

**ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK
MAGNESIUM AZ31B**

Skripsi

Oleh:

ALDITA UMAR FAJRI

2015021058



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRAK

ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31B

Oleh

ALDITA UMAR FAJRI

Magnesium AZ31B dipilih karena merupakan material yang banyak digunakan dalam industri otomotif dan biomaterial karena sifat mekaniknya yang unggul seperti ringan, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, dan kekakuan spesifik yang tinggi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik perambatan retak lelah material Magnesium AZ31B. Uji tarik (ASTM 8) dan uji perambatan retak lelah (ASTM E647) menggunakan benda uji Compact Tension (CT). Parameter yang digunakan pada pengujian adalah $P_{max} = 1$ kN, $P_{min} = 0,1$ kN, $R=0,1$, $\sigma_{yield} = 188.407$ MPa dan $f = 10$ Hz. Pengukuran panjang retak menggunakan metode kepatuhan dan data panjang retak serta jumlah siklus dianalisis menggunakan metode polinomial inkremental untuk mengetahui laju perambatan retak lelah (da/dN) dan faktor intensitas tegangan (ΔK). Plot data da/dN vs ΔK dilakukan untuk menentukan koefisien persamaan Paris pada daerah perambatan retakan tahap II yang stabil. Nilai konstanta $m = 3,067$ dan nilai konstanta $C = 3,747 \times 10^{-10}$. Pengamatan SEM pada permukaan rekahan menunjukkan pola rekahan intergranular. Selain itu, permukaan rekahan menunjukkan lurik, retakan sekunder, belahan dan rongga.

Kata Kunci : Magnesium AZ31B, Perambatan retak fatik, Fraktografi.

ABSTRACT**ANALYSIS OF FATIGUE CRACK PROPAGATION MAGNESIUM AZ31B****By****Aldita Umar Fajri**

Magnesium AZ31B was chosen because it is a material widely used in the automotive and biomaterial industries due to its superior mechanical properties such as light weight, high strength-to-weight ratio, and high specific stiffness. The purpose of this study is to determine the fatigue crack propagation characteristics of AZ31B Magnesium material. The tensile test (ASTM 8) and fatigue crack propagation test (ASTM E647) used Compact Tension (CT) specimens. The parameters used during the test were $P_{max} = 1 \text{ kN}$, $P_{min} = 0,1 \text{ kN}$, $R=0,1$, $\sigma_{yield} = 188.407 \text{ MPa}$ and $f = 10 \text{ Hz}$. Crack length measurements using the compliance method and data on crack length and number of cycles were analyzed using the incremental polynomial method to determine the fatigue crack propagation rate (da/dN) and stress intensity factor (ΔK). A plot of da/dN vs ΔK data was performed to determine the coefficients of the Paris equation in the stable-stage II crack propagation region. The constant value $m = 3,067$ and the constant value $C = 3,747 \times 10^{-10}$. SEM observation of the fracture surface showed an intergranular fracture pattern. In addition, the fracture surface showed striations, secondary cracks, cleavage and voids.

Keywords : *Magnesium AZ31B, Fatigue crack propagation, Fractografi.*

ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31B

Oleh
ALDITA UMAR FAJRI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

Judul Skripsi : **ANALISIS PERAMBATAN RETAK
FATIK MAGNESIUM AZ31B**

Nama Mahasiswa : ***Aldita Umar Fajri***

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015021058**

Program Studi : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



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

NIP. 197212111998031002

Komisi Pembimbing 2



Harnowo Supriadi, S.T., M.T.

NIP. 196909091997031002

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197108171998021003

Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin



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

NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Penguji

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



Anggota Penguji

: Harnowo Supriadi, S.T, M.T.




Penguji Utama

: Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 01 Agustus 2024

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi dengan judul “ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31B” dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasilplagiat siapapun sebagaimana diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 8 Agustus 2024

Yang membuat pernyataan



ALDITA UMAR FAJRI
NPM.2015021058

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di kota metro pada tanggal 5 Oktober 2001, yang merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Paidi dan Ibu Anita Lia. Penulis memulai pendidikan dasar di Sekolah Dasar (SD) Negeri 7 Metro pusat dan menyelesaikannya pada tahun 2013, lalu melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 6 Metro yang diselesaikan pada tahun 2016. Selanjutnya penulis melanjutkan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 3 Metro yang diselesaikan pada tahun 2019.

Selanjutnya penulis melanjutkan Pendidikan di Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi (SBMPTN) pada tahun 2020. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam kegiatan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Edukasi Kemahasiswaan pada tahun 2022. Pada tahun 2023 penulis melakukan kerja praktik (KP) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Subang dengan judul laporan “**ANALISIS GETARAN DAN KONSUMSI ENERGI PADA ALAT EKSTRAKTOR BERBASIS SENTRIFUGAL**”.

Tahun 2024 penulis melakukan penelitian untuk menyelesaikan tugas akhir di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik yang berjudul “**ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31B**”.

MOTTO

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

-Q.S. Al-Insyirah: 6-

“Maka tunggulah hari yang sangat indah itu. Jangan berputus asa dulu, jangan nyerah dulu”

-Ust Hanan Attaki-

“Selesaikan apa yang udah dimulai, berhasil atau tidak setidaknya sudah bertarung hebat”

-Aldita Umar Fajri-

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah Subhanahu wa ta'ala, tugas akhir ini

Dipersembahkan kepada :

Ayah dan Bunda

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

Iqbal Maulana dan Biilqis Salsabila

Terimakasih atas segala dukungan untuk dapat menyelesaikan pendidikan Sarjana dengan tepat waktu

Bang Raka, Ferly, Dwiandra, Taufik, Raffi

Terimakasih atas segala bantuan yang telah diberikan pada saat perkuliahan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kupanjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunia-nya dan kesehatan yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31B”. Tujuan dari penulis skripsi ini yaitu sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar S1 dan untuk melatih mahasiswa dalam berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih ada banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu penulis meminta kritik dan saran yang dapat membangun dalam pembuatan skripsi ini.

Penulis

Aldita Umar Fajri

SANWACANA

Assalamu'alaikum wr wb, puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkannya, penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan laporan tugas akhir dengan mempersembahkan judul “Analisis Perambatan Retak Fatik Magneium AZ31B” dengan sebaik-baiknya, sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

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

1. Bundaku tercinta Anita Lia dan ayahku Paidi atas segala pengorbanan, tak kenal lelah mendoakan serta memberikan yang terbaik hingga penulis mampu menyelesaikan studinya hingga menjadi sarjana. Semoga ayah dan bunda sehat dan panjang umur.
2. Adikku Iqbal Maulana dan Bilqis Salsabila yang selalu memberikan dukungan dalam setiap perjalanan selama perkuliahan.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.T.Sc. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Martinus, S.T., M.Sc. Selaku Ketua Progam Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.

6. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing utama tugas akhir ini, yang banyak meluangkan waktu, arahan, semangat, serta motivasi bagi penulis.
7. Bapak Harnowo Supriadi S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing kedua tugas akhir ini, yang telah memberikan ide, arahan dan juga waktu bagi penulis.
8. Bapak Prof. Dr. Sugiyanto, M.T. Selaku dosen pembahas tugas akhir yang memberikan kritik dan saran yang sangat bermanfaat bagi penulis.
9. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu dan pembelajaran yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani masa studi diperkuliahan.
10. Staf akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Sahabatku Raka Fariz, Ferly Citra, Taufik Nurkalam, Dwiandra Fadhila yang telah memberikan dukungan dan berbagi ilmu selama masa perkuliahan.
12. Keluarga besar Himpunan Teknik Mesin (HIMATEM).
13. Rekan-rekan penelitian Lab. Material Teknik yang telah membantu dan berbagi ilmu dalam penyelesaian tugas akhir.
14. Seluruh rekan Teknik Mesin Angkatan 2020 Universitas Lampung.
15. Dan seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
16. Penulis yang telah banyak memberikan waktu sehingga selesainya penulisan laporan ini.

