

ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31

(Skripsi)

Oleh

RIFQIL AZIZ

NPM 2015021069



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

ABSTRAK

ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31

Oleh

RIFQIL AZIZ

Penelitian ini menganalisis perambatan retak fatik pada Magnesium AZ31. Magnesium AZ31 merupakan salah satu jenis paduan magnesium yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Penelitian melibatkan pengujian tarik, pengujian perambatan retak fatik, pengamatan struktur mikro, dan pengamatan SEM fraktografi. Hasil pengujian tarik mendapatkan tegangan luluh sebesar 193.96 MPa, tegangan *ultimate* 226.74 MPa, dan elongasi 13.8 %. Data panjang retak dan jumlah siklus dianalisis menggunakan metode *polynomial incremental* untuk menentukan laju perambatan retak fatik (da/dN) dan kisaran faktor intensitas tegangan (ΔK). Data tersebut diplot menjadi kurva hubungan faktor intensitas tegangan (ΔK) dan laju perambatan retak fatik (da/dN) untuk mendapatkan persamaan yang menghasilkan $C = 3.654 \times 10^{-11}$ dan $m = 4.020$. Pengamatan struktur mikro pada Magnesium AZ31 butiran kasar lebih mendominasi daripada butiran halus. Hasil SEM mengungkapkan pola patahan *transgranular*, *secondary crack*, dan *voids*.

Kata Kunci : Magnesium AZ31, uji tarik, retak fatik, struktur mikro.

ABSTRACT

analysis of fatigue crack propagation in magnesium AZ31

by

RIFQIL AZIZ

This research analyzes fatigue crack propagation in Magnesium AZ31. Magnesium AZ31 is a type of magnesium alloy that is commonly used in various industrial applications. The study involves tensile testing, fatigue crack growth testing, microstructure observation, and SEM fractography observation. The tensile test results show a yield strength of 193.96 MPa, an ultimate tensile strength of 226.74 MPa, and an elongation of 13.8 %. . Crack length and the number of cycles data were analyzed using the polynomial incremental method to determine the fatigue crack growth rate (da/dN) and the stress intensity factor range (ΔK). The data is plotted into a stress intensity factor curve (ΔK) and fatigue crack growth rate (da/dN) to get the resulting equation $C = 3.654 \times 10^{-11}$ dan $m = 4.020$. Microstructure observations in Magnesium AZ31, coarse particles dominate more than fine particles. SEM results reveal intergranular fracture patterns, secondary cracks, and voids.

Keywords: Magnesium AZ31, tensile test, fatigue crack, microstructure

ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31

Oleh

Rifqil Aziz

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 AZ31**

Nama Mahasiswa : **RIFQIL AZIZ**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015021069**

Program Studi : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 1972121119988031002

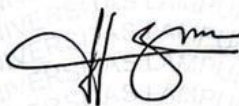
Komisi Pembimbing 2



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

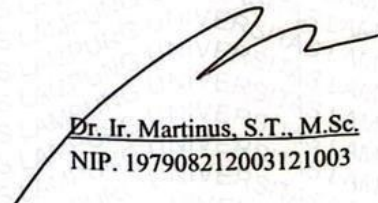
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Ir. 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

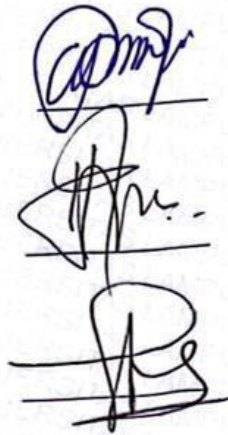
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

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



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 2 Agustus 2024

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi dengan judul "ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK MAGNESIUM AZ31" dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat siapapun sebagaimana diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 9 Agustus 2024

Yang membuat pernyataan



Rifqil Aziz
NPM.2015021069

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tangerang pada tanggal 12 September 2001, yang merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Roslan dan Ibu Agus LeoLita. Penulis memulai pendidikan pertama kali di Taman Kanak-kanak (TK) darmawanita dan menyelesaikannya pada tahun 2008, lalu menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 3 Kuripan pada tahun 2014. Kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Kotaagung dan menyelesaikannya pada tahun 2017. Selanjutnya penulis menyelesaikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Gadingrejo pada tahun 2020.

Selanjutnya pada tahun 2020 penulis tercatat sebagai mahasiswa Universitas Lampung pada Fakultas Teknik yang diterima melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam kegiatan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin sebagai anggota bidang penelitian dan pengembangan pada tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis aktif dalam organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik sebagai staff ahli divisi PORAKRESMA dan juga penulis aktif dalam pertukaran mahasiswa pada program permata sari. Pada tahun 2023 penulis mengikuti program MSIB pada program Neosia dan pada tahun yang sama penulis melakukan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. Tirta Investama Tanggamus dalam satuan kerja Produksi dengan judul “ **Analisis Perhitungan Laju Keausan Pada Spocket di Table Top Chain Conveyor Pada Mesin Bardi di PT. Tirta Investama Tanggamus**”. Kemudian penulis melakukan penelitian yang berjudul “**Analisis Perambatan Retak Fatik Magnesium AZ31**” dimana dilakukannya penelitian ini untuk menyelesaikan tugas akhir di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik.

MOTTO

“Disiplin itu tidak mengekang, tapi memberi kebebasan”

(Panji pragiwaksono)

“Saat mendapatkan yang diinginkan, itu adalah petunjuk Allah Swt. Saat tidak mendapat yang diinginkan, itu adalah perlindungan dari Allah Swt”

(Ali bin Abi Thalib)

“Orang tua di rumah menanti kepulanganmu dengan hasil yang membanggakan, jangan kecewakan mereka. Simpan keluhmu, sebab letihmu tak sebanding dengan perjuangan mereka menghidupimu”

(*Unknown*)

“Tidak akan melakukan sesuatu yang tidak harus dilakukan, tapi jika harus dilakukan, selesaikan secepat mungkin”

(Rifqil Aziz)

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu wa ta'ala, karya ini
dipersembahkan kepada :

Kedua Orang Tuaku

Ayah dan Bunda

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

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 AZ31”. 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

A handwritten signature in dark ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a stylized representation of the author's name.

Rifqil Aziz

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan baik. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, para sahabat, keluarga serta pengikutnya yang tetap istiqomah hingga akhir zaman. Penulisan skripsi yang berjudul “Analisis Perambatan Retak Fatik Magnesium AZ31” merupakan syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis sangat berharap karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal dapat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari khususnya pada bidang itu sendiri. Skripsi ini dapat terselesaikan karena dukungan dan keterlibatan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Ayahku Roslan, S.Pd., M.M dan Bundaku Agus Leolita, atas segala nasihat yang telah diberikan, atas segala semangat yang selalu diberikan, atas segala materi untuk memberikan pendidikan terbaik untuk anak-anak nya, serta segala doa yang dipanjatkan untuk kesuksesan semua anak-anaknya.
2. Taufiqurahman, sebagai adik yang selalu memberikan doa dan semangat selama menjalani perkuliahan.
3. Keluarga Besar, sebagai sanak saudara terdekat yang selalu memberikan support kepada penulis.
4. Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan selalu mendampingi penulis dengan sabar dalam proses penyusunan skripsi hingga terselesaikan secara terstruktur.

