakan persamaan. (12):

$$U = \frac{1}{[1+(ECB)^{1/2}]} \dots \dots \dots (12)$$

Dimana C adalah $v/load$, v adalah CMOD diantara titik pengukuran. W dan B dimensi spesimen untuk lebar 6,04 mm dan ketebalan 4,20 mm pada gambar. 1b, dan E adalah modulus elastisitas. Panjang retak (a) hitung dengan penambahan 2000 siklus . jumlah siklus (N) diplot terhadap panjang retak (a), dan Secant method digunakan untuk menghitung laju pertambahan retak (da/dN , mm/siklus) . Yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$(da/dN)_{\bar{a}} = (a_{i+1} - a_i)/(N_{i+1} - N_i) \dots \dots \dots (13)$$

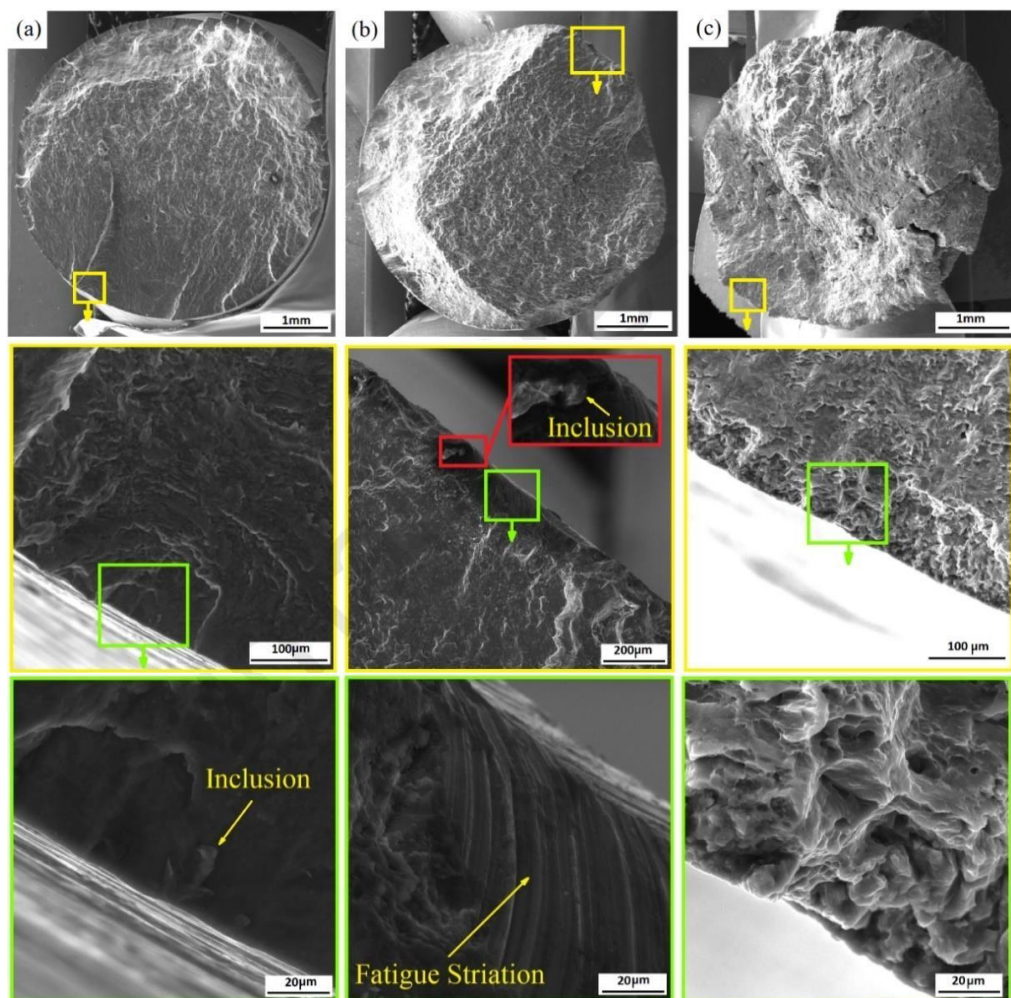
Perhitungan da/dN dengan dasar laju rata-rata ($a_{i+1} - a_i$) dan panjang retak rata-rata, $\bar{a} = \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)$, digunakan untuk menghitung ΔK menggunakan persamaan. (14):

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.6\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \dots \dots (14)$$

Di mana $\alpha = \bar{a}/W$. da/dN dan ΔK dibuat dengan double log x-y axes. FCG terdiri dari nilai C dan m pada saat pemuaian stabil ditentukan dengan menggunakan teknik linear fitting regression.

2.9 Observasi Scanning Electron Microscope (SEM)

Observasi Scanning Electron Microscope atau SEM memiliki tujuan untuk mengetahui gambar hasil perlakuan maupun pengujian atau foto struktur yang telah dilakukan sejumlah tahapan pengujian dan dilihat menggunakan mikroskop sesuai dengan pembesaran yang diperlukan. Umumnya mikroskop yang digunakan memiliki pembesaran hingga 1000 kali (Clemens et al., 2017). Hasil dari observasi bergantung pada proses atau tahapan optimisasi seperti: preparasi sampel, pengaturan parameter *spot intensity*, *aperture*, *contrast*, *brightness*, *capturing time* dan *image processing* (Jabbari et al., 2020).