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

Bandar Lampung, 29 Juli 2024

Penulis,

Aldita Umar Fajri

NPM. 2015021058

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT.....	iii
HALAMAN JUDUL.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
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
2.2.1 Almunium (Al)	6
2.2.2 Mangan (Mn)	7
2.2.3 Zinc (Zn)	7
2.2.4 Besi (Fe).....	7
2.3 Uji Tarik.....	8
2.4 Fatigue	10
2.4.1 Crack Initiation	10
2.4.2 Crack Propogation	10
2.4.3 Fracture	10
2.5 Perambatan Retak Fatigue	11
2.6 Struktur Mikro Magnesium	13
2.7 Ekstrusi	14
2.7.1 Ekstrusi Dingin	14
2.7.2 Ekstrusi Panas	15
2.7.3 Ekstrusi Hangat	15
2.8 Compliance	16
2.9 Metode Polynomial Incremental	18
2.10 Stress Intensity Factor.....	20
2.11 Laju Pengerasan Regangan	21
III. METODE PENELITIAN	23
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.2 Alat dan Bahan	23
3.3 Dimensi Spesimen	27
3.4 Prosedur Pengujian	28
3.5 Pengambilan Data	34
3.6 Prosedur Penelitian	35
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Data Hasil Uji Tarik.....	36
4.2 Data Hasil Pengujian Retak Fatik.....	39
4.3 Scanning Electron Microscope (SEM)	43

4.4 Pengamatan Mikrostruktur	47
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1 Simpulan	51
5.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva Tegangan-Regangan.....	9
Gambar 2.2 Laju Perambatan Retak	12
Gambar 2.3 Struktur Mikro Magnesium AZ31B	13
Gambar 2.4 Mekanisme Proses Ekstrusi	14
Gambar 2.5 Struktur Mikro Magnesium AZ31B Ekstrusi.....	15
Gambar 2.6 Geometri Spesimen CT	16
Gamabr 2.7 Siklus Perambatan Retak.....	18
Gambar 2.8 Metode Perambatan Retak	19
Gambar 3.1 Mesin MTS Landmark 100kN	24
Gambar 3.2 Mikroskop Optik	24
Gambar 3.3 Scanning Electron Microscope	25
Gambar 3.4 Vernier Caliper (jangka sorong).....	25
Gambar 3.5 Clip On Displacement (COD)	26
Gambar 3.6 Magnesium AZ31B	27
Gambar 3.7 Dimensi Spesimen Uji Tarik	28
Gambar 3.8 Dimensi Spesimen Uji Fatik	28
Gambar 3.9 Prosedur Penelitian	35
Gambar 4.1 Kurva Tegangan Versus Regangan Mg AZ31B	36
Gambar 4.2 Spesimen Uji Tarik Sebelum dan Sesudah Dilakukan Uji Tarik ..	37
Gambar 4.3 Kurva Hubungan engineering strain versus strain hardening rate Mg AZ31B	38
Gambar 4.4 Kurva hubungan siklus dan Panjang retak Mg AZ31B.....	40
Gambar 4.5 Kurva hubungan factor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak Mg AZ31B dan Mg AZ31.....	41
Gambar 4.6 Spesimen Pengujian SEM	43
Gambar 4.7 Hasil SEM Mg AZ31B SB3 Perbesaran 1500x	44

Gambar 4.8 Hasil SEM Mg AZ31B Perbesaran 3000x	45
Gambar 4.9 Hasil SEM Mg AZ31B SB2 dengan perbesaran (a) 50x, (b) 500X, (c) 1500x	46
Gambar 4.10 Mikrostruktur Mg AZ31B dengan perbesarn (a) 200x, (b) 500, (c) 1000x	47
Gambar 4.11 Mikrostruktur dengan perbesaran 500x (a) Magnesium AZ31B dan (b) Magnesium AZ31	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia pada magnesium AZ31B.....	6
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Magnesium AZ31B.....	8
Tabel 3.1 Spesifikasi Vernier Caliper	24
Tabel 3.2 Spesifikasi Clip On Displacement Gages.....	25
Tabel 3.3 Parameter Pengujian Tarik	29
Tabel 3.4 Parameter Pengujian FCG	29
Tabel 3.5 Data Uji Tarik.....	34
Tabel 4.1 Data Pengujian Tarik Magnesium AZ31B	37

I. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Magnesium merupakan jenis material yang paling banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari sebagai bahan utama seperti *spare part* mesin-mesin industri maupun otomotif. Kegunaan material magnesium memiliki hubungan dengan sifat mekanis magnesium yaitu kekerasan, keuletan dan ketangguhan. Keunggulan sifat mekanis magnesium berbeda-beda tergantung kandungan yang terdapat pada magnesium tersebut.

Paduan magnesium AZ31B merupakan material yang menarik untuk dapat mencapai kinerja tinggi dan menghemat energi untuk mesin dan perancangan karena kenggulannya, seperti bobot yang ringan, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, dan kekakuan spesifik yang tinggi (Fouad, 2011). Berdasarkan AISI (*American Iron Steel Institute*) komposisi paduan magnesium AZ31B meliputi, (2,50-3,50) % Al, (0,60-1,40) % Zn, 0,20 % Mn, 0,10 % Si, 0,050 % Cu, 0,040 % Ca, 0,0050 % Fe, 0,0050 % Ni dan diproses ekstruksi. Umumnya paduan magnesium AZ31B digunakan untuk aplikasi biomaterial salah satunya seperti plat tulang (*bone plate*) dan baut tulang (*bone screw*), karena kandungan aluminium yang lebih sedikit dan sifat mekanik yang baik sangat memungkinkan untuk produksi implan didalam tulang manusia. Paduan magnesium termasuk paduan yang ringan memiliki potensi yang luar biasa terutama struktural yang paling ringan, yaitu memiliki kekuatan spesifik yang tinggi dan kepadatan yang rendah.

Pengaplikasian pada paduan magnesium AZ31B yang begitu banyak terutama pada bidang industri dan merupakan salah satu material yang penting di dalam suatu mesin maka perlu dilakukannya analisis perambatan retak fatik tersebut. Oleh karena itu wajib bagi dunia industri untuk mengetahui mekanisme perambatan retak supaya terhindar dari kegagalan. Industri perlu mengklasifikasi material yang digunakan untuk meningkatkan efektifitas penggunaan material tersebut karena ketahanan material terhadap beban tentu berbeda-beda. Fatik adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum akibat beban yang berulang-ulang dalam jangka waktu lama dapat merubah struktur material sehingga terjadi retak.

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Jabbari, *et al* (2020) menyatakan perbedaan temperatur mempengaruhi umur fatik, pengerasan regangan siklik dalam kisaran regangan dari 0,6% hingga 1,3%. Kekuatan material menurun pada temperatur tinggi dan amplitudo regangan plastis meningkat pada suhu yang lebih tinggi.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Lande, dkk (2019) diketahui bahwa lubang dapat mempengaruhi arah perambatan retak sebuah plat. Lubang dapat membuat arah perambatan retak menjadi terdefleksi. Lubang plat dapat mempengaruhi kekuatan dari plat tersebut.

Dari semua referensi dan literatur serta pengujian yang telah dilakukan penelitian terdahulu, proses pengujian perambatan retak fatik pada material paduan magnesium sangat diperlukan dengan melakukan pengujian perambatan retak fatik pada paduan magnesium AZ31B. Maka dari itu, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul **“ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31B”**.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini ialah sebagai berikut :

- 1.2.1 Menganalisis perambatan retak fatik pada paduan magnesium AZ31B.
- 1.2.2 Menganalisis retakan dengan SEM pada magnesium AZ31B setelah dilakukan pengujian.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- 1.3.1 Kondisi spesimen ialah raw material.
- 1.3.2 Tidak memvariasikan beban pada pengujian perambatan retak fatik.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini sebagai berikut :

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang spesifikasi paduan magnesium AZ31B, kegunaan paduan magnesium AZ31B, tujuan penelitian, Batasan masalah, dan sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang landasan teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu tempat dan waktu penelitian, bahan yang

digunakan, peralatan yang digunakan, dan prosedur alur penelitian serta proses pengambilan data.

IV. DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang data pengamatan yang didapat, dan pembahasan dari proses pengujian.

V. PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan yang diperoleh setelah penelitian, dan saran yang dapat diberikan oleh penulis.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka berisikan sumber dari literatur yang dimasukkan dalam laporan ini.

LAMPIRAN

Lampiran berisikan foto-foto yang mendukung laporan ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnesium

Paduan magnesium (Mg) adalah logam struktural paling ringan dan dianggap sebagai paduan terbaik di abad ke-21. Karena itu kekuatan spesifik yang besar, kekakuan spesifik, kepadatannya yang rendah dan kemampuan pemesinan yang sangat baik serta mampu daur ulang, sangat cocok untuk kebutuhan struktural desain ringan. Menjadi sangat dibutuhkan diberbagai aplikasi teknis, khususnya dibidang otomotif, industri penerbangan dan elektronik. Unsur logam magnesium sangat berlimpah pada kerak bumi sekitar 2-3% dengan persentase magnesium murni 99,9% (Wang, *et al.* 2022). Magnesium termasuk dalam golongan logam dasar yang ringan karena massa jenis atau densitas sekitar 1,74 – 1,83 g/cm³ (Endo, *et al.* 2016). Magnesium memiliki sifat diantaranya ialah : nilai densitas yang rendah dibandingkan material logam lainnya, memiliki ketahanan korosi yang tinggi, nilai kekerasan yang tinggi

Sebagai logam dengan struktur padat heksagonal, paduan magnesium memiliki sedikit sistem slip pada suhu kamar. Dalam aplikasi Teknik sebenarnya bagian struktural paduan magnesium sering mengalami deformasi retak. Magnesium bisa dikombinasikan dengan unsur lainnya sebagai unsur pepadu. Tujuannya dikombinasi untuk memperbaiki sifat fisik, komposisi, bentuk, struktur dan untuk mencegah kegagalan material. Kualitas kekerasan dan kekuatan uji tarik pada magnesium dapat ditingkatkan dengan cara memadukan kombinasi unsur aluminium (Al), zinc (Zn), mangan (Mn) dan besi (Fe). Magnesium AZ31B merupakan salah satu paduan magnesium (Mg), aluminium (Al), besi (Fe) dan zinc (Zn).

2.2 Magnesium AZ31B

Magnesium AZ31B adalah paduan magnesium yang mengandung magnesium (Mg), aluminium (Al), besi (Fe), dan zinc (Zn). Paduan magnesium termasuk material yang kekuatan dan keuletan yang baik. Jenis magnesium AZ31B ini sedang banyak dikembangkan oleh peneliti material modern atau material maju dikarenakan potensinya sangat baik terutama pada bidang kedokteran. Magnesium AZ31B juga diterapkan dalam berbagai bidang industri terutama pada otomotif di bidang pesawat terbang.

