

EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH (*LOW CYCLE FATIGUE*) MAGNESIUM EKSTRUSI AZ31B UNTUK APLIKASI BAUT TULANG

(Tesis)

FAUZI IBRAHIM

1925021003



**PROGRAM PASCA SARJANA
MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2021**

ABSTRAK

EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH (*LOW CYCLE FATIGUE*) MAGNESIUM EKSTRUSI AZ31B UNTUK APLIKASI BAUT TULANG

Oleh
FAUZI IBRAHIM

Teknologi yang kian mumpuni membuat sejumlah manufaktur melirik logam ringan yang bisa dijadikan material biomedik yaitu magnesium. Contohnya magnesium AZ31B (Mg AZ31B) yang sedang populer dikalangan peneliti di seluruh dunia. Tipikal Mg AZ31B umumnya mengandung elemen padu: Al 2,71%, Zn 0,69%, Mn 0,32%, Fe 0,002%, Si 0,18%, Cu, Ni dan Ca 0,001% dibentuk melalui proses ekstrusi. Secara umum material ini memiliki sifat seperti kepadatan rendah, keuletan yang cukup, ketahanan korosi yang baik dan khususnya memiliki sifat *biodegradable*. Sifat *biodegradable* tersebut dapat digunakan untuk aplikasi baut tulang dengan syarat atau pengujian secara bertahap sesuai *roadmap* biomaterial, seperti karakteristik sifat fatik nya harus diketahui terlebih dahulu. Hal ini wajib dilakukan mengingat kondisi tulang manusia dapat mengalami beban tarik, tekan dan siklik pada kondisi berjalan atau berlari. Kelelahan yang terjadi karena deformasi plastis dapat dilakukan pengujian dengan mekanisme pembebanan siklik dalam kondisi tarik dan tekan, yang biasa dikenal dengan nama kegagalan fatik siklus rendah. Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sifat fatik siklus rendah magnesium ekstrusi AZ31B untuk aplikasi baut tulang dengan parameter: laju regangan konstan dengan $\Delta\epsilon_a = 0,004 - 0,01 \text{ mm/mm}$. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa umur fatik yang paling tinggi dalam pengujian fatik siklus rendah dialami magnesium pada $\Delta\epsilon_a = 0,004 \text{ mm/mm}$ dengan 5112 siklus, sebaliknya pada kondisi $\Delta\epsilon_a 0,01 \text{ mm/mm}$, umur fatik magnesium menurun secara drastis dengan regangan plastis yang dihasilkan lebih besar yaitu: 0.00451 mm/mm, dan regangan elastis 0.00549 mm/mm dengan rata – rata modulus elastisitas 44,35 GPa. *Cyclic softening* terjadi pada $\Delta\epsilon_a 0,005 - 0,006 \text{ mm/mm}$, dan *cyclic hardening* pada $\Delta\epsilon_a = 0,008 - 0,01 \text{ mm/mm}$ serta fenomena *Bauschinger effect* dapat diamati pada $\Delta\epsilon_a = 0,006 - 0,01 \text{ mm/mm}$ dan dihitung menggunakan persamaan *Bauschinger effect factor*, penurunan BEF sekitar 1,6% tiap kenaikan amplitudo regangan. Persamaan empiris untuk memprediksi fatik siklus rendah Mg AZ31B dapat dilakukan melalui pendekatan amplitudo regangan plastis-elastis terhadap jumlah kebalikan siklus (*reversal to failure*, $2N_f$) (Persamaan *Basquin-Coffin-Manson*), yaitu:

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = 0,01324(2N_f)^{-0,1464} + 8,1202(2N_f)^{-1,2827}$$

Keywords: magnesium AZ31B, fatik siklus rendah, tarik statis, baut tulang

ABSTRACT

LOW CYCLE FATIGUE PROPERTIES EVALUATION OF AZ31B EXTRUDED MAGNESIUM FOR BONE SCREW APPLICATIONS

By
FAUZI IBRAHIM

An advanced technology has made a number of manufacturers look for light metals that can be used as biomedical materials, including magnesium. For example AZ31B magnesium (AZ31B Mg) which is currently popular among researchers around the world. Typical AZ31B Mg generally contains an alloying element: 2.71% Al, 0.69% Zn, 0.32% Mn, 0.002% Fe, 0.18% Si, Cu, Ni and 0.001% Ca, formed by extrusion process. In general, this material has properties such as low density, sufficient ductility, good corrosion resistance and particularly biodegradable properties. These biodegradable properties can be used for bone screw applications, provided that they are tested in stages according to the biomaterial roadmap, such as the fatigue properties that must be known in advance. It must be done, considering the condition of human bones that can experience tensile, compressive and cyclic loads in walking or running conditions. Fatigue that occurs due to plastic deformation can be tested with a cyclic loading mechanism under tensile and compressive conditions, which is commonly known as low cycle fatigue failure. Based on the description above, this study aims to evaluate the low cycle fatigue properties of AZ31B extruded magnesium for bone screw applications with constant strain rate parameters with $\Delta\varepsilon_a = 0,004 - 0,01 \text{ mm/mm}$. The results of this study indicate that the highest fatigue life in the low cycle fatigue test is experienced by magnesium at $\Delta\varepsilon_a = 0,004 \text{ mm/mm}$ with 5112 cycles, in contrast to the condition $\Delta\varepsilon_a 0,01 \text{ mm/mm}$, fatigue life of magnesium decreased drastically with the resulting greater plastic strain, that is: 0.00451 mm / mm, and 0.00549 mm / mm elastic strain with an average modulus of elasticity of 44.35 GPa. Cyclic softening occurs at $\Delta\varepsilon_a 0,005 - 0,006 \text{ mm/mm}$, and cyclic hardening occurs at $\Delta\varepsilon_a = 0,008 - 0,01 \text{ mm/mm}$ and the Bauschinger effect phenomenon can be observed at $\Delta\varepsilon_a = 0,006 - 0,01 \text{ mm/mm}$ and calculated using the Bauschinger effect factor equation, the decrease in BEF is about 1.6% for each increase in strain amplitude. The empirical equation to predict the low cycle fatigue of Mg AZ31B can be done by approaching the amplitude of the plastic-elastic strain to the number of cycles reversal (reversal to failure, 2N_f) (Basquin-Coffin-Manson Equation):