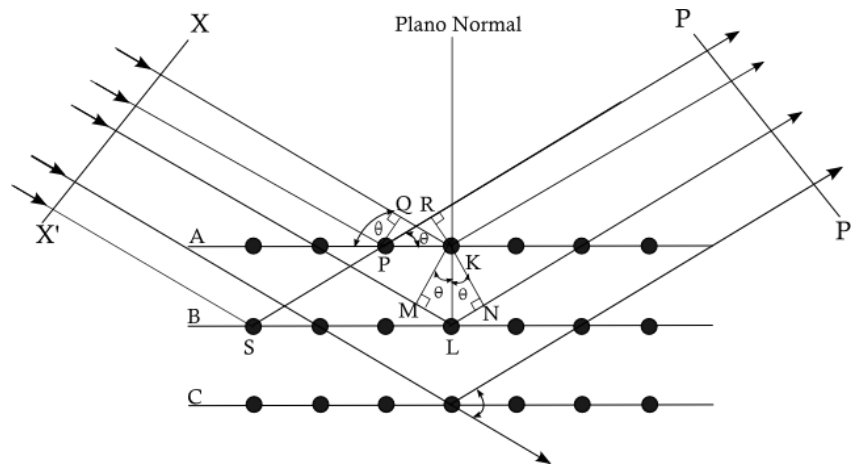
Gambar 9. Daerah permukaan patah (fracture) pada sampel uji fatik: a) temperatur ruang, b) 100 °C, and c) 200 °C (Jabbari, et al., 2020).

2.10 XRD

XRD merupakan suatu teknik karakterisasi nonkontak dan nondestruktif yang sangat presisi untuk mengidentifikasi fasa kristalin yang terdapat dalam suatu material. XRD juga dapat digunakan untuk menginvestigasi sifat struktural dari suatu material seperti *strain state*, ukuran kristalit, komposisi fasa, orientasi, dan struktur defek. XRD memberikan akurasi yang tidak tertandingi untuk mengukur *spacing* atom dan puncak hasil XRD dapat dipakai untuk analisa kuantitatif yang akurat akan suatu susunan atom material. Sinar X adalah bentuk dari radiasi gelombang elektromagnetik, dihasilkan dari benda yang ditumbuk oleh elektron. Panjang gelombang sinar X dari 10-10 sampai 10-8 m, dan hanya 0.3-2.5 Angstrom yang digunakan untuk difraksi sinar X. Sinar X memiliki daya penetrasi yang besar sehingga sinar X dapat dipakai untuk mengetahui periodisitas kristal. Apabila sebuah gelombang sinar X ditembakkan pada material kristalin, maka fenomena yang dapat teramati adalah difraksi dari sinar X dengan sudut bervariasi tergantung pada gelombang pertama. Hukum yang digunakan pada difraksi sinar X adalah hukum Bragg, yaitu :

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (15)$$

Fenomena yang teramati oleh hukum Bragg ditunjukkan pada gambar 2.5. Secara eksperimen hukum Bragg dapat diamati melalui dua cara. Metoda dengan menggunakan sinar X dengan panjang gelombang (λ) tertentu dan mengukur θ , sehingga kita dapat menentukan lebar d dari beberapa bidang kristal, metoda ini disebut dengan analisa struktur. Metoda yang lain adalah menggunakan kristal dengan lebar (d) bidang diketahui, lalu mengukur θ , sehingga dapat menentukan panjang gelombang (λ) dari radiasi yang digunakan, metoda tersebut dinamakan *X- ray spectroscopy*.



Gambar 10. Difraksi sinar X pada kristal (Cong et al., 2004)

Pola sinar X dari bahan-bahan kristalin dapat disebut sebagai sidik jari (*finger print*), setiap material (secara terbatas) memiliki pola difraksi yang unik. Dengan menggunakan metoda difraksi serbuk, parameter yang diukur adalah lebar dari kisi- kisi mineral untuk menentukan struktur mineral tersebut.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan kurang lebih 10 bulan dimulai dari bulan April 2025 sampai Januari 2026 seperti pada jadwal penelitian pada Tabel 6 yaitu,

Tabel 8. Rencana Jadwal Penelitian

[illegible]

Adapun tempat penelitian akan dilakukan dalam pengujian ini yaitu,

1. Proses mempersiapkan alat dan bahan, fabrikasi magnesium AZ31B dilakukan di SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo, Lampung Tengah.
2. Proses fabrikasi *chamber* dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung.
3. Proses pengambilan data analisis uji korosi, dan uji tarik dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung.
4. Proses pengambilan data analisis SEM-EDS dilakukan di Laboratorium Mineral BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan bahan penelitian

Adapun alat dan bahan beserta spesifikasinya yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Magnesium AZ31B

Bahan penelitian pada pengujian ini menggunakan material magnesium AZ31B dengan ketebalan 3 mm. Material magnesium AZ31B yang didapatkan dari pasaran dapat dilihat pada Gambar 11 sebagai berikut.