5. Harnowo Supriadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan saran serta masukan dengan tenang kepada penulis selama proses pengerjaan skripsi ini.
6. Zulhanif, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan tanpa pernah menyalahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
7. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.,Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
8. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
10. Rekan Laboratorium Material Teknik Mesin yang sudah bersedia menjadi teman serta membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Ghilman, Prantama, Fahmi, Bagus, Rizky, Kartika yang telah menemani saat suka maupun duka selama perkuliahan.
12. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
13. Seluruh saudara-saudara yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
14. Teman angkatan 2020 Teknik Mesin yang telah memberikan informasi- informasi terkait penyelesaian skripsi.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat pada skripsi ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Besar harapannya agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca. Aamiin.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	xiv
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 AZ31	7
2.3 Struktur Mikro	12
2.4 Pengujian Tarik.....	13
2.5 <i>Fatigue</i>	16
2.6 Laju perambatan retak	18
2.7 Metode <i>Compliance</i>	20
2.8 Metode polynomial incremental	24
III. METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2 Bahan yang Digunakan.....	25
3.3 Alat yang Digunakan.....	26
3.4 Prosedur Pengujian	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Data Hasil Pengujian Tarik.....	36
4.2 Data Hasil Dan Pembahasan Pengujian FCG (<i>fatic crack growth</i>)	40
4.3 Analisis Struktur Mikro	44
4.3 Analisis <i>scanning electron microscope</i> (SEM).....	46
V. PENUTUP	49
5.1 Simpulan	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 struktur mikro AZ31 setelah uji tarik	12
Gambar 2.2 Grafik regangan-tegangan	13
Gambar 2.3 Geometri Spesimen CT	21
Gambar 2.5 Siklus perambatan retak	23
Gambar 3.1 Spesimen uji tarik Magnesium <i>alloy</i> AST B557.....	25
Gambar 3.2 Spesimen Uji Fatik Standar ASTM E647	26
Gambar 3.3 MTS landmark 100 kN	26
Gambar 3.4 Microscop optik.....	27
Gambar 3.5 <i>Dinolite digital microscope</i>	27
Gambar 3.6 SEM (<i>scanning electrone microscope</i>).....	28
Gambar 3.7 Jangka sorong.....	28
Gambar 3.8 <i>Clip on displacement gages</i>	29
Gambar 4.1 Spesimen Uji Tarik.....	36
Gambar 4.2 Kurva tegangan regangan Magnesium AZ31.....	37
Gambar 4.3 Kurva hubungan <i>engineering strain versus strain hardening rate</i> Magnesium AZ31.....	39
Gambar 4.4 Kurva hubungan siklus dan panjang perambatan retak Magnesium AZ31	41
Gambar 4.5 Kurva hubungan faktor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak fatik Magnesium AZ31.....	42

Gambar 4.6 Spesimen Pengujian Mikrografi	44
Gambar 4.7 Mikrostruktur Mg AZ31 dengan perbesaran 500x.....	45
Gambar 4.8 SEM Mg AZ31 dengan perbesaran (a)1500x, (b)3000x	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Magnesium AZ31	8
Tabel 2.2 Sifat fisik magnesium AZ31	11
Tabel 2.3 Nilai <i>compliance coefficient</i>	22
Tabel 3.1 <i>Out Side Micrometer</i>	29
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Clip on displacement gages</i>	30
Tabel 3.2 Data Pengujian Tarik Magnesium AZ31	38

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Magnesium AZ31 merupakan salah satu jenis paduan magnesium yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Nama AZ31 mengacu pada komposisi paduan ini, yang terdiri dari magnesium (Mg) dan unsur-unsur lain yang membentuk paduan tersebut. Paduan magnesium AZ31 mengandung sekitar 3% aluminium (Al) dan sekitar 1% seng (Zn). Kode "AZ31" sendiri mengacu pada proporsi relatif dari aluminium (Al) dan seng (Zn) dalam paduan tersebut. Proporsi ini dapat sedikit bervariasi tergantung pada spesifikasi paduan tertentu. Seperti halnya semua magnesium, AZ31 memiliki densitas yang rendah, sehingga paduan ini sangat ringan. Meskipun ringan, AZ31 memiliki kekuatan yang cukup baik, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan kombinasi antara ringan dan kekuatan. (Essadiqi et al., 2012)

AZ31 memiliki resistensi terhadap korosi yang cukup baik, terutama jika diberi perlindungan permukaan atau pelapisan tambahan. Magnesium AZ31 digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam komponen otomotif, seperti roda mobil, klip panel, dan bagian struktural lainnya karena ringan dan kekuatannya, lalu digunakan dalam industri penerbangan untuk komponen struktural pesawat ringan, dan juga kadang-kadang digunakan dalam pembuatan peralatan elektronik karena sifat listrik dan termal yang baik. Digunakan dalam pembuatan berbagai perlengkapan olahraga seperti kerangka sepeda, peralatan hiking, dan sebagainya (Grandfield, 2012).

Salah satu jenis kerusakan atau kegagalan yang disebabkan oleh beban berulang adalah fatik. Menurut Adam (2011), kerusakan yang disebabkan oleh fatik memiliki tiga fase: retak pengintian (*crack initiation*), retak perambatan (*crack propagation*), dan patah statik (*fracture*). Adanya adanya takikan dan beban dinamis pada material adalah penyebab umum dari fenomena fatik ini. Karena geometri permukaan struktur semakin sempurna, umur fatik struktur akan semakin tinggi. Di bidang teknologi, banyak kerusakan akibat fatik. Secara umum, kerusakan ini disebabkan oleh cacat atau retakan dan pembebanan selama operasi (Hasan, 2007). Retakan yang semakin panjang akan memengaruhi kekuatan struktur suatu bahan.

Menurut penelitian Dhinakaran (2014) menyatakan bahwa tingkat pertumbuhan retak dengan kondisi temperatur ruang pada umumnya berada dalam rentang frekuensi antara 0,1 Hz sampai dengan 5 Hz dan peningkatan laju perambatan retak dipengaruhi oleh peningkatan intensitas tegangan. Semakin besar intensitas tegangan maka frekuensinya juga semakin besar. Selain itu, perilaku perambatan retak fatik baja butir kasar memiliki resistensi yang lebih besar dibandingkan pada baja butir halus. Ukuran butir dengan perilaku perambatan retak fatik berpengaruh pada kekasaran suatu material (Dhinakaran & Prakash, 2014)

Dari beberapa referensi dan literatur serta pengujian yang telah dilakukan pada penelitian terdahulu, sesuai dengan keterangan tersebut mengenai perambatan retak dan struktur mikro menjadi perhatian untuk melakukan penelitian. Maka penulis tertarik melakukan penelitian dengan judul **“Analisa Perambatan Retak Fatik Magnesium AZ31 ”**.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perambatan retak fatik pada magnesium AZ31
2. Menganalisis struktur mikro pada magnesium AZ31

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. spesimen tidak diberikan perlakuan panas.
2. Spesimen tidak diberikan perlakuan permukaan.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dalam melakukan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan latar belakang dari masalah yang akan dibahas, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari penelitian yang akan dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada Tinjauan pustaka menjelaskan tentang landasan teori-teori yang berhubungan dengan pembahasan yang dilakukan.

III. METODE PENELITIAN

Pada bab ini memuat tentang hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu tempat penelitian, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian dan diagram alur penelitian.

IV. DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan tentang data yang didapatkan dari pengamatan, dan pembahasan dari data-data yang diperoleh setelah proses pengujian.

V. PENUTUP

Bab ini menjelaskan mengenai kesimpulan yang didapatkan dari hasil dan pembahasan penelitian serta saran yang dapat diberikan penulis setelah melaksanakan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan oleh penulis untuk dapat menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

Berisikan pelengkap laporan penelitian seperti foto-foto dan data yang mendukung laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnesium

Magnesium Logam (Magnesium Elemental) adalah bentuk dasar atau murni dari unsur kimia magnesium (Mg) dalam wujud logam. Magnesium adalah salah satu unsur alkali tanah yang terdapat dalam bentuk logam. Magnesium terdapat beberapa jenis sebagai berikut :

2.1.1 Magnesium Logam (Magnesium Elemental)

Magnesium logam atau magnesium elemental adalah bentuk dasar atau murni dari unsur kimia magnesium (Mg) dalam wujud logam. Magnesium adalah salah satu unsur alkali tanah yang terdapat dalam bentuk logam. Karakteristik dari magnesium logam yaitu kering, ringan, mudah terbakar, dan konduktivitas listrik yang baik.

2.1.2 Magnesium Karbonat (Magnesite)

Magnesium Karbonat, juga dikenal sebagai magnesite, adalah senyawa kimia yang terdiri dari magnesium, karbon, dan oksigen dengan rumus kimia MgCO_3 . Ini adalah salah satu bentuk garam magnesium yang ditemukan secara alami dan digunakan dalam berbagai aplikasi salah satunya digunakan dalam proses pengeboran minyak dan gas bumi sebagai pengeboran tahan panas. Sifat kimia dari magnesite adalah tahan terhadap panas dan juga tahan terhadap korosi.