Tabel 2.1 Komposisi kimia pada magnesium AZ31B (Matweb)

No	Unsur	% wt
1	Magnesium (Mg)	96%
2	Nickel (Ni)	$\leq 0,0050$ %
3	Calcium (Ca)	$\leq 0,040$ %
4	Zinc (Zn)	0,60 – 1,4 %
5	Copper (Cu)	$\leq 0,050$ %
6	Iron (Fe)	$\leq 0,0050$ %
7	Silicon (Si)	$\leq 0,10$ %
8	Aluminium (Al)	2,5 – 3,5 %
9	Manganese (Mn)	$\geq 0,20$ %

Pada table 2.1 merupakan komposisi kimia magnesium AZ31B, komposisi aluminium (Al) 2,5 – 3,5 %, besi (Fe) harus kurang dari 0,0050 % dan zinc (Zn) berkisaran 0,60 – 1,4 %. Komposisi tersebut untuk menghindari korosi yang berlebih (Witte *et al.* 2005). Unsur-unsur pada magnesium AZ31B sangat berpengaruh pada hasil akhir magnesium AZ31B. Adapun unsur-unsurnya magnesium AZ31B sebagai berikut :

2.2.1 Aluminium (Al)

Aluminium (Al) merupakan logam yang sangat paling berlimpah. Aluminium merupakan unsur logam tetapi termasuk logam yang tidak berat. Penambahan unsur aluminium (Al) pada magnesium AZ31B

akan menimbulkan sifat kekerasan dan kekuatan tanpa terlalu menurunkan keuletannya. Tingkat kekerasan ditentukan oleh persentase, semakin tinggi persentase aluminium maka kekerasan dan kekuatan semakin meningkat. Aluminium merupakan paduan terbanyak dari pada paduan yang lainnya.

2.2.2 Mangan (Mn)

Unsur paduan mangan merupakan salah satu yang dapat mencegah atau mengurangi kegetasan atau *brittleness* suatu material pada suhu tinggi pada saat proses ekstrusi. Unsur mangan sangat dibutuhkan pada magnesium AZ31B, semakin banyak persentase unsur paduan mangan maka suhu kritis menurun secara seimbang. Unsur paduan mangan dapat meningkatkan kekuatan tarik tanpa mengurangi regangan.

2.2.3 Zinc (Zn)

Unsur paduan zinc pada magnesium AZ31B memberikan peningkatan ketahanan korosi, zinc juga menyerap elektron dari logam dan melapisi sehingga reaksi oksidasi berkurang. Unsur paduan zinc pada magnesium AZ31B sebesar 0,60 – 1,4 %. Namun semakin tinggi persentase zinc membuat penurunan kekuatan *impact*.

2.2.4 Besi (Fe)

Unsur besi pada magnesium AZ31B tidak dibutuhkan dalam jumlah besar dikarenakan unsur besi dapat mengakibatkan korosi secara signifikan. Persentase besi pada magnesium AZ31B tidak lebih dari 0,0050 %. Unsur besi memiliki peranan terpenting dalam kajian maupun ilmu biologi (Cholis dkk.2013).

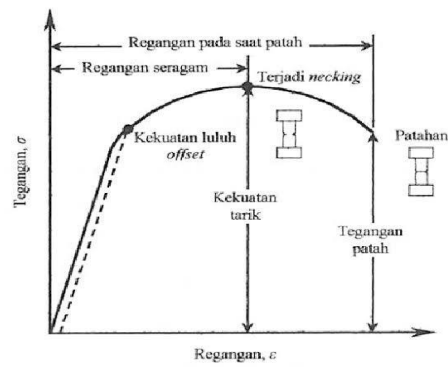
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Magnesium AZ31B (Matweb)

No	Mechanical Properties	Metric
1	Hardness Brinell	49
2	Tensile Strength Ultimate	260 MPa
3	Tensile Strength Yield	200 MPa
4	Elongation at Break	15%
5	Tensile Modulus	45,0 GPa
6	Compressive Yield Strength	97,0 MPa
7	Ultimate Bearing Strength	385 MPa
8	Bearing Yield Strength	230 MPa
9	Poissons Ratio	0,35
10	Shear Modulus	17,0 GPa
11	Shear Strength	130 MPa
12	Charpy Impact	4,30 J

Sifat mekanik magnesium AZ31B diatas merupakan sifat mekanik standar manufaktur.

2.3 Uji Tarik

Uji tarik atau *tensile test* salah satu pengujian material yang paling banyak dilakukan di bidang industri. Uji tarik merupakan salah satu cara untuk mengetahui sifat mekanik dari material. Yang dihasilkan dari uji tarik ini adalah kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*), elastisitas (*elasticity*), kekuatan mulur (*yield strength*), elongasi (*elongation*) dan pengurangan luas penampang (*reduction of area*). Uji tarik akan diperoleh spesimen yang putus karena diberi pembebanan tarik secara konstan pada material. Data yang diperoleh dari uji tarik berupa besarnya pembebanan, besarnya perpanjangan dan perubahan luas penampang yang terjadi pada spesimen yang akan diperoleh menjadi kurva regangan tegangan (Budiman, 2016).



Gambar 2.1 Kurva Tegangan-Regangan (Salindeho dkk, 2013)

Kurva tegangan diperoleh dengan cara membagi beban dengan luas awal penampang lintang benda uji tersebut.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

Dimana :

σ : Tegangan Tarik

P : Gaya yang diberikan pada benda uji

A_0 : Luas penampang awal benda uji

Regangan yang didapat adalah regangan linear rata-rata, diperoleh dengan cara membagi perpanjangan (*gage length*) benda uji dengan Panjang.

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

Dimana :

ϵ : Regangan

ΔL : Perubahan Panjang (mm)

L_0 : Panjang awal spesimen (mm)

L : Panjang akhir material (mm)

Berdasarkan hukum *hooke* kurva regangan tegangan dirumuskan sebagai berikut:

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

Dimana :

E : Modulus elastisitas

σ : Tegangan

ϵ : Regangan

2.4 *Fatigue*

fatigue atau kelelahan merupakan sebuah bentuk kegagalan di struktur material karena beban dinamik yang terjadi dalam jangka waktu lama dan berulang-ulang, berfluktuasi dibawah *yield strength*. Suatu logam jika diberikan tegangan berulang-ulang maka logam tersebut akan patah (Amiruddin & Lubis, 2018). Dalam fatik atau kelelahan terdapat 3 fase bertahap antara lain sebagai berikut :

2.4.1 *Crack initiation*

Crack initiation atau retak awal terjadi dipermukaan material yang lemah atau bisa terjadi didaerah dimana terjadi konsentrasi tegangan di permukaan, hal tersebut terjadi dikarenakan pembebanan yang berulang. Goresan, lubang pits, *notch* yang biasanya terjadi retak awal dikarenakan pada daerah material yang lemah.

2.4.2 *Crack propagation*

Crack propagation atau penyebaran retak terjadi karena jumlah siklus yang diberikan sudah melebihi batas kekuatan material. Penyebaran retak berasal dari retak awal dan akan menimbulkan *macrocraks* yang akan menimbulkan retak yang semakin besar dan tidak terlihat halus lagi.

2.4.3 *Fracture*

Fracture merupakan tahap terakhir dalam proses *fatigue*. Material yang patah terjadi karena diberi pembebanan yang berulang

mengakibatkan kegagalan dan struktur rusak. Pada tahap ini retak semakin cepat dan membuat material cacat permanen.

fatigue memiliki dua siklus yang berbeda, yaitu *low cycle fatigue* dan *high cycle fatigue* yang menjadi pembeda adalah nilai jumlah siklusnya. Nilai siklus *low cycle fatigue* dibawah $\leq 10^3 = 1000$ siklus dalam kondisi plastis. Nilai siklus *high cycle fatigue* antara 10^4 sampai 10^7 dan berada diluar kondisi elastis.

2.5 Perambatan Retak *Fatigue*

Perambatan retak *fatigue* sebuah metode untuk mengetahui umur kelelahan struktur. Analisis laju perambatan retak *fatigue* sangat perlu dilakukan dikarenakan terdapat fenomena yang menarik yaitu perambatan retak *fatigue* akibat beban dinamis. *Fracture mechanics* merupakan salah satu untuk menganalisis umur kelelahan. Perambatan retak dinyatakan dengan da/dN . da/dN merupakan fungsi dari sifat material. Laju perambatan retak dapat diketahui menggunakan persamaan paris law yaitu sebagai berikut :

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (2.4)$$

Dimana :

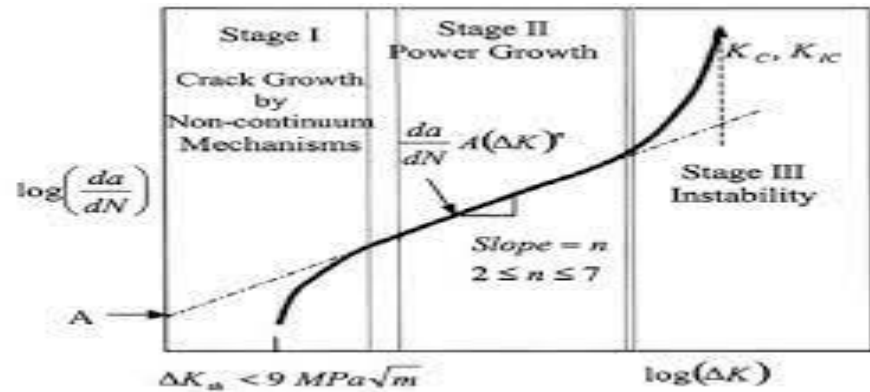
da/dN : Laju perambatan retak

ΔK : Faktor intensitas tegangan

C : Konstanta material

m : Material konstan

Perambatan retak *fatigue* dapat dibedakan menjadi tiga daerah seperti pada gambar 2.1. Daerah 1 menunjukkan daerah yang terjadi laju perambatan retak yang kecil. Pada daerah 2 menunjukkan laju perambatan retak terjadi karena kelelahan diatas ΔK_{th} dan pada daerah 3 menunjukkan laju perambatan retak yang lebih besar dibandingkan daerah 2.