Gambar 11. Material magnesium AZ31B

Tabel 9. Spesifikasi Mg AZ31B

Lot Number	Mechanical properties			Component %						
	Tensile strength	YTS (0,2 Mpa)	Elongation %	Si	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Ni
	235	125	8	MAX 0,08	MAX 0,003	MAX 0,01	0,20 1,0	2,5 3,5	0,60 1,4	MAX 0,001
23092812	255	135	9,4	0,046	0,0019	0,0062	0,69	3,1	0,89	0,00069

2. *Body fluid* (BF)

Body Fluid digunakan sebagai medium larutan untuk menguji laju korosi yang terjadi terhadap pengujian. *body fluid* dapat dilihat pada gambar 12 sebagai berikut.

Gambar 12. *Ringer laktat*Tabel 10. Spesifikasi kandungan *Ringer Laktat* Setiap 500ml

Daftar Spesifikasi	
<i>Sodium Lactate</i>	1.55 g
<i>Sodium Chloride</i>	3.0 g
<i>Potassium Chloride</i>	0.15 g
<i>Calcium Chloride</i>	0.1 g
<i>Water for injection</i>	500 ml
Osmolaritas	274 mOsm/l
Na ⁺	130.3 mEq/l
Cl ⁻	109.4 mEq/l
K ⁺	4 mEq/l
Ca ⁺⁺	2.7 mEq/l
<i>Lactate</i>	27.7mEq/l

3. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk mengetahui *weight loss* yang terjadi selama pengujian berlangsung. Timbangan digital dapat dilihat pada gambar 13 sebagai berikut.



Gambar 13. Timbangan digital

Tabel 11. Spesifikasi timbangan digital.

Daftar Spesifikasi	
Merk	ADAM-PW354
Ketelitian	0,0001 gr
Kapasitas Maksimal	250 gr

4. Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi spesimen spesimen uji fatik maupun spesimen uji korosi. Jangka sorong dapat dilihat pada gambar 14 sebagai berikut.



Gambar 14. Jangka sorong

Tabel 12. Spesifikasi jangka sorong

Daftar Spesifikasi	
Merk	Mitutoyo
Ketelitian	0,001mm / 0,0005 in
Range	0 - 150 mm / 0 - 6 in
Akurasi	0,02 mm / 0,001 in
Berat	800 gr

5. *Hydraulic servopulser* Mesin *Landmark* MTS 100 kN

Mesin *Landmark* MTS 100 kN digunakan untuk uji tarik pada spesimen yang telah dibentuk sesuai standar. *Hydraulic servopulser* Mesin *Landmark* MTS 100 kN dapat dilihat pada Gambar 15 sebagai berikut.



Gambar 15. *Hydraulic servopulser* mesin *landmark* MTS 100 kN.

Tabel 13. Spesifikasi Hydraulic servopulser mesin landmark MTS 100 kN

Daftar Spesifikasi	
Merk	MTS Landmark
Tipe	U PD 10
Kapasitas	100 kN
Tahun	2015
Skala Pengukuran Pembebanan	
A	0-20 kN
A+B	0-50 kN
A+B+C	0-100 kN

6. Ultrasonic Cleaner

Ultrasonic Cleaner adalah alat pembersih material sebelum dilakukan proses pengujian. Cara kerjanya menggunakan gelombang ultrasonic dengan menggunakan cairan pembersih khusus.

Gambar 16. *Ultrasonic Cleaner*

Tabel 14. Spesifikasi Ultrasonic Cleaner

Daftar Spesifikasi	
Merk	GT SONIC
Model	MH-020S
Power supply	200-240 Volt, 50 Hz
Ultrasonic Frekuensi	40 KHz
Ultrasonic Power	120 W
Heating Power	100 W

3.3 Pelaksanaan Penelitian

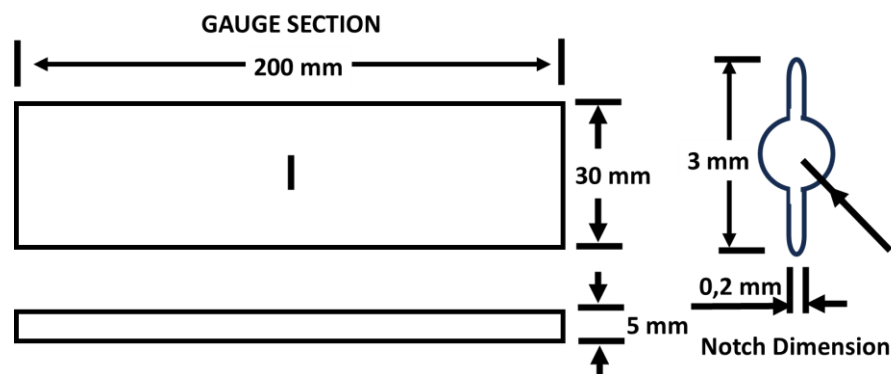
Pada pelaksanaan penelitian memiliki prosedur untuk pengujian adapun prosedur yang akan dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan spesimen uji

Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu magnesium AZ31B dalam bentuk plat.