2.1.3 Magnesium Oksida (Magnesia)

Magnesium Oksida, juga dikenal sebagai magnesia, adalah senyawa kimia yang terdiri dari magnesium (Mg) dan oksigen (O) dengan rumus kimia MgO . Ini adalah bahan padat putih atau abu-abu yang memiliki sejumlah aplikasi penting dalam berbagai bidang salah satunya pada industri logam, magnesium oksida digunakan dalam proses pembuatan logam ferroalloy dan juga digunakan untuk berbagai aplikasi katalik.

2.1.4 Magnesium Sulfat (Garam Epsom)

Magnesium sulfat disebut juga garam Epsom merupakan senyawa kimia yang terdiri dari magnesium (Mg), sulfur (S) dan oksigen (O) dengan rumus kimia $MgSO_4$. Garam epsom adalah garam magnesium yang tersedia dalam bentuk padat atau bubuk dan memiliki banyak kegunaan di berbagai bidang salah satunya digunakan dalam dunia pertanian, garam Epsom digunakan sebagai sumber magnesium dan belerang yang penting untuk pertumbuhan tanaman. Ini membantu tanaman menghasilkan klorofil dan merupakan nutrisi penting bagi tanaman.

2.1.5 Magnesium Aspartat

Magnesium aspartat adalah bentuk suplemen magnesium yang dipergunakan untuk suplemen makanan dan nutrisi. Magnesium ini tersusun dalam molekul asam amino aspartat yang terikat pada ion magnesium. Ini adalah salah satu dari beberapa bentuk magnesium yang digunakan sebagai suplemen untuk meningkatkan kadar magnesium dalam tubuh.

2.1.6 Magnesium Hidroksida

Magnesium hidroksida merupakan senyawa kimia yang terdiri dari magnesium (Mg), oksigen (O) dan hidrogen (H) dengan rumus kimia $Mg(OH)_2$. Ini adalah senyawa kimia padat berwarna putih yang digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk bidang medis dan farmasi. Magnesium hidroksida dapat digunakan dalam berbagai proses industri, termasuk sebagai bahan pengendap dalam pengolahan limbah atau dalam produksi bahan kimia lainnya (Sillekens & Bormann, 2012).

2.1.7 Magnesium Serbuk (*Magnesium Powder*)

Bubuk magnesium (*magnesium powder*) adalah bentuk magnesium dalam bentuk bubuk halus atau bubuk yang terbuat dari magnesium murni. Magnesium adalah suatu unsur kimia dengan simbol Mg dan nomor atom 12. Ketika magnesium digiling menjadi bubuk halus, magnesium memiliki sifat fisik dan kimia yang unik sehingga dapat diterapkan dalam berbagai industri di berbagai industri. Magnesium bubuk digunakan di berbagai industri, termasuk otomotif, dirgantara, metalurgi, dan konstruksi. Dalam industri otomotif dan dirgantara, bubuk magnesium dapat digunakan dalam proses seperti pelapisan, pengecoran, dan produksi suku cadang mesin serta suku cadang struktural ringan.

2.2 Magnesium AZ31

Magnesium (Mg) adalah suatu unsur terbanyak keempat (setelah besi, oksigen dan silikon). Magnesium membentuk 2% dari massa kerak bumi Bumi pada saat itu . Magnesium memiliki beberapa Keuntungan ringan, mudah bereaksi logam lain, memiliki sifat mudah terbakar, Magnesium juga banyak digunakan dalam komponen peralatan industri, produk otomotif, dan pertanian, karena sifatnya ringan . Selain digunakan dalam industri Magnesium telah banyak diteliti dan dikembangkan untuk bidang bahan biologi khususnya di dunia ortopedi. Karena pada tubuh orang dewasa Mengandung kurang lebih 24 gram magnesium dengan 60 tahun meresap ke dalam tulang (Luo, 2013).

Magnesium AZ31 memiliki beberapa karakteristik salah satunya ringan dan kuat. Paduan magnesium AZ31 memiliki kepadatan rendah, menjadikannya salah satu paduan logam paling ringan yang tersedia. Meskipun bobotnya ringan, paduan ini memiliki daya tahan yang cukup baik sehingga sering digunakan pada aplikasi yang membutuhkan komponen yang kuat dan ringan. Magnesium AZ31 juga mempunyai ketahanan terhadap korosi yang baik, terutama jika dibandingkan dengan logam lain seperti baja. Pada industri

otomotif, magnesium AZ31 banyak digunakan dalam pembuatan bagian-bagian mesin, roda, dan berbagai bagian struktural kendaraan yang perlu bobot yang ringan (Kaibyshev, 2012).

Magnesium AZ31 digunakan dalam industri manufaktur untuk membuat mal untuk pengecoran yang bertekanan tinggi, seperti bagian-bagian yang diperlukan dalam industri elektronik. Dalam industri penerbangan, magnesium AZ31 digunakan karena sifatnya ringan dan memiliki ketahanan yang cukup baik. Dalam dunia penerbangan, setiap tambahan kilogram berat sebuah pesawat dapat memengaruhi performa, efisiensi, dan konsumsi bahan bakar. Komponen struktur pesawat, komponen mesin, komponen system avionic, dan ekor pesawat juga menggunakan magnesium AZ31. Terdapat beberapa komposisi yang terkandung dalam magnesium AZ31, yaitu :

Tabel 2.1 Komposisi Magnesium AZ31 (Burhanuddin et al., 2018)

Element	Composition (wt %)
aluminium (Al)	3.08
zink (Zn)	0,76
ferrum (Fe)	0,005
Mangan (Mn)	0,15
Silikon (Si)	0,01
Nikel (Ni)	0,002

Menurut penelitian yang dilakukan Burhanuddin dkk, (2018) untuk komposisi yang terkandung dalam magnesium AZ31 diantaranya aluminium (Al) sebesar 3,08%, lalu zink (Zn) sebesar 0,76%, ferrum (Fe) sebesar 0,005%, mangan (Mn) sebesar 0,15%, silikon (Si) sebesar 0,01%, nikel (Ni) sebesar 0,002%. Unsur-unsur pada magnesium AZ31 sangat berpengaruh pada hasil akhir magnesium AZ31B. Adapun unsur- unsurnya magnesium AZ31 sebagai berikut :

2.2.1. Aluminium (Al)

Aluminium merupakan unsur logam tetapi termasuk logam yang tidak berat. Penambahan unsur aluminium (Al) pada magnesium AZ31 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 memiliki berbagai kegunaan dalam industri, seperti dalam pembuatan kendaraan, pesawat terbang, bangunan, kemasan makanan, dan banyak lagi. Aluminium memiliki sifat-sifat yang menguntungkan, seperti ringan, tahan korosi, dan mudah dibentuk (Mizhar & Fauzi, 2016).

2.2.2. Zink (Zn)

Unsur paduan zink pada magnesium AZ31 memberikan peningkatan ketahanan korosi, zink juga menyerap elektron dari logam dan melapisi sehingga reaksi oksidasi berkurang. Unsur paduan zink pada magnesium AZ31 sebesar 0.76%. Zink memiliki sifat kuat dan kemampuan untuk memperkuat sifat mekanis, yang dapat membantu meningkatkan daya tahan dan ketahanan tekanan paduan magnesium AZ31.

2.2.3. Ferrum (Fe)

Ferrum merupakan salah satu unsur paduan magnesium AZ31, Besi atau ferrum dalam jumlah kecil dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan paduan magnesium AZ31. Besi dapat mempengaruhi sifat termal paduan, seperti konduktivitas termal dan perubahan dimensi saat pemanasan dan pendinginan.

2.2.4. Mangan (Mn)

Mangan (Mn) adalah unsur kimia yang dapat digunakan sebagai bahan tambahan atau paduan dalam beberapa paduan magnesium. Kehadiran mangan dalam magnesium dapat memberikan beberapa sifat khusus atau meningkatkan performa paduan tersebut. Mangan dapat meningkatkan ketahanan terhadap aus pada magnesium, membuatnya lebih tahan terhadap deformasi plastis atau keausan. Mangan pada magnesium AZ31 memiliki komposisi sebanyak 0,15%.