Gambar 2.2 Laju perambatan retak (Wartono, 2020)

Pada daerah I perambatan retak menunjukkan karakteristik “*fatigue threshold*” yang merupakan fluktuasi kenaikan nilai *strees intensity factor* dengan parameter ΔK_{th} . Nilai ΔK harus memungkinkan terjadinya perambatan retak. Nilai da/dN antara daerah I dan daerah II sebagai berikut:

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K + h^m) \quad (2.5)$$

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

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2.6)$$

Nilai da/dN antara daerah I dan daerah II dapat dihitung sebagai berikut (bila efek R diperhitungkan)

$$da/dN = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad (2.7)$$

Pada daerah III perambatan retak yang terjadi lebih cepat dari pada daerah II dan I, merupakan awal terjadinya kepecahan. Nilai da/dN antara daerah I, II dan III (bila efek R diperhitungkan) adalah

$$\frac{da}{dN} \frac{\Delta K}{4\pi\sigma E} \frac{(\Delta K - \Delta K + h)(1-R)}{(1-R)(K_C - \Delta K)} \wedge 0,5 \quad (2.8)$$

Dimana :

da/dN : Kecepatan perambatan retak (m/cycle)

ΔK : Range faktor intensitas tegangan (MPa)

K_1 : Faktor intensitas tegangan (MPa^{0,5})

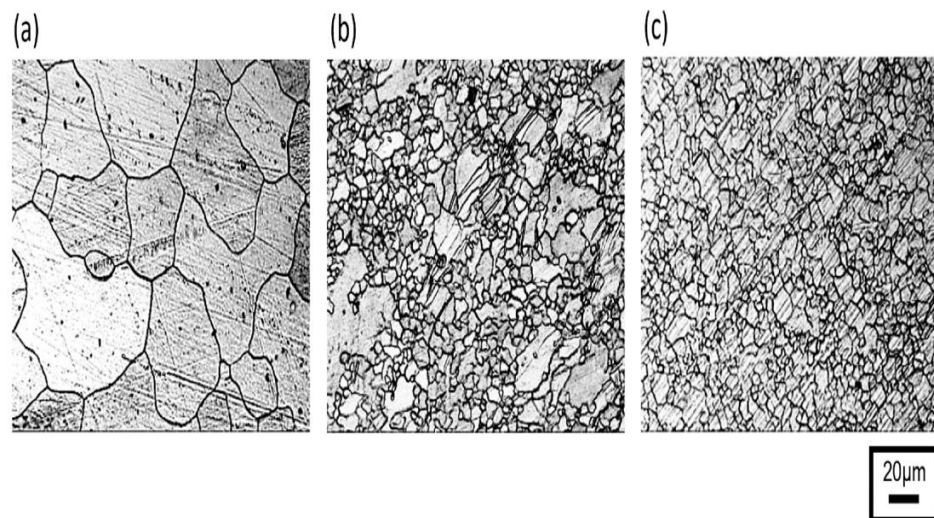
K_C : Harga Kritis K (MPa^{0,5})

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

C, m : Parameter pertumbuhan retak

2.6 Struktur Mikro Magnesium

Struktur mikro adalah struktur yang paling kecil didalam suatu material. Keberadaan struktur mikro tidak dapat dilihat secara langsung, untuk melihat struktur mikro harus menggunakan alat khusus diantaranya adalah *Scanning electron microscope (SEM)*, *microscope field emission*, *microscope light* dan *microscope sinar-X* (Bhakti dkk, 2013). Bentuk, ukuran dan jumlah butir suatu spesimen yang telah melalui pembentukan, ekstruksi, perlakuan dan pengujian yang membuat deformasi plastis berubah secara permanen, oleh karena itu dilakukannya observasi struktur mikro untuk mengetahui bentuk, ukuran dan jumlah butir pada spesimen tersebut (Farbaenic *et al*, 2016). Umumnya *microscope* yang digunakan untuk mengetahui struktur mikro memiliki pembesaran 1 sampai 1000 kali.

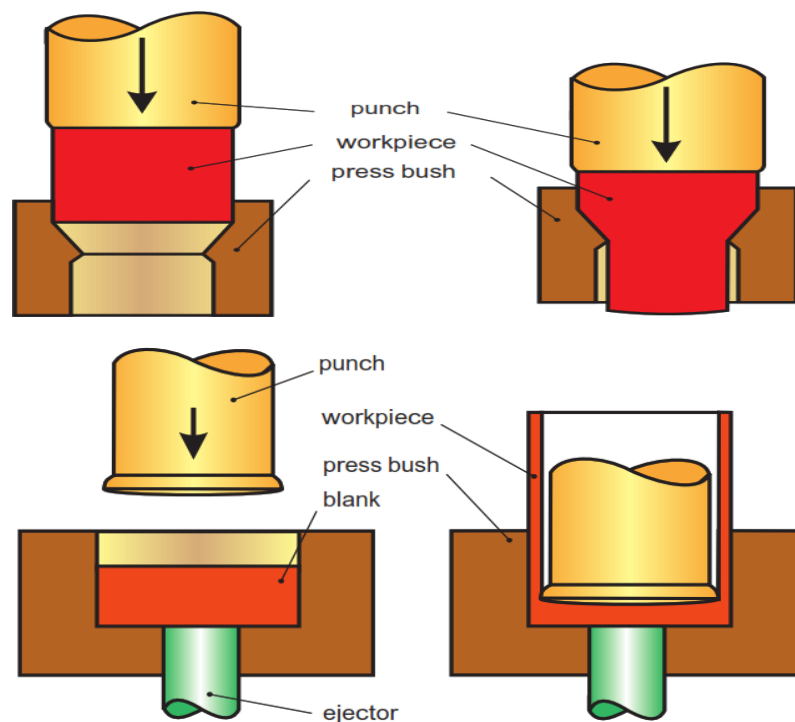


Gambar 2.3 Stuktur mikro magnesium AZ31B (Yamada *et al*, 2021)

Struktur mikro yang diobservasi oleh Yamada (2021) pada magnesium AZ31B yang di proses ekstruksi. Pada gambar 2.3 mendapatkan hasil struktur mikro bimodal, dan ukuran butir yang akurat tidak dapat dihitung dari ukuran butir rata-rata. Dimana butiran kasar berukuran 30-40 μm dan butiran halus berukuran kurang dari 10 μm . garis putus-putus kasar warna putih menunjukan lokasi distribusi tegangan.

2.7 Ekstrusi

Proses ekstrusi merupakan proses material dibentuk dengan cara menekan dengan rongga cetakan. Tekanan yang diberikan sangat besar. Keunggulan proses ekstrusi ialah mampu menghasilkan penampang sangat kompleks, membuat material yang rapuh menjadi lebih mudah karena material tersebut mengalami tegangan tekan dan tegangan geser dan menghasilkan permukaan material yang sangat baik.



Gambar 2.4 Mekanisme Proses Ekstrusi (Springer, 1998)

Proses ekstrusi memiliki beberapa metode diantaranya ialah sebagai berikut :

2.7.1 Ekstrusi Dingin

Ekstrusi dingin dilakukan pada suhu ruangan. Kelebihan dari ekstrusi dingin kurangnya oksidasi, kekuatan yang lebih tinggi dikarenakan pengerjaan yang dingin, permukaan yang lebih halus dan kecepatan ekstrusi cepat. Beberapa bahan yang biasanya di ekstrusi

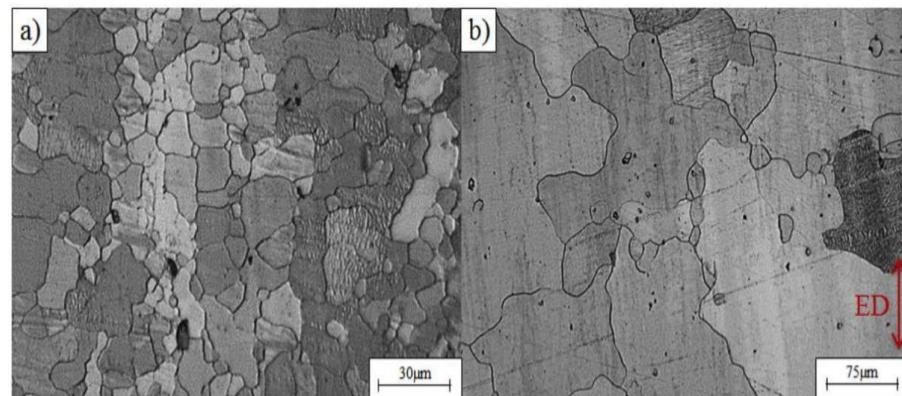
dingin di antaranya aluminium, tembaga, titanium, timah, beryllium dan baja.