2. Pembuatan spesimen uji fatik

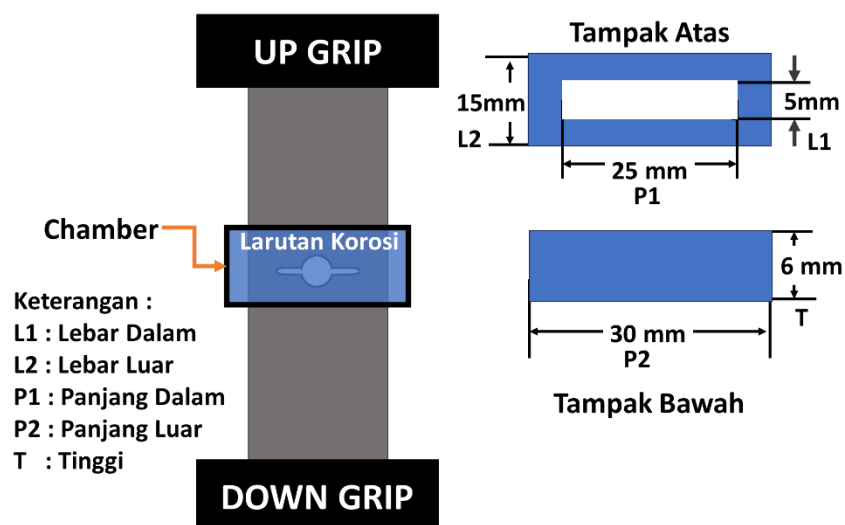
Spesimen uji perambatan retak fatik yang akan digunakan dalam penelitian ini menggunakan standar ASTM E647.



Gambar 17. Spesimen fatik ASTM E647 middle tension

3. Pembuatan *chamber* pengujian retak fatik korosi

Chamber ini digunakan untuk merendam daerah *notch* pada spesimen uji fatik magnesium AZ31B, spesifikasi *Chamber* sebagai berikut,



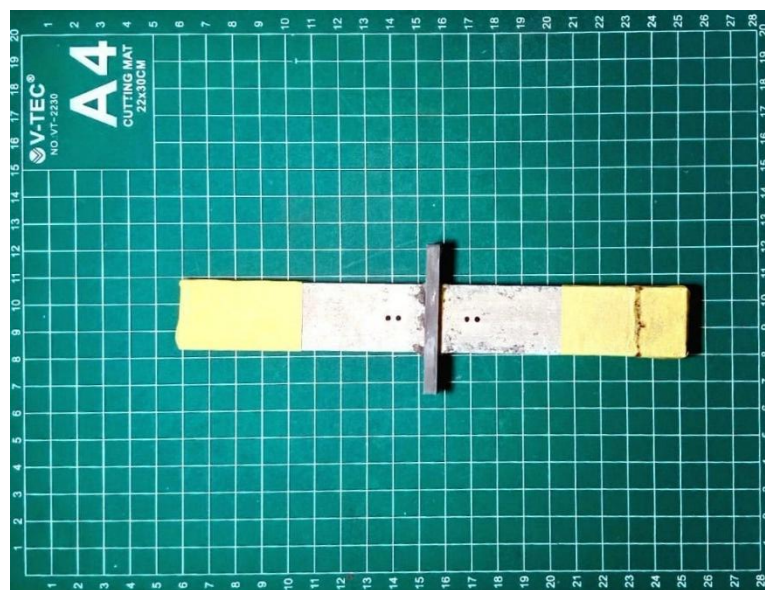
Gambar 18. Spesimen dengan Chamber

3.4 Pelaksanaan pengujian

Adapun pelaksanaan pengujian yang akan dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Pengujian fatik

Pengujian fatik menggunakan standar pengujian ASTM E647 dengan diberikan *chamber* bagian *notch* untuk dapat diberikan larutan body fluid ringer laktat pada poses pengkorosian selama 7 hari dan 14 hari. Berikut merupakan spesimen uji fatik dengan *chamber* untuk korosi.

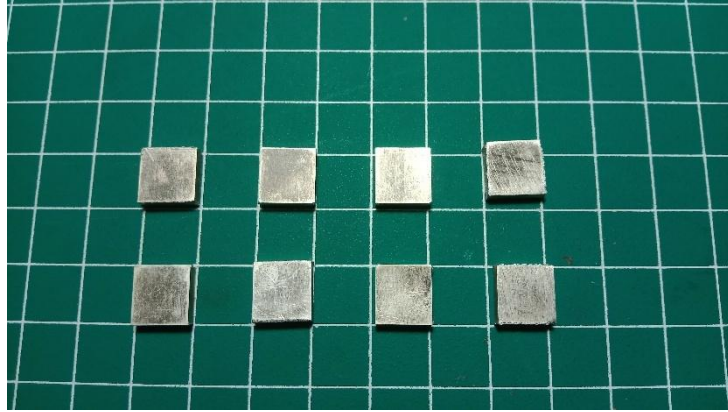


Gambar 19. Spesimen uji fatik ASTM E647 dengan *chamber*

2. Persiapan spesimen uji laju korosi

Spesimen yang digunakan pada penelitian ini adalah magnesium AZ31B tahapan persiapan spesimen akan dijelaskan pada prosedur berikut:

- a. Pemotongan material, material magnesium yang digunakan untuk pengujian pada penelitian ini berbentuk plat dan terlebih dahulu dipotong menjadi persegi dengan ukuran panjang 10 mm, lebar 10 mm, dan tebal 3,19 mm.
- b. Setelah itu spesimen yang telah terbentuk dengan ukuran panjang 10 mm, lebar 10 mm, dan tebal 3,19 mm untuk kemudian diberikan angka pada setiap spesimen pengujian sebelum dilaksanakan uji laju korosi.