2.2.5. Silicon (Si)

Unsur paduan silikon pada magnesium AZ31 sebesar 0,01%, selain untuk peningkatan kekerasan dan kekuatan, silikon juga meningkatkan kemampuan pemrosesan panas yang artinya mempengaruhi kemampuan paduan magnesium untuk diproses secara termal, seperti pemadatan panas dan perlakuan panas lainnya. Silikon dapat meningkatkan sifat tahan panas paduan magnesium, membuatnya lebih tahan terhadap suhu tinggi (Saputro, 2014).

2.2.6. Nikel (Ni)

Unsur paduan nikel pada magnesium sebesar 0,002%. nikel (Ni) pada paduan magnesium dapat memberikan beberapa sifat dan manfaat tertentu. Nikel meningkatkan kekuatan mekanis paduan magnesium, termasuk kekuatan tarik dan kekerasan. Hal ini dapat membuat paduan magnesium lebih tahan terhadap beban mekanis. Nikel dapat meningkatkan kemampuan paduan magnesium untuk diproses, termasuk proses pembentukan. Ini dapat membuat produksi dan pengolahan paduan lebih efisien. nikel dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi pada suhu tinggi (Irfansyah, 2023).

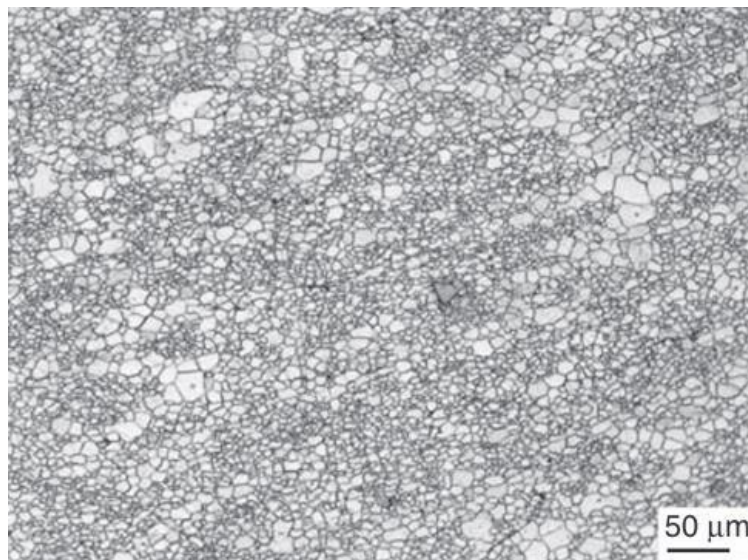
Menurut penelitian yang dilakukan Burhanuddin dkk, (2018) untuk sifat fisik magnesium AZ31 tertera pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Sifat fisik magnesium AZ31 (Iqbal *et al.*, 2018)

Sifat fisik	Paduan magnesium
Titik cair, K	922 K (648,85 °C)
Titik didih, K	1380 K (115,85 °C)
Energi ionisasi 1	738 kJ/mol
Energi ionisasi 11	1450 kJ/mol
elektronegatifitas	1,31
Kerapatan Massa (p)	1,74 g/cm ³
Potensial reduksi standar	-2,38
Jari-jari atom	1,60 Å
Kapasitas panas	1,02 J/gK
Potensial ionisasi	7,646 vol
Konduktivitas kalor	156 W/mK
Entalpi penguapan	127,6 kJ/mol
Entalpi pembentukan	8,95 kJ/mol

2.3 Struktur Mikro

Struktur mikro adalah struktur yang paling kecil didalam suatu material. Keberadaaan 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.

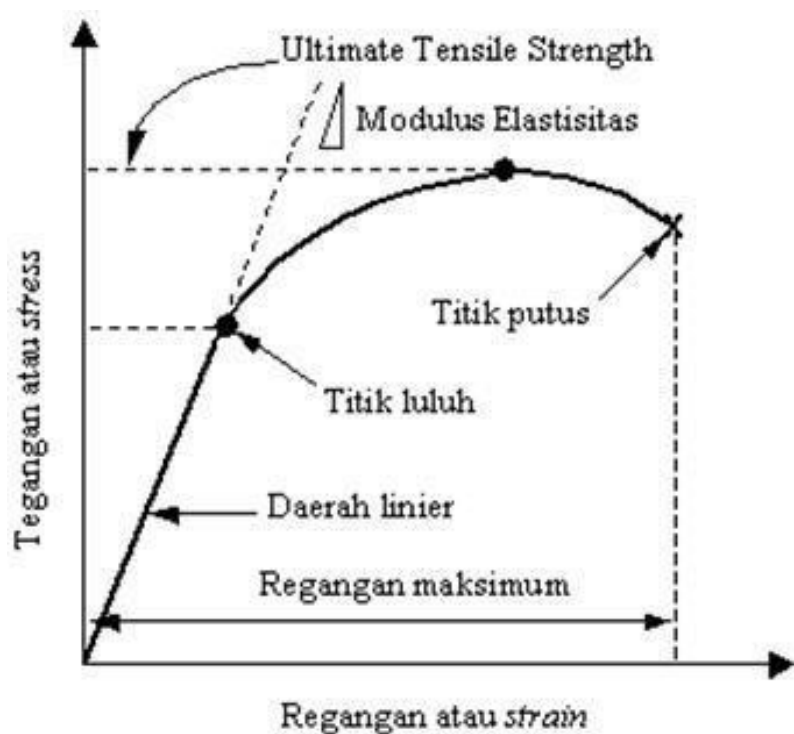


Gambar 2.1 struktur mikro AZ31 setelah uji tarik (Lapovok & Estrin, 2012)

Struktur mikro yang diobservasi oleh Lapovok (2012) pada magnesium AZ31 yang mengalami pengujian tarik. Pada gambar 2.1 mendapatkan struktur mikro bimodal, dan ukuran butir yang akurat tidak dapat dihitung dari ukuran butir rata-rata. Dimana butiran kasar berukuran 3-17 μm dan butiran halus berukuran kurang dari 4 μm . garis putus-putus kasar warna putih menunjukan lokasi distribusi tegangan.

2.4 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan pengujian yang digunakan untuk mengetahui sifat-sifat suatu bahan. Dalam uji tarik, suatu bahan diregangkan hingga putus untuk mengetahui bagaimana respon bahan terhadap gaya tarik dan untuk menentukan seberapa besar pertambahan panjang bahan.. Pengujian tarik merupakan pengujian mekanis (tegangan-regangan) yang menentukan ketahanan suatu material terhadap gaya tarik. Selama uji tarik, gaya dan perpanjangan sampel diukur. Hasil uji tarik mencatat hubungan tegangan-regangan selama pengujian, sehingga dapat dibuat kurva. Dari kurva tegangan-regangan dapat dilakukan analisis daerah elastis dan plastis. Selain itu dapat mengetahui nilai kekuatan luluh dan juga *ultimate tensile strenght* (UTS).



Gambar 2.2 Grafik regangan-tegangan (Iswandi, 2015)

Hasil uji tarik dapat memberikan informasi mengenai kekuatan luluh, kekuatan tarik, regangan putus, keuletan, elastisitas dan sifat mekanik lainnya..Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik yang harus mempunyai daya rekat tinggi dan kekerasan yang tinggi.Kurva hasil uji

tarik menunjukkan hubungan antara gaya tarik dengan perubahan panjang. Pengujian tarik penting dalam proses desain menggunakan bahan-bahan tersebut. Kurva tegangan-regangan dapat diperoleh dari hasil pengukuran elongasi yang dilakukan pada sampel, dimana tegangan yang digunakan adalah rata-rata tegangan longitudinal hasil uji tarik yang diperoleh dan dibagi dengan penampang awal kepala benda.