2.7.2 Ekstrusi Panas

Ekstrusi panas dilakukan di atas temperatur rekristalisasi material agar menjaga material dari pengerasan dan material mudah untuk masuk kedalam cetakan. Ekstrusi panas biasanya dilakukan pada pengepres hidrolis horizontal yang bertekanan sekitar 30 sampai 700 Mpa. Beberapa bahan yang biasanya menggunakan ekstrusi panas ialah magnesium 350-450 °C, nikel 1000-1200 °C, aluminium 350-500 °C, paduan tahan api 2000 °C.

2.7.3 Ekstrusi Hangat

Ekstrusi hangat dilakukan di atas suhu ruangan dan dibawah titik leleh kritis. Ekstrusi hangat dilakukan di atas suhu kamar tetapi dibawah suhu rekristalisasi material. Suhu sekitar 424 sampai 975 °C. biasanya digunakan untuk mencapai keseimbangan yang tepat sesuai gaya yang dibutuhkan, sifat ekstruksi akhir dan keuletan material.

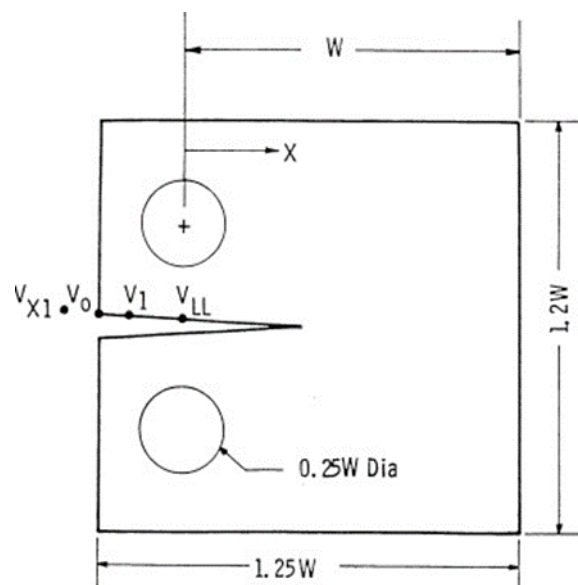


Gambar 2.5 Struktur mikro magnesium AZ31B yang dilakukan proses ekstrusi (Wong *et al*, 2018).

Struktur mikro pada magnesium AZ31B setelah proses ekstrusi berubah seperti pada gambar 2.5 bintang hitam yang terlihat pada gambar merupakan aluminium untuk membuat sifat keras magnesium, butir yang panjang dan pipih dan terlihat garis halus sampai kasar tersebut ialah deformasi.

2.8 Compliance

Compliance atau kepatuhan adalah menguji atau melihat pertumbuhan retakan subkritis. Teknik *compliance* sangat sederhana hanya didasarkan pada pengukuran dua besaran paling dasar yaitu, beban yang di terapkan dan defleksi benda uji. Kalibrasi kepatuhan pada dasarnya diperlukan untuk pengujian ketangguhan. Pengujian *fatigue crack growth* diberikan beban secara konstan dengan rasio beban tertentu menggunakan gelombang simosoidal sejati dengan diukur menggunakan *crack on opening displacement* (COD) dengan metode *compliance*.



Gambar 2.6 Geometri Spesimen CT (ASTM E647, 2000)

Pada gambar 2.6 terdapat beberapa simbol digunakan untuk menunjukkan kesesuaian yang dinormalisasi di beberapa lokasi spesimen, berikut adalah penjelasan simbol pada gambar geometri spesimen CT

$(BEV_0)/P$ = Kesesuaian pada permukaan depan spesimen, lokasi yang ditetapkan adalah 0.

$(BEV_1)/P$ = Kepatuhan pada $1576W$ dari garis beban ke arah depan spesimen, lokasi yang ditentukan "1".

$(BEV_{LL})/P$ = Kepatuhan garis beban, lokasi yang ditentukan "LL".

$(BEV_{X1})/P$ = Kesusain jarak 345W dari garis beban kearah retakan ujung, lokasi yang ditetapkan "X1".

Dimana :

E : Modulus

B : Tebal benda uji

V : Perpindahan

P : Beban

W : Lebar benda uji

Tabel 2.3 Nilai compliance coefficient

Meas. Location	X/W	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C(T) Spesimen							
V _{X1}	-0.345	1.0012	-4.9165	23.057	-323.91	1798.3	-3513.2
V ₀	-0.250	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6
V ₁	-0.1576	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3
V _{LL}	0	1.0002	-4.0632	11.242	-106.04	464.33	-650.68

Ketangguhan retak kritis dapat dilihat sebagai laju pelepasan energi elastis (ERR) per unit pada area baru yang tercipta. Pada kasus specimen CT Panjang retak dinormalisasi sebagai (ASTM E399, 1997).

$$\frac{a}{w} = 1.0010 - 4.6695U + 18.460U^2 - 236.82U^3 + 1214.9U^4 - 2143.6U^5 \quad (2.9)$$

Dimana :

a : Panjang retak dari titik aplikasi beban

w : Bentang antara titik beban dan permukaan ujung specimen

Nilai U diperoleh dari persamaan :

$$U = 1/ \left[1 + (BEV/P) \frac{1}{2} \right] \quad (2.10)$$

Dimana :

V : Perpindahan antara titik pengukuran

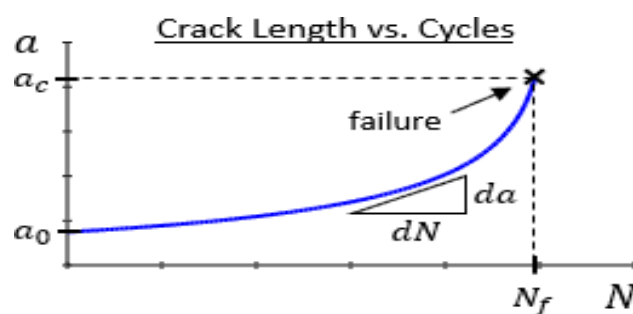
E : Modulus young

B : Tebal spesimen

P : Beban

Persamaan $C = V/P$ didapat dari slope (α) = $\frac{P}{V}$ maka $C = \frac{1}{\text{slope}} = \frac{1}{P/V}$ jadi

$$C = V/P$$



Gambar 2.7 Siklus Perambatan Retak

Awalnya retak tumbuh sangat lambat dan menjadi semakin cepat (da/dN) seiring dengan bertambahnya ukuran retak. Laju perambatan bergantung pada faktor intensitas tegangan pada ujung retak yang bergantung pada Panjang retak (a). Faktor intensitas yang tinggi menyebabkan perambatanretak lebih cepat, retak merambat hingga mencapai ukuran kritis dan terjadi *failure*.

2.9 Metode *Polynomial Incremental*

Metode yang digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik adalah metode *polynomial incremental* (ASTM E647, 2000). Metode ini digunakan untuk menghitung da/dN meliputi pas *polynomial* urutan kedua parabola ke rangkain ($2n+1$) titik data yang berurutan, di mana n biasanya senilai 1,2,3,4 (ASTM E647, 2004).

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right)^2 \quad (2.11)$$

Dimana,

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \leq +1 \quad (2.12)$$

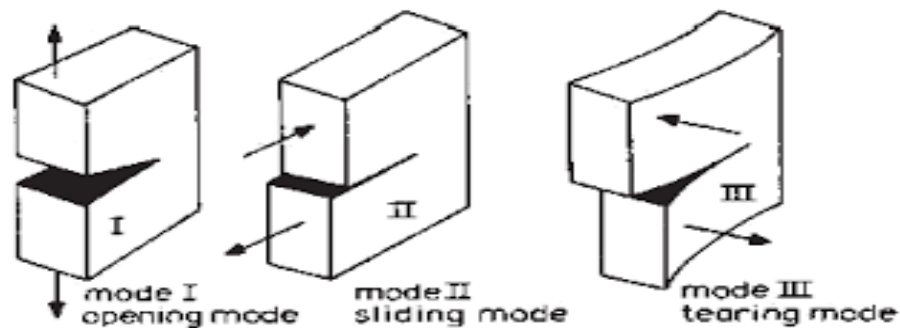
Nilai b_0 , b_1 dan b_2 merupakan parameter regresi yang ditentukan dengan metode kuadrat terkecil yaitu, minimalisasi kuadrat deviasi antara nilai ukuran retakan yang diamati dan nilai yang ditetapkan pada rentang $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$. Nilai dari a_i merupakan nilai ukuran retakan yang sesuai pada N_i . Parameter $C_1 = 1/2(N_{i-n} + N_{i+n})$ dan $C_2 = 1/2(N_{i+n} + N_{i-n})$ digunakan untuk menskalakan data masukan, sehingga menghindari kesulitan numerik dalam menentukan parameter regresi. Laju pertumbuhan retak pada N_i diperoleh dari turunan parabola diatas, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\left(\frac{da}{dN} \right) d_i = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \quad (2.13)$$

Analisis data hasil dari pengujian retak fatik dihitung menggunakan metode *polynomial incremental* menggunakan program komputer *quick basic*. Program ini menggunakan K-kalibrasi spesimen untuk geometri C(T) spesimen. Program ini dapat mengetahui informasi hasil specimen, variable pembebanan dan lingkungan dicantumkan dalam keluaran bersama dengan nilai tabulasi dari data mentah dan data yang diproses. A (Meas) dan A(Reg) masing-masing adalah nilai ukuran retakan total yang diperoleh dari pengukuran dan persamaan regresi, persamaan (2.11). Nilai ΔK dan da/dN diberikan dalam satuan yang sama dengan variabel masukan.