Gambar 20. Spesimen uji korosi

3. Uji laju korosi

Larutan yang dipakai untuk media korosi yaitu larutan *body fluid* (BF) yang mana sering digunakan pada cairan infuse konvensional. Dalam pengujian rendam (*immersion test*) skala laboratorium, Berdasarkan ASTM G31, jumlah volume larutan untuk perendaman minimal adalah:

$$\text{Volume larutan} = (0.2 \text{ s/d } 0.4) \times \text{luas permukaan} \dots \dots \dots (16)$$

Oleh karena itu, sebelumnya harus diketahui terlebih dahulu luas permukaan spesimen yang akan diuji dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Luas permukaan} = (2W \times T) + (2L \times T) + (2W \times L) \dots \dots \dots (17)$$

Keterangan:

L = Panjang spesimen (mm)

W = Lebar spesimen (mm)

T = Tebal spesimen (mm)

Setelah didapatkan hasil dari perhitungan tersebut maka sebelum menuangkan larutan ke SBF tank adalah menuangkan larutan SBF kedalam gelas ukur untuk mengukur banyaknya larutan yang akan digunakan sesuai standar sebagai medium pengujian korosi. Penuangan Larutan SBF kedalam gelas ukur 100 ml dapat dilihat pada Gambar 21 sebagai berikut.



Gambar 21. Penuangan larutan *ringer laktat* kedalam gelas ukur 100ml

4. Uji Rendam

Immesrion test atau uji rendam material dilakukan dengan merendam material di dalam larutan *ringer laktat* dengan parameter waktu selama 1 minggu sampai 4 minggu. Proses yang perlu dilakukan antara lain:

1. Siapkan alat dan bahan yang akan dibutuhkan.
2. Bersihkan sampel dengan *Ultrasonic Cleaner*.
3. Timbang material baku yang akan digunakan.
4. Tuangkan larutan *ringer laktat* yang telah ditakar akan kedalam wadah uji rendam.
5. Setelah semua siap, masukan material yang kedalam wadah pengujian.
Hasil pengujian uji rendam dapat dilihat pada Gambar 22 sebagai berikut.
6. Tunggu sesuai dengan variasi parameter yang telah ditentukan.
7. Setelah dilakukan proses pengujian, spesimen uji dapat diambil dari larutan kemudian dibersihkan.
8. Setelah spesimen dibersihkan, maka keringkan spesimen tersebut agar air yang ada dapat hilang.
9. Jika sudah kering, spesimen dapat ditimbang untuk mengetahui berat akhir spesimen setelah dilakukan pengujian korosi.



Gambar 22. Perendaman spesimen

5. Penimbangan berat usai uji

Setelah membersihkan dan mengeringkan spesimen, berat spesimen diukur untuk mengetahui berapa berat yang hilang selama proses pengujian korosi. Penimbangan dilakukan dengan menggunakan timbangan digital.

6. Analisa berat

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil dari dua jenis penimbangan yang telah dilakukan. Jenis penimbangan yang dimaksud mencakup penimbangan sebelum uji korosi dimulai dan penimbangan setelah proses uji korosi selesai. Analisis tersebut bertujuan untuk membandingkan apakah berat spesimen mengalami penurunan, tetap stabil, atau meningkat karena faktor-faktor tertentu. Jika berat spesimen mengalami penurunan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan laju korosi. Namun, jika tidak terjadi perubahan berat atau bahkan terjadi peningkatan, disarankan untuk melakukan penimbangan ulang jika ada kecurigaan dalam proses penimbangan, atau mempertimbangkan ulang untuk melakukan uji korosi jika diperlukan.

7. Perhitungan laju korosi

Setelah spesimen direndam dalam larutan dan dibersihkan, hasil uji dapat diambil dengan menimbang berat akhir spesimen. Selanjutnya, laju korosi dapat dihitung menggunakan metode kehilangan berat atau weight loss. Rumus perhitungan laju korosi dengan metode kehilangan berat sesuai dengan ASTM G31 adalah:

$$\text{Laju Korosi} = \frac{K \times W}{D \times A \times T} \dots\dots\dots(19)$$

Keterangan:

Laju Korosi (mm/y)

K = Konstanta laju korosi ($8,76 \times 10^4$)

W = Massa yang hilang (g)

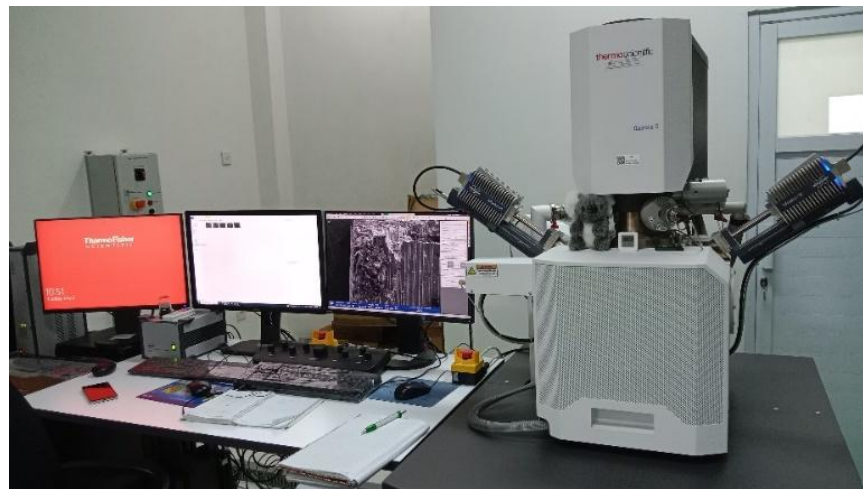
D = Luas permukaan spesimen (cm^2)