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

Dimana:

σ : Tegangan Tarik (N/m² atau Pa)

F : Gaya (N)

A : Luas penampang (m²)

Regangan yang digunakan pada kurva merupakan rata-rata regangan linier yang dihasilkan dari pembagian perpanjangan pada panjang ukur (gage length) spesimen uji (ΔL) dengan panjang awal L_0 .

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

Dimana:

ε : Regangan

ΔL : Perubahan Panjang (mm)

L_0 : Panjang awal material (mm)

L : Panjang akhir material (mm)

Untuk jarak tertentu dari asal nilai-nilai eksperimental tegangan-regangan pada dasarnya terletak pada satu garis lurus. Dalam hal ini berlaku untuk semua bahan atau yang dikenal dengan hukum hooke. Dimana kurva tegangan-regangan berdasarkan hukum hooke dirumuskan dengan persamaan berikut:

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

Dimana:

E : Modulus elastisitas (Gpa)

σ : Tegangan (Mpa)

ε : Regangan

Laju pengerasan regangan adalah ukuran perubahan tegangan yang diperlukan untuk menyebabkan perubahan regangan plastis dalam suatu material. Ini mengindikasikan seberapa cepat material menjadi lebih kuat dan lebih keras saat mengalami deformasi plastis. *Strain hardening* terjadi pada material logam dan mengalami dua dislokasi yakni yaitu dislokasi dalam unit sel dan dislokasi yang disebabkan oleh deformasi plastis. Semakin tinggi laju pengerasan regangan, semakin cepat material tersebut menguat dan mengeras saat mengalami deformasi plastis. Ini berarti bahwa material dengan laju pengerasan regangan tinggi akan lebih tahan terhadap deformasi plastis lebih lanjut setelah mengalami beberapa deformasi

Untuk mendapatkan laju pengerasan regangan maka nilai regangan yang sebenarnya juga diperhitungkan dengan persamaan 2.3 berikut :

$$\varepsilon' = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.3)$$

Dan nilai tegangan sebenarnya dihitung melalui persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

Dimana untuk memperoleh nilai K dan n maka dilakukan plot data *true strain* dan *true strain* maka dihasilkan persamaan :

$$\text{Log } \sigma = K \log + n \log \varepsilon \quad (2.5)$$

Setelah didapat nilai K dan n maka untuk mendapatkan nilai *strain hardening rate* maka digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\theta = K \varepsilon'^{1-n} \quad (2.6)$$

Dimana :

σ : Tegangan teknik

ε : Regangan teknik

ε' : Regangan sebenarnya

σ_t : Tegangan sebenarnya

θ : Laju Pengerasan Regangan

K : Koefisien kekuatan

n : Koefisien pengerasan regangan

2.5 *Fatigue*

fatigue atau kelelahan material merupakan kerusakan struktural progresif dan terlokalisasi yang terjadi ketika suatu material mengalami pembebanan siklik. Kelelahan material terjadi ketika suatu material mengalami beban yang berulang-ulang dalam jangka waktu yang lama. Hal ini dapat menyebabkan perubahan struktur material secara bertahap, terlokalisasi, dan permanen yang dapat menyebabkan retak atau patah. Kelelahan dapat terjadi pada berbagai jenis material, seperti logam, plastik, dan komposit. Kelelahan dapat didefinisikan sebagai suatu perubahan struktur yang bertahap, bersifat lokal dan permanen pada kondisi yang menghasilkan fluktuasi regangan dan tegangan di bawah kekuatan tariknya dan pada satu atau lebih titik yang mungkin menyebabkan terjadinya keretakan atau patah (Sillekens & Bohlen, 2012)

fatigue dapat diukur dengan pengujian *fatigue* yang bertujuan untuk mengetahui umur kelelahan suatu material dan batas kelelahannya. Pengujian *fatigue* dilakukan dengan menerapkan beban siklik pada material dan mengukur jumlah siklus yang diperlukan untuk menyebabkan material rusak. Insinyur biasanya menggunakan salah satu dari tiga metode untuk menentukan umur kelelahan suatu material, metode masa-stres, masa-

ketegangan, dan metode patahan mekanis elastis linier..Kelelahan adalah salah satu penyebab utama kegagalan mekanis dan lebih dari 90% kegagalan mekanis disebabkan oleh kegagalan kelelahan. Tahap tahap dari perpatahan fatigue dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Inisiasi keretakan (*crack initiation*)

Pembentukan retak merupakan tahap pertama dari perpatahan fatik ketika retakan mikro mulai terbentuk pada permukaan material akibat pembebanan siklik yang berulang. Retakan ini sering terbentuk pada titik lemah pada permukaan material, seperti cacat atau ketidaksempurnaan struktur kristal. Inisiasi retak tidak dapat diamati atau ditentukan dengan menggunakan modulus kekakuan karena tidak mungkin untuk mengamati perubahan karakteristik energi pada setiap siklus pembebanan (Luo, 2013).

2. Perambatan keretakan (*crack propagation*)

Perambatan keretakan merupakan perpatahan fatik tahap kedua, dimana retakan yang terbentuk pada permukaan material akan terus membesar dan merambat ke seluruh material akibat pembebanan siklik yang berulang-ulang. Retakan ini akan terus membesar hingga mencapai ukuran yang cukup besar sehingga menyebabkan material pecah maupun sobek. Kecepatan perambatan retak setiap jenis material berbeda-beda, ada material yang kecepatan perambatan retaknya cepat, ada pula material yang kecepatan perambatan retaknya lambat. Saat memprediksi perambatan retak pada suatu material, setiap jenis material memiliki sifat anti retaknya masing-masing. Bahan dengan ketangguhan rendah berarti retakan mudah merambat, sedangkan bahan dengan ketangguhan tinggi berarti jika terdapat retakan pada bahan maka retakan tersebut sulit merambat. Ketebalan sampel juga mempengaruhi perambatan retak: sampel dengan ketebalan yang cukup kecil akan mengalami tegangan bidang akibat pembebanan, sedangkan material dengan ketebalan yang mengalami deformasi. Perambatan retakan dapat diprediksi dengan menggunakan model matematika seperti teori

perambatan retakan. Teori ini memungkinkan prediksi perilaku perambatan retakan pada struktur pesawat hingga tingkat atom (Agnew, 2012)

3. Patah (*fracture*)

Patahan (*fracture*) pada pengujian fatigue terjadi pada tahap akhir pada pengujian fatigue, yaitu ketika material mengalami kegagalan akibat retakan yang meluas dan merambat ke seluruh material. Pada saat ini luas penampang bagian tersebut akan berkurang dan tidak dapat menahan beban sehingga mengakibatkan kerusakan material. Pada titik ini, retakan menyebar dengan sangat cepat sehingga strukturnya akan pecah menjadi dua. Patahan bisa terjadi secara tiba-tiba dan tanpa peringatan. Jumlah total siklus pemicu retakan sama dengan jumlah siklus pemicu retakan awal dan fase propagasinya. Kerusakan dapat terjadi karena sejumlah faktor, seperti desain material yang salah, cacat yang terbentuk selama penggunaan struktur, dan fluktuasi tegangan pada permukaan. Permukaan terkorosi. Lebih dari 90% kegagalan mekanis disebabkan oleh kerusakan akibat kelelahan. Pengujian fatik dan pengamatan pola patahan sangat penting untuk material logam yang mengalami pembebanan berulang (Forth et al., 2006).

2.6 Laju perambatan retak

Laju perambatan retak adalah laju perluasan retakan pada suatu material dan merambat melalui material akibat pembebanan yang berulang-ulang. Laju perambatan retak dapat diukur dengan menggunakan uji kelelahan dan dengan mengamati bentuk retakan. Laju perambatan retak dapat dipengaruhi oleh banyak faktor berbeda, seperti sifat material, kondisi lingkungan, dan bentuk benda yang diuji. Secara umum, kecepatan perambatan retak meningkat dengan cepat seiring dengan bertambahnya jumlah siklus pembebanan. Laju perambatan retakan dapat diprediksi dengan

menggunakan model matematika seperti teori perambatan retakan (Kaya, 2013).