2.10 *Stress Intensity Factor*

Stress intensity factor merupakan salah satu parameter yang dipakai untuk mengetahui keretakan yang mendeskripsikan tegangan yang terjadi pada ujung retak atau takik. *Stress intensity factor* (SIF) biasanya digunakan untuk parameter desain untuk menentukan sifat dari proses kepecahan dan bisa digunakan untuk menentukan umur dari struktur yang mengalami kerusakan akibat kelelahan. Tingkat kelelahan perambatan retak juga dapat ditentukan dengan parameter *stress intensity factor* (SIF).



Gambar 2.8 Mode perambatan retak (Sugiarto dkk, 2016)

Pada saat pengujian Tarik terdapat tiga mode untuk pembebanan yang digunakan. Tujuan dilakukannya mode untuk mengetahui retak pada bahan yang diuji.

1. *Opening Mode* (Mode I)

Merupakan sistem pembebanan yang paling penting, dikarenakan pembebanan memulai retak awal. Retak terbentuk dikarenakan adanya tegangan normal tarik yang menyebabkan arah perambatan retak tegak lurus terhadap bidang retak.

2. *Sliding Mode* (Mode II)

Permukaan retak saling menggeser satu sama lain dalam arah tegak lurus terhadap tepi depan retakan.

3. *Tearing Mode* (Mode III)

Retak yang ditimbulkan karena tegangan geser yang bekerja pada arah ujung retak dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak.

Permukaan retakan bergerak relatif satu sama lain dan sejajar dengan tepi depan retakan (Broek, 1986).

Faktor intensitas tegangan dapat ditentukan dari panjang retak fatik dalam setiap rentang beban. Persamaan 2.12 berlaku untuk mengukur faktor intensitas tegangan pada spesimen CT standar ASTM E647 untuk berbagai panjang retakan dimana spesimen dibebani pada kondisi Tarik.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} Y \quad (2.14)$$

$$Y = (0,886 + 4,64a - 13,32a^2 + 14,72a^3 + 5,6a^4) \quad (2.15)$$

Dimana :

a : a/W nilai ini valid jika $a/W \geq 0.2$

ΔP : Rentan beban

B : Tebal Spesimen

W : Lebar spesimen

2.11 Laju Pengerasan Regangan

Laju pengerasan regangan merupakan pengukuran perubahan tegangan yang terjadi peningkatan kekerasan dan kekuatan magnesium saat mengalami deformasi plastis. Laju pengerasan regangan untuk mengetahui seberapa cepat material menjadi lebih kuat dan lebih keras pada saat mengalami deformasi plastis. *Strain hardening* adalah nilai yang menggambarkan sifat mekanis pada material yaitu tingkat pengerasan regangan yang dialami suatu material ketika material mengalami deformasi plastis di bawah beban tarik. Untuk mendapatkan nilai laju pengerasan regangan diperhitungkan dengan persamaan berikut :

$$\varepsilon' = 1n (1 + \varepsilon) \quad (2.16)$$

dan nilai tegangan sebenarnya dihitung melalui persamaan berikut :

$$\sigma_t = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (2.17)$$

Nilai *true stress* dan *true strain* didapatkan dari memplot nilai *log stress* dan *log strain* sesudah *yield strength* sampai dengan nilai *ultimate strain*. *True stress-true strain* merupakan nilai tegangan dan regangan yang diperhitungkan, dimana perubahan luas penampang seiring dengan bertambahnya beban. Maka diperoleh nilai *true stress* dan *true strain*.

$$\sigma' = K \varepsilon'^n \quad (2.18)$$

Dimana untuk memperoleh nilai K dan n maka digunakan persamaan :

$$\text{Log } \sigma = n \text{ log } \varepsilon + \text{log } K \quad (2.19)$$

Dimana :

- σ : Tegangan teknik
- ε : Regangan teknik
- ε' : Regangan sebenarnya
- σ' : Tegangan sebenarnya
- K : Koefisien kekuatan
- n : Koefisien *strain hardening*

Selanjutnya dari nilai *true stress* dan *true strain* yang telah diperoleh dapat dihitung nilai koefisien *strain hardening* (n) dan konstanta kekuatannya (K) melalui persamaan *flow stress* diatas dan kemudian nilai tersebut digunakan dalam mencari nilai *strain hardening rate* yang akan di plot dengan nilai *true strain*.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian tugas akhir ini dilaksanakan pada bulan Januari 2024 sampai dengan bulan Mei 2024. Penelitian pengujian perambatan retak fatik (FCG) dan pengujian tarik ini dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung. Pengamatan struktur mikro dan SEM setelah proses pengujian dilakukan di Laboratorium Material Teknik mesin Universitas Diponegoro.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut :

3.2.1 MTS *Landmark* 100 kN

Mesin ini digunakan pada penelitian untuk pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik (FCG). Mesin ini terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 3.1 Mesin MTS Landmark 100 kN

3.2.2 Mikroskop Optik

Mikroskop optik merupakan alat yang digunakan pada penelitian ini kegunaannya ialah untuk mengamati dan memfoto morfologi bentuk perambatan retak fatik pada spesimen yang di uji.



Gambar 3.2 Mikroskop Optik

3.2.3 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Scanning Electron Microscope digunakan untuk melihat struktur mikro dan mengobservasi patahan pada permukaan spesimen uji setelah dilakukannya pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik.



Gambar 3.4 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

3.2.4 *Vernier caliper (Jangka Sorong)*

Vernier caliper atau jangka sorong digunakan untuk mengukur Panjang spesimen uji sebelum dan sesudah dilakukan pengujian tarik dan perambatan retak fatik untuk mengetahui perbedaan Panjang spesimen uji.



Gambar 3.5 *Vernier caliper (Jangka Sorong)*

Tabel 3.1 Spesifikasi *Vernier caliper* (Jangka Sorong)

Detail spesifikasi	
Nama Merk	Mitutoyo
Akurasi	0,22 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	800 gram

3.2.5 *Clip On Displacement Gages*

Clip On Displacement Gages adalah alat ukur yang digunakan untuk berbagai pengujian mekanika rekahan, termasuk tegangan kompak, bentuk busur, bentuk cakram, spesimen tekukan atau geometri spesimen lainnya sesuai dengan ASTM dan metode pengujian organisasi standar lainnya. *Clip On Displacement Gages* terdapat pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.

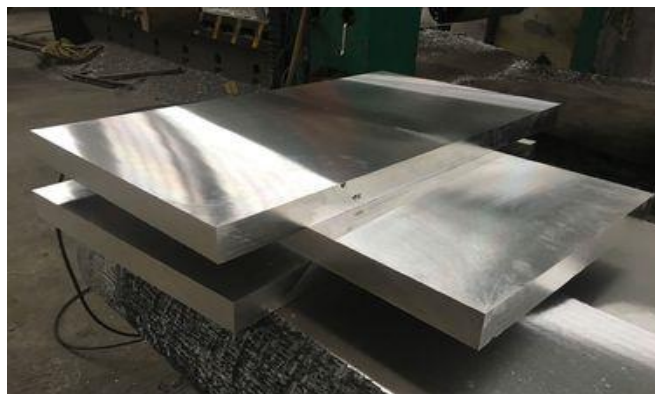
**Gambar 3.6** *Clip On Displacement Gages*

Tabel 3.2 Spesifikasi *Clip On Displacement Gages*

Detail spesifikasi	
Nama Merk	Epsilon
Eksitasi	5-10 VDC
Output	2-4 mV/V
Akurasi	2,5 dan 4,0 mm (0,10 dan 0,15 inci)
Linearitas	$\leq 0.2\%$
Standar Temperatur	-40°C - 100°C
Kekuatan Operasi	9 - 14 N (2-3 lbs)

3.2.6 Spesimen Magnesium AZ31B

Magnesium AZ31B yang telah melalui proses ekstrusi yang digunakan pada penelitian ini.