A = Waktu perendaman (jam)

T = Densitas spesimen (g/cm^3)

8. Pengamatan SEM-EDS

Pengujian mikrostruktur dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) di BRIN. SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan detail mikrostruktur spesimen dengan perbesaran tinggi.



Gambar 23. *Scanning Electron Microscope*

Tabel 1. Spesifikasi alat uji SEM-EDS

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

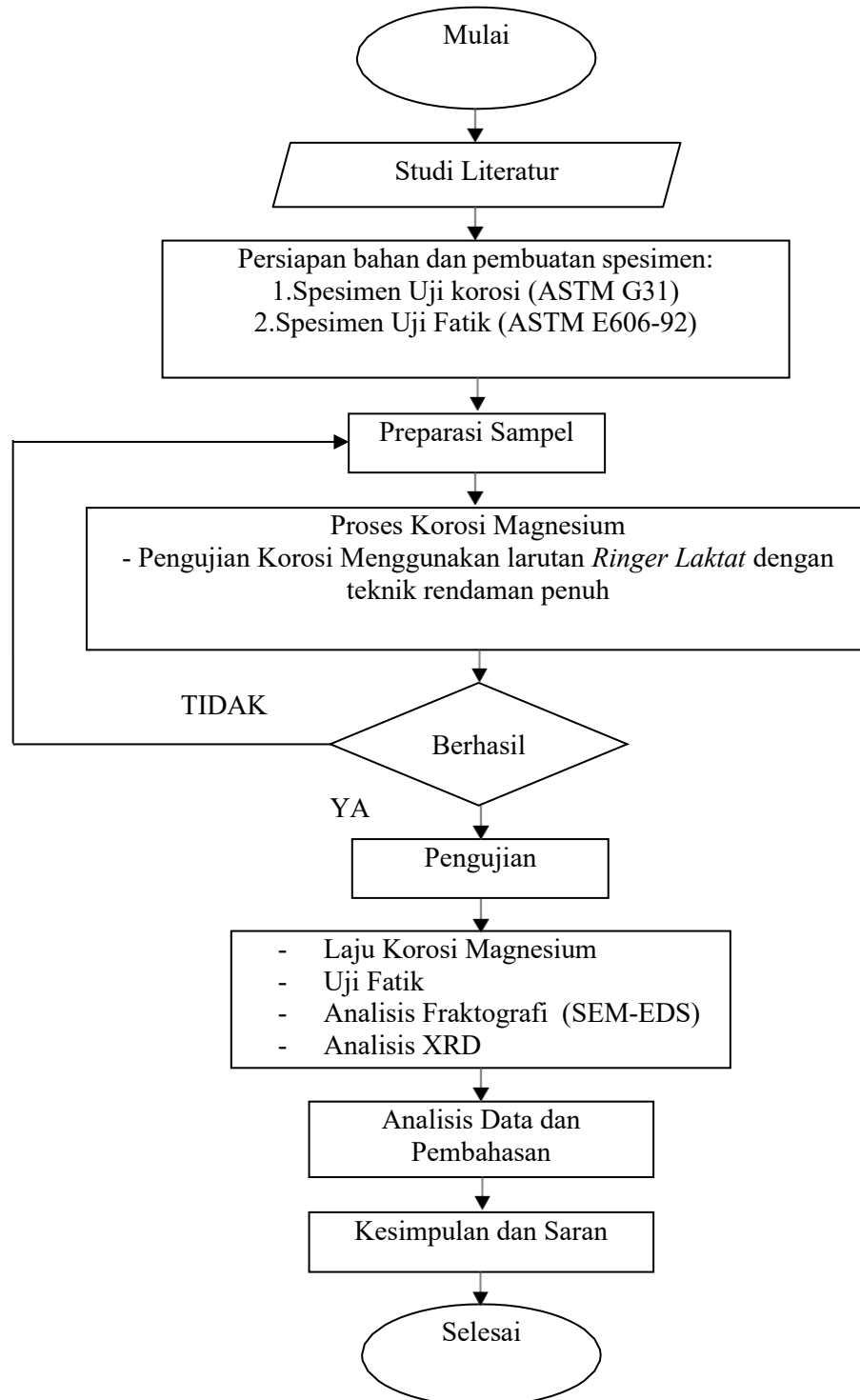
9. Uji XRD

Pengujian XRD dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). XRD digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal dan menentukan parameter kisi material. Adapun tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan sampel uji permukaan datar dengan ukuran 1,9x1,4 cm.
- b. Memasang sampel pada *sample holder* XRD, memastikan permukaan rata dan posisi terpasang stabil. Untuk sampel serbuk, gunakan kaca *holder* dengan perekat tipis atau *back loading* agar permukaan rata.
- c. Memasukkan *sample holder* ke dalam ruang pengukuran XRD dan menutup pelindung radiasi sesuai prosedur keselamatan.
- d. Mengatur parameter pengujian pada perangkat lunak, meliputi: Rentang sudut 2θ (misalnya 20° – 120°), kecepatan pemindaian (*scan speed*), tegangan dan arus sumber sinar-X (misalnya 40 kV, 30 mA), target anoda (misalnya Cu K α , $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$).
- e. Menjalankan proses pemindaian XRD hingga pola difraksi terbentuk.
- f. Menyimpan hasil berupa pola difraksi (*diffraction pattern*) untuk dianalisis lebih lanjut.
- g. Melakukan analisis fasa kristal menggunakan perangkat lunak basis data seperti *profex* untuk mencocokkan puncak difraksi dengan fasa yang ada.
- h. Mendokumentasikan hasil pengujian, termasuk grafik pola difraksi, tabel puncak 2θ , intensitas relatif, serta identifikasi fasa.

3.5 Diagram alir

Diagram alir penelitian merupakan alur penelitian yang dilakukan dari awal sampai akhir penelitian, diagram alir penelitian yaitu sebagai berikut,



V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Magnesium AZ31B mengalami degradasi yang semakin intensif seiring bertambahnya waktu paparan dalam larutan Ringer Laktat. Degradasi ditandai dengan terbentuknya produk korosi dan pitting corrosion yang merusak lapisan protektif permukaan, meningkatkan konsentrasi tegangan lokal, serta mempercepat inisiasi retak pada material.
2. Waktu paparan korosi terbukti menurunkan ketahanan fatik magnesium AZ31B. Raw material menunjukkan umur fatik tertinggi dengan 76.000 siklus, sedangkan spesimen korosi 1 minggu dan 2 minggu mengalami penurunan umur fatik menjadi 62.412 dan 42.000 siklus. Penurunan ini terjadi karena korosi bertindak sebagai retak awal yang mempercepat fase propagasi retak.