Teori ini memungkinkan prediksi perilaku perambatan retakan pada struktur pesawat hingga tingkat atom. Laju perambatan retak juga dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti kelembaban, suhu dan pH. Dalam beberapa kasus, laju perambatan retak dapat diperlambat dengan menggunakan teknik perlambatan retak, seperti penggunaan penghambat retak atau teknik pengelasan khusus. Laju perambatan retak dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari karakteristik material, panjang retak dan tegangan operasi (Pugno *et al.*, 2006). Berikut adalah persamaan Paris law yaitu :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (2.4)$$

Dimana :

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

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

C, m = Konstanta material

Oleh karena itu 'C' dan 'm' dianggap sebagai konstanta material dan ΔK sebagai intensitas tegangan bolak-balik, yang secara sederhana dihitung sebagai selisih antara nilai maksimum dan minimum untuk setiap siklus. (Knott, 1973); yaitu

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.5)$$

Hubungan ini telah terbukti merepresentasikan perilaku sejumlah besar material dan menjelaskan berbagai tingkat pertumbuhan. Hal ini tidak berperan baik untuk nilai ΔK yang sangat rendah, di mana semacam efek “threshold” tampaknya ada, maupun untuk nilai K_{max} yang sangat tinggi yang mendekati ketangguhan material (K). Nilai eksponen “m”, merupakan kemiringan “kurva laju pertumbuhan retak”. Menurut Barsom (1987), dalam perkembangan *fracture mechanics*, ada tiga faktor utama

yang dapat mengontrol kemungkinan suatu komponen atau struktur mengalami *brittle fracture*, yaitu *Fracture Toughness*, Ukuran retak, Tegangan dan factor komposisi kimia.

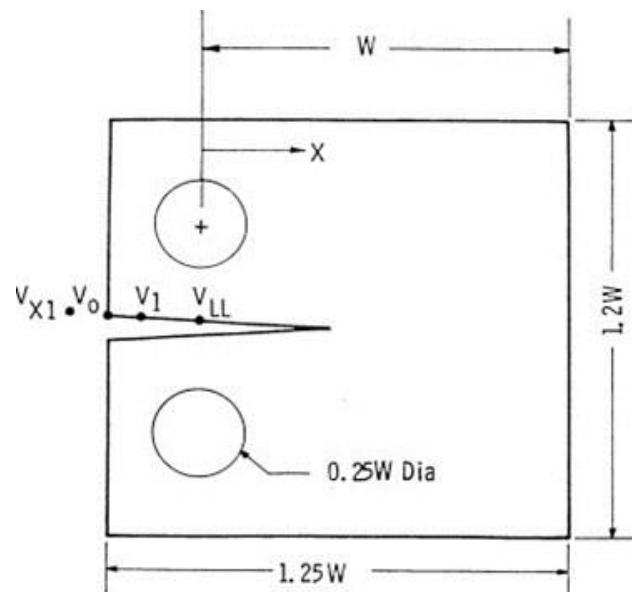
2.7 Metode Compliance

Metode pengukuran retak menggunakan COD gege umumnya disebut teknik *compliance*. Metode pengukuran retak dengan COD gege umumnya disebut teknik *compliance*. Jenis spesimen yang digunakan dalam metode *compliance* ini adalah model *compact tension* (CT). Pada pengujian FCG, gelombang sinusoidal sejati dengan frekuensi 10 Hz digunakan untuk memberikan beban konstan dengan rasio beban tertentu. Panjang retak fatik pada spesimen uji diukur melalui metode *compliance*. (ASTM, 2008) Metode pengukuran retak menggunakan COD gege umumnya disebut teknik *compliance*. Dalam pengujian mekanika perpatahan material, teknik konsistensi digunakan untuk mengidentifikasi perambatan retak subkritis. Ini didasarkan pada pengukuran dua besaran pengujian fatik yang paling penting, yaitu beban yang diberikan dengan defleksi spesimen. Selain itu, teknik ini sangat cocok untuk akuisisi data otomatis, dan mudah digunakan. Dengan asumsi bahwa hanya mekanisme disipasi energi inelastic yang terjadi pada ujung retak, sudut pandang mekanis linear elastic fracture mechanics (LEFM) (Ortega et al., 2014). Metode pengukuran retak menggunakan COD gege umumnya disebut teknik *compliance*. Laju pelepasan energi elastis (ERR) per unit di area baru yang dibuat dapat digunakan untuk mengukur ketahanan retak kritis. Dalam kasus di mana spesimen CT diambil, panjang retak dinormalisasi sebagai (King et al., 1999).

Dalam pengujian mekanika perpatahan material, teknik konsistensi digunakan untuk mengidentifikasi perambatan retak subkritis. Ini didasarkan pada pengukuran dua besaran pengujian fatik yang paling penting, yaitu beban yang diberikan dengan defleksi spesimen. Selain itu,

teknik ini sangat cocok untuk akuisisi data otomatis, dan mudah digunakan. Standar ASTM E647 menetapkan bahwa posisi COD pada pengujian fatik dibagi menjadi empat lokasi. Geometri spesimen CT digambarkan pada gambar 2.8 Beberapa simbol menunjukkan kesesuaian yang dinormalisasi di beberapa lokasi penempatan COD pada spesimen.

Gambar 2.1 Geometri Spesimen CT (ASTM E647, 2000)



Pada gambar skematik geometri spesimen CT terdapat beberapa simbol yang digunakan untuk menunjukkan kesesuaian yang dinormalisasi di beberapa lokasi spesimen sebagai berikut:

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

$(BEV_1)/P$ = Kesesuaian pada 1576W dari garis beban ke arah permukaan depan spesimen, lokasi yang ditetapkan adalah 1

$(BEV_{LL})/P$ = Kepatuhan garis beban, lokasi yang ditetapkan adalah LL

$(BEV_{X1})/P$ = Kesesuaian pada jarak 345W dari garis beban ke arah retakan ujung, lokasi yang ditetapkan X1

Dimana E merupakan modulus young, β ketebalan dari spesimen, V

perpindahan, P beban, dan W merupakan lebar spesimen. Menurut Newman, kepatuhan yang dinormalisasi pada lokasi 0,1, LL dan 2 untuk panjang retak yang dipilih antara $\alpha/w = 0,20$ dan $0,80$ nilai tersebut didapat dari tabel kesesuaian dan sumbu rotasi X_0/W sebagai fungsi perpanjangan retak untuk spesimen CT (Saxena & Hudak, 1978).

Tabel 2. 1 Nilai compliance coefficient

Meas. Locati on	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

Dengan asumsi bahwa hanya mekanisme disipasi energi inelastic yang terjadi pada ujung retak, sudut pandang mekanis *linear elastic fracture mechanics* (LEFM) (Ortega et al., 2014). Metode pengukuran retak menggunakan COD gege umumnya disebut teknik *compliance*. Laju pelepasan energi elastis (ERR) per unit di area baru yang dibuat dapat digunakan untuk mengukur ketahanan retak kritis. Dalam kasus di mana spesimen CT diambil, panjang retak dinormalisasi sebagai V_0

$$\frac{a}{w} = 1.0010 - 4.6695U + 18.460U^2 - 236.82U^3 + 1214.9U^4 - 21243.6U^5 \quad (2.7)$$

Dimana :

α : Panjang retak dari titik aplikasi beban

w : Bentang antara titik beban dan permukaan ujung spesimen

Nilai U diperoleh dari persamaan :

$$U = 1/[1 + (EBC)^2]^{1/2} \quad (2.8)$$

Dimana

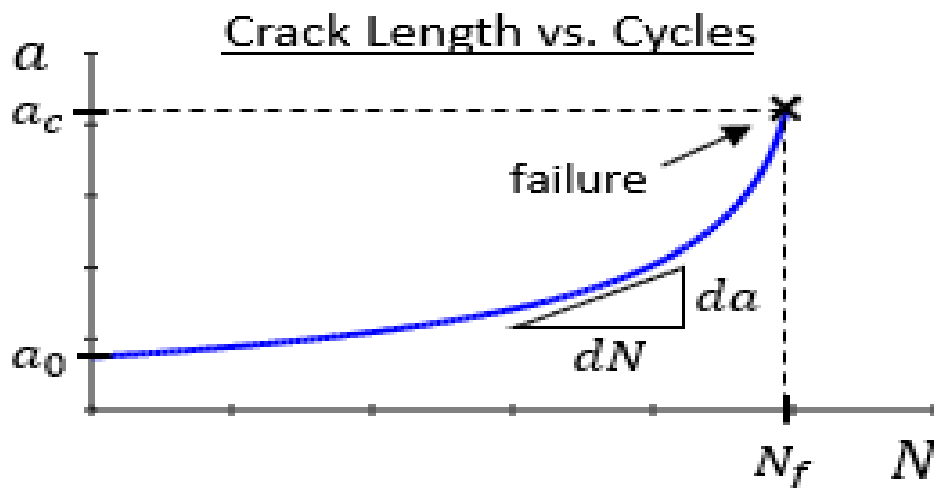
V : perpindahan antara titik pengukuran

E : modulus young

B : tebal spesimen

P : Beban

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



Gambar 2.10 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*.