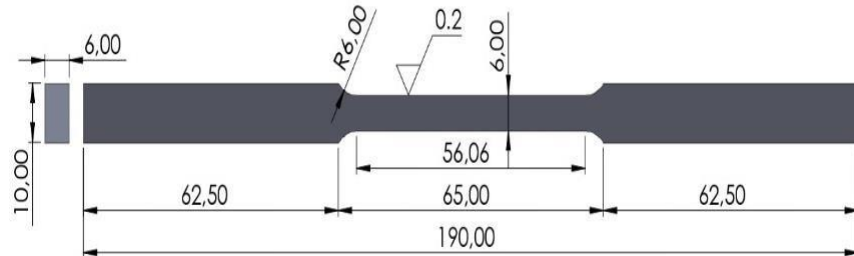
Gambar 3.7 Magnesium AZ31B

3.3 Dimensi Spesimen

Pada penelitian ini spesimen yang digunakan ialah magnesium AZ31B. berikut merupakan dimensi spesimen uji yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :

3.3.1 Spesimen Uji Tarik

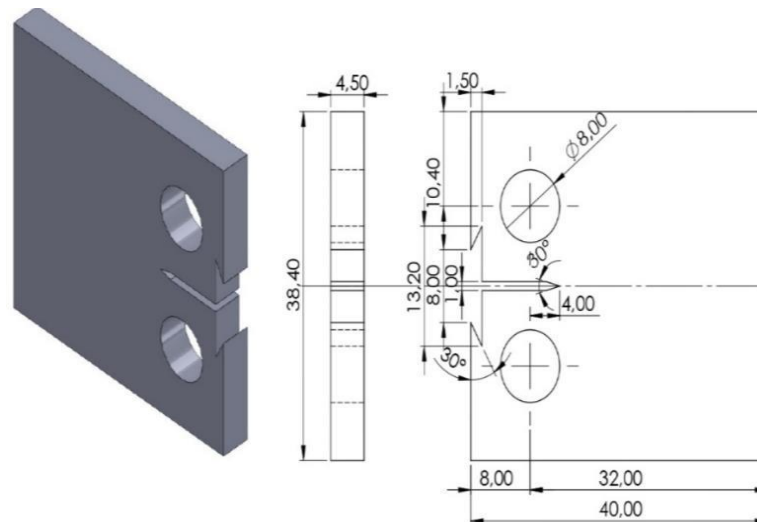
Spesimen uji tarik menggunakan spesimen berdasarkan standar ASTM E98.



Gambar 3.8 Dimensi Spesimen Uji Tarik (ASTM E8, 2001)

3.3.2 Spesimen Uji Perambatan Retak Fatik

Untuk pengujian perambatan retak fatik menggunakan spesimen *Compact Tension* (CT) standar ASTM E647.



Gambar 3.9 Dimensi Spesimen Uji Fatik (ASTM E647, 2004)

3.4 Prosedur Pengujian

Adapun Prosedur penelitian yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu :

3.4.1 Persiapan Spesimen Uji

Material yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah magnesium AZ31B.

3.4.2 Pembuatan Spesimen Uji

Pada tahap ini melakukan standarisasi terhadap dimensi magnesium AZ31B, Dengan mengikuti standar ASTM E8 untuk spesimen uji tarik dan ASTM E647 untuk spesimen uji fatik. Gambar 3.8 merupakan hasil dari proses pemesinan dengan menggunakan *CNC Milling Machine*.

3.4.3 Parameter Pengujian Tarik dan FCG

Sebelum dilakukan pengujian ada beberapa parameter yang harus disesuaikan dengan spesimen yang akan di uji, berikut adalah parameter yang digunakan pada pengujian ini.

Tabel 3.3 Parameter Pengujian Tarik

No	Parameter	Nilai
1	Speed (kN/s)	0,040
2	Gage Length (mm)	50
3	Tebal Spesimen (mm)	5,25
4	Lebar Spesimen (mm)	12,65
5	Frekuensi (Hz)	10
6	Standar	ASTM E8
7	Tipe Geometri	Rectangle For Tension

Tabel 3.4 Parameter Pengujian FCG

No	Parameter	Nilai
1	Pmax (kN)	1
2	Pmin (kN)	0,1
3	Rasio	0,1
4	σ_{yield} (MPa)	188,36
5	Frekuensi (Hz)	10

6	Lebar (mm)	12
7	Tebal (mm)	4,84
8	Modulus Elastis (GPa)	43,108
9	Standar	ASTM E647

3.4.4 Prosedur Pengujian

a. Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik dilaksanakan terlebih dahulu untuk memperoleh data nilai tegangan luluh (σ_y) magnesium. Adapun prosedur pengujian tarik ialah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan spesimen magnesium AZ31B sesuai standar ASTM E8.
2. Memilih program Controller 793B setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
3. Memasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
4. Lalu *crosshead* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
5. Menekan *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
6. Kemudian klik *auto offset* untuk *force*. Lalu mencengkam grip bagian bawah sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak bergeser.
7. Memasangkan *extensometer* pada spesimen dengan posisi *zero pin*, dan tekan *icon manual offset* untuk *extensometer*. Lalu *zero pin* dilepaskan dari *extensometer*.
8. Memilih program MTS *Test Suite* (MPE), pilih *template* untuk uji tarik statis.
9. Memasukan data spesimen, lebar spesimen dan tebal spesimen magnesium AZ31B.
10. Lalu masukan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
11. Sesudah menginput semua data klik *RUN*.

b. Pengujian Perambatan Retak Fatik

Adapun prosedur pengujian perambatan retak fatik ialah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen magnesium AZ31B sesuai standar ASTM E647.
2. 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.
3. Menghidupkan HPU dengan menekan tombol *on/off* kemudian pada panel kontroler HPU klik *main display-set up-main controller*.
4. Menghidupkan MTS *Landmark* 100 kN dan temperatur kontroler.
5. Menghidupkan lampu penerangan pada MTS *Landmark* 100 KN.
6. Membuka program *Station Manager* kemudian klik *project-open-FCG-open* (parameter set di FCG COD) lalu memilih file *pre crack 2022* dan *configuration file* tanpa *extensometer* yaitu *Axial Basic* lalu klik *Open*.
7. Pada *station manager* klik *ceklis* pada *exclusive control* lalu pada *manual command ceklis* pada *Enable Manual Command*.
8. 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*.
9. 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*.

10. 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*).
11. Pada *detector*, ubah *upper action* ada *axial displacement* dari *disable* ke *interlock*.
12. Membuka program MTS *Test Suite* (MPE), memilih *template* untuk *Fatigue Crack Growth Testing*.
13. Memasangkan spesimen pada *cross head grip* atas dengan rapi kemudian spesimen dicekam.
14. Kemudian menurunkan *cross head* sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam *grip* bawah dengan kedalaman 45mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk *grip* spesimen.
15. Meluruskan *grip* bawah sesuai dengan *grip* atas, lalu pada *manual command*, klik *control mode* dan ganti *displacement* ke *force* dan *grip* bagian bawah dicekam.
16. Kemudian *reset* pada *interlock 1 station manager* dan *unlocklist enable manual command* pada *manual command*.
17. Klik *new test run* pada software MTS *test suite* dan mengatur *setup variables fatigue crack growth testing* yaitu dengan memasukan data tebal spesimen, *compliment* koefisien C₀-C₅ sesuai standar ASTM E467 V₀, F_{max} dan F_{min}, total *cycles* 3000000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament*, dan beban uji fatik menggunakan *control* beban yang sudah ditentukan dari nilai *yield strength* yang diperoleh dari uji tarik.
18. Pada *fatigue crack growth testing* pilih FCG *pre crack* parameter kemudian masukan FCG and level 1 yaitu beban maksimal 1 dan level 2 yaitu beban minimal 0,1
19. Pada *pre crack test* delta K masukan nilai *crack length deck* 20 mm
20. Kemudian klik OK dan *Run Test*.

21. Kemudian tunggu sampai FCG *crack length* nya mencapai nilai yang ditentukan yaitu 20 mm.
 22. Setelah test pre crack dilakukan dan patahan sudah mencapai retak pre crack yang dilakukan kemudian mulai FCG Test.
 23. Klik *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, F_{max} dan F_{min}, total cycles 1000000, frekuensi 10 Hz, *cycles increament*, *final crack length* dan beban uji fatik menggunakan control beban yang sudah ditentukan dari nilai *yield strength* yang diperoleh dari hasil uji tarik. Pengaturan *stop* pada mesin secara otomatis disetiap jumlah siklus tertentu bertujuan agar retak dapat diobservasi dengan menggunakan *dinolite digital microscope*.
 24. Kemudian klik OK dan *Run Test*
- c. Pengamatan Fraktografi
- Pengamatan fraktografi bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur mikro setelah dilakukannya pengujian perambatan retak fatik. EDS dan XRD digunakan untuk mengetahui karakterisasi perilaku retak fatik melalui perubahan fasa-fasa. Data kuantitatif dan kualitatif dari hasil OM, SEM, EDS dan XRD digunakan untuk mempelajari perilaku retak fatik siklus tinggi melalui perubahan struktur mikro dan perubahan fasa dalam bahan magnesium AZ31B.