3. Umur pakai implan magnesium AZ31B sangat dipengaruhi oleh tingkat korosi dan parameter Paris law, khususnya eksponen Paris (m). Peningkatan nilai m akibat korosi menyebabkan laju perambatan retak menjadi sangat sensitif terhadap kenaikan ΔK , sehingga kegagalan fatik terjadi lebih cepat meskipun nilai konstanta Paris (C) lebih kecil.

5.2 Saran

Adapun saran untuk dari penelitian ini yaitu sebagai berikut,

1. Penyesuaian dengan melakukan analisis *fatigue* pada rentang waktu yang lebih panjang dari 21 sampai 28 hari untuk melihat perubahan perilaku retak dan laju degradasi pada fase *steady-state*.

2. Selanjutnya sebaiknya dilakukan pengujian *in-vitro*, menggunakan medium *culture cell*, untuk melihat interaksi material dengan lingkungan biologis yang dinamis dan respons jaringan.
3. Melakukan pengendalian laju degradasi melalui perlakuan panas (*heat treatment*) dan aliran dinamis untuk mencapai laju korosi yang sesuai dengan proses penyembuhan tulang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ag, B. B. M. (2023). *Ringer Lactate*. 8–9.
- Anawati, A., Fitriana, M. F., & Gumelar, M. D. (2021). Improved corrosion resistance of magnesium alloy az31 in ringer lactate by bilayer anodic film/beeswax–colophony. *Coatings*, 11(5).
<https://doi.org/10.3390/coatings11050564>
- Ashadi, H. W., & Gusniani, I. (2002). *PENGARUH UNSUR-UNSUR KIMIA KOROSIF TERHADAP LAJU KOROSI TULANGAN BETON : II. DI DALAM LUMPUR RAWA*.
- ASTM. (2003). ASTM - E1290 Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture. *Astm*, 03(March), 1–13.
- Ayu SA, G. A., Rahmayanti, D., Nindy Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung Jl Sumantri Brojonegoro No, dan E., & Lampung, B. (2015). *Perhitungan Laju Korosi di dalam Larutan Air Laut dan Air Garam 3% pada Paku dan Besi ASTM A36*.
- Cecchel, S., Razavi, N., Mega, F., Cornacchia, G., Avanzini, A., Battini, D., & Berto, F. (2022). Fatigue testing and end of life investigation of a topology optimized connecting rod fabricated via selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 164(December 2021), 107134.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107134>
- Clemens, H., Mayer, S., & Scheu, C. (2017). Microstructure and Properties of Engineering Materials. In *Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science: From Fundamentals to Applications: Second Edition* (pp. 3–20). wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527684489.ch1>
- Cong, B. T., Tsuji, T., Thao, P. X., Thanh, P. Q., & Yamamura, Y. (2004). High-temperature thermoelectric properties of $\text{Ca}_{1-x}\text{Pr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$ ($0 \leq x < 1$). *Physica B: Condensed Matter*, 352(1–4), 18–23.
<https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.2004.06.033>
- Friedrich, H. E., & Mordike, B. L. (2006). *Magnesium technology : metallurgy, design data, applications*. Springer.
- Griebel, A. (2009). Technical brief: Fatigue dimples. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 9(3), 193–196. <https://doi.org/10.1007/s11668-009-9228-z>