2.8 Metode polynomial incremental

Setelah didapatkan nilai perbandingan Panjang retak dengan jumlah siklus, kemudian laju perambatan retak fatik (da/dN) dicari dengan menggunakan metode Incremental Polynomial (ASTM E647, 2000). Metode ini digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik yang terjadi pada spesimen uji. Metode Incremental Polynomial ini digunakan dalam perhitungan da/dN yang didalamnya meliputi pas polynomial urutan kedua ke rangkaian $(2n+1)$ titik data yang tersusun berurutan, biasanya n memiliki nilai sebesar 1,2,3,4 atau 5 (ASTM E647, 2000). Analisis data hasil pengujian retak fatik dihitung menggunakan metode polynomial incremental menggunakan program *computer quick basic*.

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C}{C_2} \right)^2 \quad (2.9)$$

Dimana,

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C}{C_2} \right) \leq +1 \quad (2.10)$$

Laju pertumbuhan retak pada N_i diperoleh dari turunan parabola di atas, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{C_2} d_i = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C}{C_2} \right) \quad (2.11)$$

Dengan menggunakan program komputer quick basic, analisis data hasil pengujian retak fatik dihitung menggunakan metode *polynomial incremental*. K-kalibrasi spesimen digunakan untuk geometri C(T) spesimen. Informasi tentang spesimen, variable pembebanan, dan lingkungan dimasukkan ke dalam keluaran program, selain nilai tabulasi dari data mentah dan data yang diproses. Nilai ukuran retakan total

$A(Mcas.)$ dan $A(Reg.)$ masing-masing diperoleh dari pengukuran dan dari persamaan regresi, yaitu persamaan (2.8). Koefisien korelasi berganda, MCC (MCC =1), menunjukkan kesesuaian sempurna persamaan ini. Nilai ΔK dan da/dN diberikan dalam satuan yang sama dengan variabel input.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dari penelitian ini dimulai dari bulan Januari 2024 sampai dengan April 2024. Pengujian Tarik dan pengujian perambatan retak fatik (FCG) dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung, sedangkan pengamatan struktur mikro dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Lalu untuk Pengamatan fraktografi dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro.

3.2 Bahan yang Digunakan

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah sebagai berikut :

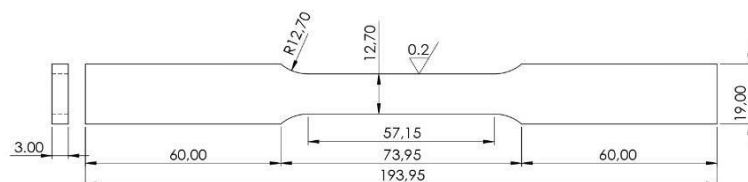
1. Magnesium AZ31

Magnesium AZ31 ini berbentuk plat.

2. Spesimen Uji Tarik

Spesimen untuk uji tarik berdasarkan standar ASTM B577.

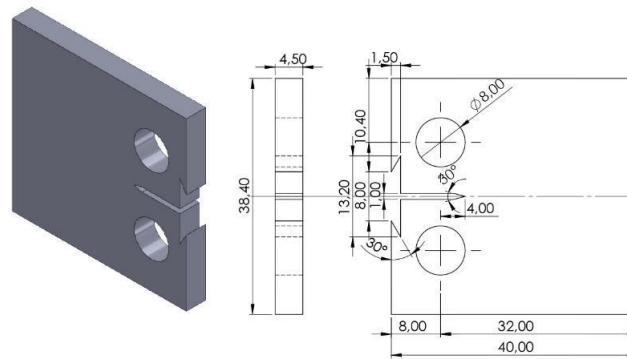
Ukuran dan juga bentuk seperti gambar 3.1



Gambar 3.1 Spesimen uji tarik Magnesium *alloy* standar ASTM B557

3. Spesimen Uji Perambatan Retak Fatik

Untuk uji perambatan retak fatik atau *Fatigue crack growth* (FCG) yaitu dengan menggunakan spesimen *Compact Tension* (CT) standar ASTM E647.



Gambar 3.2 Spesimen Uji Fatik Standar ASTM E647 (ASTM E647,2000)

3.3 Alat yang Digunakan

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

3.3.1 Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Mesin MTS *Landmark* 100 kN digunakan sebagai alat uji tarik dan perambatan retak fatik.



Gambar 3.3 MTS landmark 100 kN

3.3.2 Mikroskop optik

Mikroskop optik adalah alat yang digunakan untuk memperbesar benda sehingga dapat dilihat lebih detail dalam cahaya tampak. Mikroskop ini menggunakan berbagai komponen optik, seperti lensa dan cermin, untuk membentuk gambar sampel.



Gambar 3.4 Mikroskop optik

3.3.3 *dinolite digital microscope*

Kegunaan mikroskop ini untuk melihat pertumbuhan dan perambatan retak selama pengujian retak fatik. Alat ini mampu mengamati retak dengan pembesaran 100X sesuai standar ASTM E647.



Gambar 3.5 *dinolite digital microscope*

3.3.4 SEM (*scanning electron microscope*)

Fungsi dari *Scanning Electron Microscope* untuk melihat dan mengobservasi patahan pada permukaan spesimen uji setelah dilakukannya pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik.



Gambar 3.6 SEM (*scanning electron microscope*)

3.3.5 jangka sorong

Jangka sorong merupakan alat yang digunakan untuk mengukur panjang spesimen uji



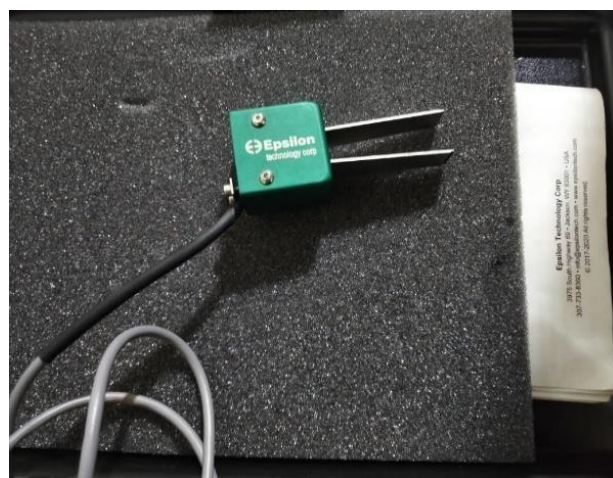
Gambar 3.7 jangka sorong

Tabel 3.1 *Out Side Micrometer*

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

3.3.6 *Clip On Displacement Gages*

Clip On Displacement Gages merupakan 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*

Gambar 3.8 *Clip On Displacement Gages*

Tabel 3.2 Spesifikasi *Clip on displacement gages*

Detail Spesifikasi	
Nama Merek	Epsilon
Eksitasi	5-10 VDC
Ouput	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)

3.4 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur penelitian yang digunakan pada penelitian ini dan dibagi menjadi beberapa tahapan proses, yaitu:

3.4.1 Persiapan Spesimen Uji

Material yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah Magnesium AZ31.