3.5 Pengambilan Data

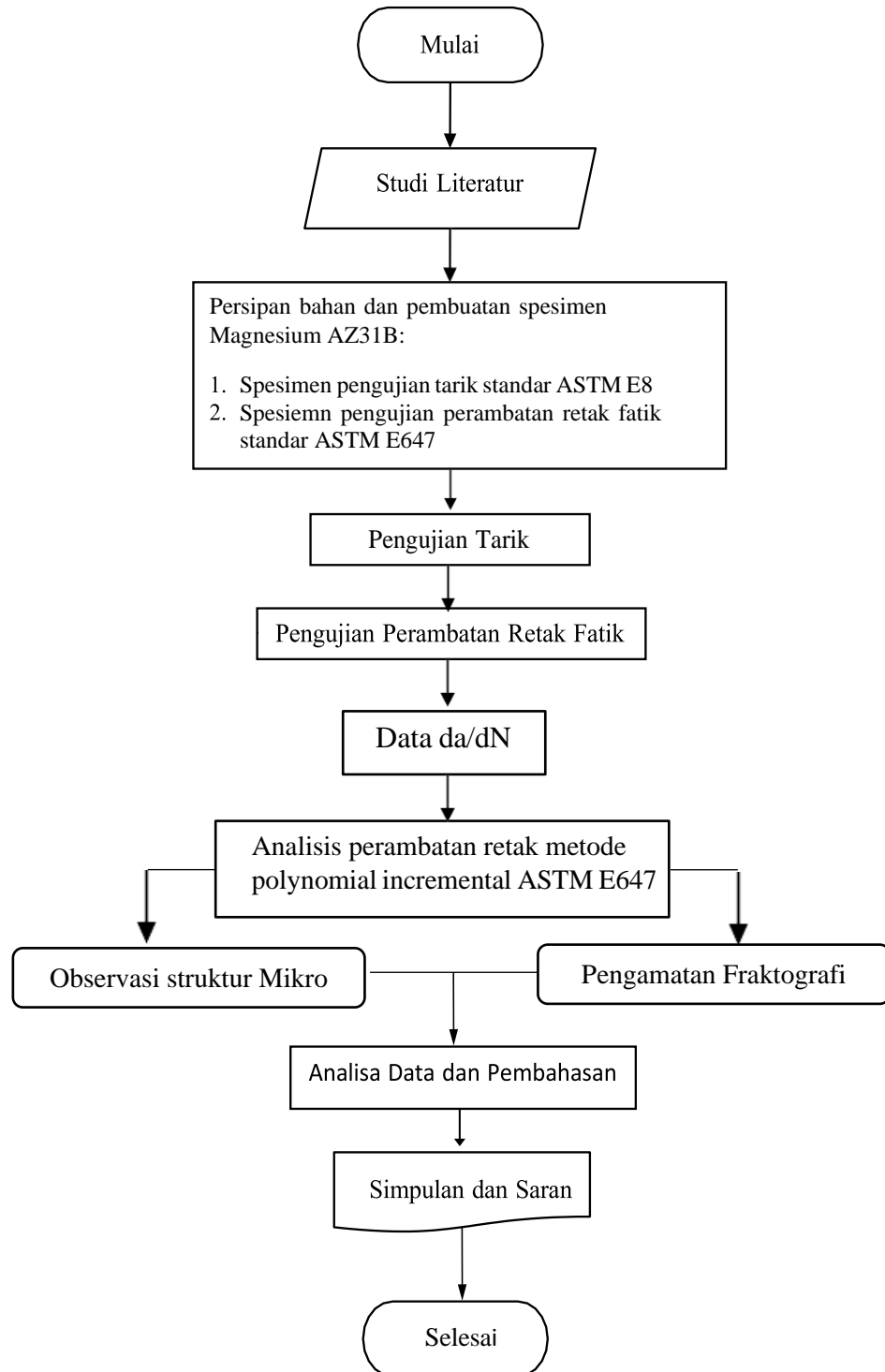
Adapun data yang diambil untuk memperoleh data pada proses pengujian yang dijalankan ialah sebagai berikut :

Tabel 3.5 Data Uji Tarik

Spesimen	Tegangan (MPa)		Energi Plastis (kJ)	Energi Elastis (kJ)	Modulus Elastisitas (GPa)	Elongasi Total (%)
	σ_y Luluh (MPa)	σ_{max} Ultimate (MPa)				
Magnesium						
AZ31B						

3.6 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur pada penelitian ini ialah sebagai berikut :



Gambar 3.10 Prosedur Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang dapat penulis berikan dari hasil penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. Perambatan retak pada magnesium AZ31B dengan diberi beban 1 kN laju perambatan merambat dengan cepat. Pada 35.566 siklus spesimen mengalami patah dengan panjang retak sebesar 20,0032 mm.
2. Laju perambatan retak fatik pada magnesium AZ31B ialah $\frac{da}{dN} = 3.747 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3.067}$ dan pada magnesium AZ31 $\frac{da}{dN} = 3.654 \times 10^{-11} (\Delta K)^{4.020}$. Pengujian magnesium AZ31B dan magnesium AZ31 dilakukan dengan beban yang sama 1 kN pada saat nilai intensitas tegangan semakin tinggi laju perambatan retak magnesium AZ31 lebih cepat dan tidak stabil dibandingkan magnesium AZ31B.
3. Hasil dari SEM daerah patahan magnesium AZ31B pada perbesaran 1500x terlihat *cleavage*, *cleavage* merupakan ciri patahan getas dengan ditandai dengan bentuk retakan seperti alur sungai dan *secondary crack*, *secondary crack* terjadi karena saat pembebanan fatik. Pada perbesaran 3000x terlihat pola retakan Intergranular, pola retakan Intergranular disebabkan oleh ukuran butir yang lebih besar dan tinggi. Garis striasi disebabkan majunya ujung retakan yang bergerak setiap satu siklus pembebanan.

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan oleh penulis ialah sebagai berikut :

1. Pada penelitian selanjutnya spesimen diberi perlakuan panas seperti multi austemper dan lainnya.
2. Pada penelitian selanjutnya spesimen di uji dengan mengikuti arah roll.
3. Pada penelitian ini diharapkan spesimen di uji dengan bervariasi beban yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ammirudin, A., & Lubis, F. A. 2018. Analisa Lelah Material Tembaga Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine. *Jurnal Ilmiah MEKANIK*. 4(2), 7.
- ASTM E647. 2000. "Standart Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates" ASTM International. West Conshohocken.
- ASTM E647. 2004. "Metal Test Methods and Analytical Prosedur, Annual Book of ASTM Standart", Sec.3, Vol. 03.01, pp,615-657, *Bar Harbor Drive*, West Conshohocken.
- Bhakti, D. G., Gunawan, D. H., Yusuf, U. 2013. Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Hasil Las dan Titik Brazing Untuk Industri Rumahan. *Jurnal Teknik Mesin*. Universitas Dipenogoro S-1, Vol. 1, No 2.
- Broek, D., 1986. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Kluwer Academics Publiser, London UK.
- Budiman, H. (2016). Analisis Pengujian Tarik (tensile test) pada baja st37 dengan alat bantu ukur load cell. *J-ENSITEC*, 3(01).
- Cholis, S. N., Suharno., Yadiono. 2013. Pengaruh Penambahan Unsur Magnesium (Mg) Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Pada Pengecoran Almunium. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Mesin*, 2(1).
- Endo, K., Yamada, S., Todoh, M., Takahata, M., Iwasaki, N., & Tadano, S. 2016. Structural Strength of Cancellous Specimens from Bovine Femur Under Cyclic Compression. *PeerJ*, 4, e1562.

- Farabaenic, L., Williams, C. L., Kecskes, L., Ramesh, K. T., & Becker, R. 2016. Microstructural effects on the spall properties of ECAE-processed AZ31B magnesium alloy." *International Journal of Impact Engineering* **98**: 34-41.
- Fouad, Y. & M. El Batanouny (2011). "Effect of surface treatment on wear behavior of magnesium alloy AZ31." *Alexandria Engineering Journal* **50**(1): 19-22.
- 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**: 105803.
- Lande, S. N., Hidayat, P. I., Jatimurti, W. 2019. SIMULASI PERAMBATAN RETAK PADA BAJA DAN ALMUNIUUM AKIBAT PEMBEBANAN STATIS DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA. **8**, 188-193.
- Matweb, Material Property Data. Magnesium AZ31B-F, Extruded Solid Shapes. . Diakses pada 23 Oktober 2023.
- Morita, S., ohno, N., Tamai, F., and Kawakami, Y. 2010. *Fatigue properties of rolled AZ31B magnesium alloy plate. Transactions of Nonferrous Metals Society Of China*, 20, S523-s526.
- Salindeho, R. D., Soukota, J., & Poeng, R. 2013. Pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material. *JURNAL POROS TEKNIK MESIN UNSRAT*, 2(2).
- Springer, Verlag Berlin Heidelberg. 1998. *Metal Forming Handbook/ Schuler (c)*. Die Deutsche Bibliothek – CIP- Einheitsaufnahme. Berlin.
- Sugiarto., Soenoko, R., Purnowidodo, A., Irawan, S. Y. 2016. Perubahan Laju Perambatan Retak Dissimilar Welding Akibat Penambahan Fluks Magnet. *Jurnal ITN Malang*, 2085-4218.

- Sukmana, I, Ibrahim Fauzi, Baddarudin Mohammad, dan Nur Hadi. 2022. Low Cycle Fatigue Properties Of Extruded Magnesium AZ31B. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Mesin. Universitas Lampung, Vol. 50 No. 3.
- Wang, B. S., Yan, F. Z., Zhang, X. H., He, L. X., Dong, P., Wang, X. W., & Wang, R. Z. 2022. Acoustic and thermal energy evolution of AZ31B magnesium alloy under static tensile deformation. *Journal of Materials Research and Technology*. 26, 4455-4468.
- Wartono. 2020. Pengaruh Shot peening terhadap Laju Perambatan Retak Fatik Sambungan Friction Stir Welding pada Aluminium Seri 5083. *Jurnal Engine*. 20-26.
- 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.
- Wong, T. W., Hadadzadeh, A., & Wells, M. A. 2018. "High temperature deformation behavior of extruded AZ31B magnesium alloy." *Journal of Materials Processing Technology* **251**: 360-368.
- Yamada, R., Yoshihara, S., Ito, Y. 2021. Fatigue Properties of AZ31B Magnesium Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Metals*-11-01191.