- Ibrahim, F. (2021). *Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (Low Cycle Fatigue) Magnesium Ekstrusi Az31B Untuk Aplikasi Baut Tulang*.
[http://digilib.unila.ac.id/id/eprint/61172%0Ahttp://digilib.unila.ac.id/61172/2/FULL THESIS TANPA PEMBAHASAN - fauzi. ibrahim.pdf](http://digilib.unila.ac.id/id/eprint/61172%0Ahttp://digilib.unila.ac.id/61172/2/FULL%20THESIS%20TANPA%20PEMBAHASAN-fauzi.brahim.pdf)
- Jabbari, A. H., Sedighi, M., Jahed, H., & Sommitsch, C. (2020). Low cycle fatigue behavior of AZ31B extrusion at elevated temperatures. *International Journal of Fatigue*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105803>
- Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Chairman, C. A., & Balasundaram, R. (2020). Mechanical properties and applications of Magnesium alloy – Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 909–913. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.255>
- Kokubo, T., & Takadama, H. (2006). How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? *Biomaterials*, 27(15), 2907–2915. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2006.01.017>
- Linderov, M., Brilevsky, A., Merson, D., Danyuk, A., & Vinogradov, A. (2022). On the Corrosion Fatigue of Magnesium Alloys Aimed at Biomedical Applications: New Insights from the Influence of Testing Frequency and Surface Modification of the Alloy ZK60. *Materials*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/ma15020567>
- Masoudi Nejad, R., & Berto, F. (2021). Fatigue fracture and fatigue life assessment of railway wheel using non-linear model for fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 153(July), 106516. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106516>
- MERT, F. (2017). Wear behaviour of hot rolled AZ31B magnesium alloy as candidate for biodegradable implant material. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 27(12), 2598–2606. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60287-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60287-5)
- Mordike, B. L., & Ebert, T. (2001). Magnesium Properties-applications-potential. In *Materials Science and Engineering* (Vol. 302). www.elsevier.com/locate/msea
- Razavi, M., Fathi, M., Savabi, O., Tayebi, L., & Vashae, D. (2020). Biodegradable magnesium bone implants coated with a novel bioceramic nanocomposite. *Materials*, 13(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma13061315>
- Reza Kashyzadeh, K., Amiri, N., Maleki, E., & Unal, O. (2023). A Critical Review on Improving the Fatigue Life and Corrosion Properties of Magnesium Alloys via the Technique of Adding Different Elements. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/jmse11030527>

- Rokhlin, S. I., Kim, J. Y., Nagy, H., & Zoofan, B. (1999). Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life. *Engineering Fracture Mechanics*, 62(4–5), 425–444. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(98\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(98)00101-5)
- Ronchei, C., Vantadori, S., & Carpinteri, A. (2022). Fatigue lifetime assessment of AM metallic components according to a strain-based criterion. *International Journal of Fatigue*, 156(July 2021), 106674. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106674>
- Sezer, N., Evis, Z., Kayhan, S. M., Tahmasebifar, A., & Koç, M. (2018). Review of magnesium-based biomaterials and their applications. In *Journal of Magnesium and Alloys* (Vol. 6, Number 1, pp. 23–43). National Engg. Reaserch Center for Magnesium Alloys. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.02.003>
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G. (2006a). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. In *Biomaterials* (Vol. 27, Number 9, pp. 1728–1734). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.10.003>
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G. (2006b). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. In *Biomaterials* (Vol. 27, Number 9, pp. 1728–1734). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.10.003>
- Sukmana, I. (2020). A novel porous magnesium production through powder metallurgy technique using wire-pieces of titanium space holder for bone scaffold materials. *Journal of Engineering and Scientific Research*, 1(2). <https://doi.org/10.23960/jesr.v1i2.18>
- Sukmana, I., Hermanto, A., Burhanuddin, Y., Brojonegoro No, S., Lampung, B., Negeri, S., Agung, S., & Raya Dono Arum Kecamatan Seputih Agung Kabupaten Lampung Tengah, J. (2016). *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XV (SNTTM XV) Bandung, 5-6 Oktober 2016 MT-034 Aplikasi Logam Magnesium dan Paduannya Sebagai Material Baut Tulang Mampu Luruh*.
- Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth, C. J., & Windhagen, H. (2005). In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response. *Biomaterials*, 26(17), 3557–3563. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.09.049>
- Wu, J., Xu, S., Li, A., Wang, B., & Wang, Y. (2025). Prediction model of fatigue crack propagation life of corroded steel plate considering pit characteristics. *International Journal of Fatigue*, 190, 108591. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2024.108591>

- Xie, M., Xing, S., Zhao, J., KARAKAŞ, Ö., Li, Y., & Pei, X. (2022). Low-cycle fatigue design of welded offshore pipe components: A modern view on ASME B31 code. *International Journal of Fatigue*, 162(March). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106982>
- Yilmaz, B., Engin, A., Tezcaner, A., & Evis, Z. (2020). Historical development of simulated body fluids used in biomedical applications : A review. *Microchemical Journal*, 155(February), 104713. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104713>
- Zeng, J., Liu, J., Jia, Y., & Zhao, G. (2023). Study on the Deformation and Fracture Mechanisms of Plastic Metals Considering Void Damage. *Metals*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/met13091566>