3.4.2 Pembuatan Spesimen Uji

Pada tahap ini adalah melakukan standarisasi terhadap dimensi Magnesium AZ31, yaitu sesuai dengan standar ASTM B557 dan ASTM 647 (Proses pemesinan yang digunakan untuk spesimen uji adalah *Vertical Machining Center (CNC Milling Machine)*).

3.4.3 Prosedur pengujian

a. Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik statis dilaksanakan terlebih dahulu supaya memperoleh data nilai tegangan luluh (σ_y) baja. Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E8.
2. Memilih program Controller 793B setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
3. Memasangkan 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 berubah.
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. Memasukkan data panjang spesimen, lebar spesimen dan tebal spesimen.
10. Lalu masukan *initial speed* dan *secondary speed*

11. Sesudah menginput semua data lalu klik *RUN*.

b. Pengujian Perambatan Retak Fatik

Adapun prosedur pengujian perambatan retak fatik yang akan dilakukan yaitu:

1. Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E 647.
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. Hidupkan 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 temperature kontroler.
5. Menghidupkan lampu penerang pada MTS Landmark 100kN.
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 *ceklist* pada *Exclusive Control* lalu pada *manual command ceklist* 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 *power high* 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 specimen pada *cross head grip* atas dengan rapi kemudian specimen dicekam.
14. Kemudian menurunkan *cross head* sampai ujung bawah specimen masuk kedalam *grip* bawah dengan kedalaman 45 mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk *grip* specimen.
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 *unchecklist 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 specimen, compliment koefisien C_0 - C_5 sesuai standar ASTM E467 V_0 , 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 fatik

18. Pada *fatigue crack growth testing* pilih FCG pre crack parameter kemudian masukan FCG end level 1 yaitu bebanmaksimal 3,566 dan end level 2 yaitu beban min 0,3566.
19. Pada *pre crack test* delta K masukan nilai *crack lenght deck* 9,2.
20. Kemudian klik OK dan *Run Test*.
21. Kemudian tunggu sampai FCG crack lenght nya mencapai nilai yang ditentukan yaitu 9,2.
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*, danmengatur *setup variables fatigue crack growth testing* yaitu memasukan data tebal spesimen, compliment koefisien C_0 - C_5 sesuai standar ASTM E467 V_0 , F_{max} dan F_{min} , total *cycles* 1000000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament* , final crack lenght dan beban uji fatik menggunakan control beban yang sudah ditentukan dari nilai *yield strength* yang diperoleh dari hasil uji tarik.
24. Kemudian klik OK dan *Run Test*.

c. Pengamatan Fraktografi

Dengan menggunakan *microscopy* (OM) dan *scanning electron microscopy* (SEM), pengamatan fraktografi dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro awal menjadi struktur mikro setelah pengujian fatik. Selain itu, karakterisasi menggunakan EDS dan XRD dilakukan untuk mempelajari perilaku retak fatik melalui perubahan fasa-fasa. Selama pengujian, semua 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 AZ31.

V. PENUTUP

5.1 Simpulan

Adapun simpulan dari hasil penelitian perambatan retak fatik Magnesium AZ31 adalah sebagai berikut:

1. Hasil uji perambatan retak pada material Magnesium AZ31 ini terjadi pada siklus 2.000 setelah dilakukan pengujian *pre-crack* dengan panjang retak hasil pengujian sebesar 5,20 mm dan kemudian retak terus merambat hingga siklus 32.324 dengan panjang retak hasil pengujian sebesar 22,155 mm sebelum mengalami patah statis. Laju perambatan retak dianalisis menggunakan metode *polynomial incremental* dan menggunakan pendekatan persamaan *paris law* sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = 3.654 \times 10^{-11} (\Delta K)^{4.020}$$

2. Hasil analisa SEM dan OM menunjukkan bahwa struktur mikro Magnesium AZ31 ini umumnya terdiri dari butir kristal yang relatif besar yang dapat menyebabkan perambatan retak lebih mudah terjadi pada material ini dan retak yang terjadi yaitu retak transgranular.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, untuk mendukung penelitian selanjutnya maka penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya diharapkan, pengujian perambatan retak fatik Magnesium AZ31 dilakukan dengan bervariasi beban dan rasio

2. Pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan dengan variasi perlakuan panas atau perlakuan permukaan untuk mendapatkan data perbandingan hasil pengujian perambatan retak fatik dan struktur mikro dari material tersebut.
3. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat dilakukan variasi pengujian lain seperti pengujian kekerasan pada material agar dapat mengetahui informasi secara lengkap mengenai sifat mekanik magnesium AZ31.

DAFTAR PUSTAKA

- Agnew, S. R. (2012). Deformation mechanisms of magnesium alloys. In *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 63-104). <https://doi.org/10.1533/9780857093844.1.63>
- Burhanuddin, Y., Sukmana, I., & Iqbal, M. (2018). Studi sifat mekanik Magnesium AZ31 hasil proses pengecoran tekan (squeeze casting). *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 11(1). <https://doi.org/10.24843/JEM.2018.v11.i01.p01>
- Dhinakaran, S., & Prakash, R. V. (2014). Effect of low cyclic frequency on fatigue crack growth behavior of a Mn–Ni–Cr steel in air and 3.5% NaCl solution. *Materials Science and Engineering: A*, 609, 204-208.
- Essadiqi, E., Jung, I. H., & Wells, M. A. (2012). 7 - Twin roll casting of magnesium. In C. Bettles & M. Barnett (Eds.), *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 272-303). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093844.2.272>
- Forth, S., Newman, J., & Forman, R. (2006). *Anomalous fatigue crack growth data generated using the ASTM standards*. ASTM International.
- Grandfield, J. F. (2012). 6 - Direct chill casting of magnesium extrusion billet and rolling slab. In C. Bettles & M. Barnett (Eds.), *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 229-271). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093844.2.229>
- Irfansyah, I. M. (2023). *Pengaruh Penambahan Nikel 4% Dan Magnesium 4% Terhadap Struktur Mikro Dan Kekuatan Tarik Pada Besi Cor Nodular* [Universitas Muhammadiyah Surakarta].
- Kaibyshev, R. (2012). Dynamic recrystallization in magnesium alloys. In *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 186-225). <https://doi.org/10.1533/9780857093844.1.186>
- Kaya, A. A. (2013). 2 - Physical metallurgy of magnesium. In M. O. Pekguleryuz, K. U. Kainer, & A. Arslan Kaya (Eds.), *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy* (pp. 33-84). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857097293.33>
- King, M., Sutherland, I., & Le-Ngoc, L. (1999). Fracture toughness of wet and dry Pinus radiata. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 57, 235-240.
- Lapovok, R., & Estrin, Y. (2012). Superplasticity in magnesium alloys by severe plastic deformation. In *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 144-185). <https://doi.org/10.1533/9780857093844.1.144>

- Luo, A. A. (2013). Applications: aerospace, automotive and other structural applications of magnesium. In *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy* (pp. 266-316). <https://doi.org/10.1533/9780857097293.266>
- Mizhar, S., & Fauzi, R. (2016). Pengaruh penambahan magnesium terhadap kekerasan, kekuatan impak dan struktur mikro pada aluminium paduan (Al-Si) dengan metode lost foam casting. *MEKANIK: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 2(2).
- Ortega, A., Maimí, P., González, E., & Ripoll, L. (2014). Compact tension specimen for orthotropic materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 63, 85-93.
- Saputro, T. A. (2014). *Analisa Heat Treatment Pada Aluminium Magnesium Silikon (Al-Mg-Si) Dengan Silikon (Si)(1%, 3%, 5%) Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis* Universitas Muhammadiyah Surakarta].
- Saxena, A., & Hudak, S. (1978). Review and extension of compliance information for common crack growth specimens. *International Journal of Fracture*, 14, 453-468.
- Sillekens, W. H., & Bohlen, J. (2012). Hydrostatic extrusion of magnesium alloys. In *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 323-345). <https://doi.org/10.1533/9780857093844.2.323>
- Sillekens, W. H., & Bormann, D. (2012). Biomedical applications of magnesium alloys. In *Advances in Wrought Magnesium Alloys* (pp. 427-454). <https://doi.org/10.1533/9780857093844.3.427>