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = 0,01324(2N_f)^{-0,1464} + 8,1202(2N_f)^{-1,2827}$$

Keywords: AZ31B magnesium, low cycle fatigue, static tensile, bone screw

**EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH (LOW CYCLE FATIGUE)
MAGNESIUM EKSTRUSI AZ31B UNTUK APLIKASI BAUT TULANG**

Oleh

Fauzi Ibrahim

Tesis

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

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



**PROGRAM PASCASARJANA
MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2021**

Judul Tesis

**: EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH
(LOW CYCLE FATIGUE) MAGNESIUM
EKSTRUSI AZ31B UNTUK APLIKASI
BAUT TULANG**

Nama Mahasiswa

: Fauzi Ibrahim

Nomor Pokok Mahasiswa

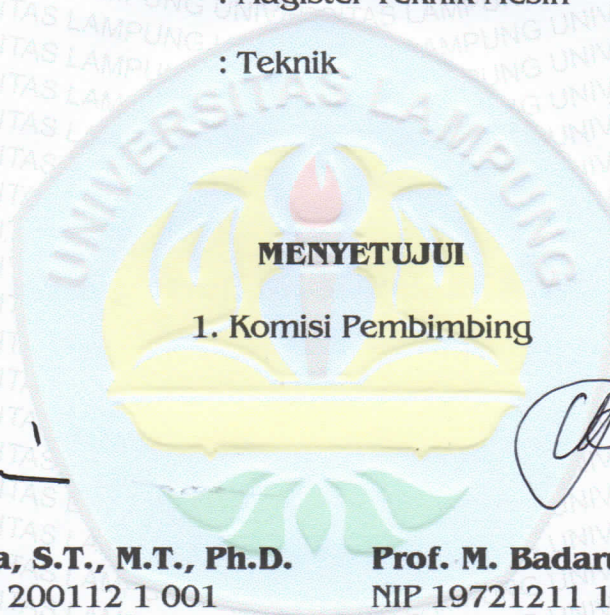
: 1925021003

Jurusan

: Magister Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik



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

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

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

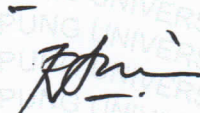
Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. Ph.D
NIP 19710817 199802 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D.**



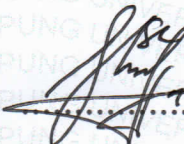
Sekretaris

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

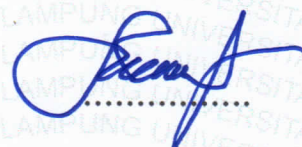


Penguji

Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.**



Bukan Pembimbing : **Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.**

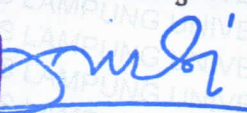


2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.
NIP 19620717 198703 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.
NIP 19710415 199803 1 005

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 03 Juli 2021

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa sesungguhnya tesis yang saya susun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik pada Progam Pascasarjana Magister Teknik Mesin seluruhnya adalah benar merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan tesis ini, saya kutip dari hasil penulisan orang lain yang sumbernya dituliskan dengan jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan karya ilmiah.

Tesis dengan judul “**Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) Magnesium Ekstrusi AZ31B Untuk Aplikasi Baut Tulang**” dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu:

1. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D.
2. Prof. M. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.

Saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/ Ibu Dosen Progam Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan dan motivasi.

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian tesis yang saya buat ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 25 Mei 2021

Penulis,



Fauzi Ibrahim
1925021003

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kotabumi, pada tanggal 07 November 1996, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, putra dari Bapak Idham dan Ibu Liyawati.

Penulis memulai pendidikan Taman Kanak di TK Dharma Wanita Hanura, Lampung Selatan tahun 2001 – 2002. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD Negeri 01 Hanura, Lampung Selatan tahun 2002 – 2008. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 08 Bandar Lampung tahun 2008 – 2011. Penulis melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 13 Bandar Lampung tahun 2011 – 2014.

Tahun 2014, penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik (FT) Universitas Lampung (UNILA) melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan melaksanakan kuliah di perguruan tinggi hingga meraih gelar Sarjana Teknik pada tahun 2018. Tahun 2019 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Lampung. Penulis bekerja sebagai Teknisi Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung terhitung sejak tahun 2019 dan pada tahun

2020 penulis melakukan penelitian pada bidang material baja dengan judul tesis “Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) Magnesium Ekstrusi AZ31B Untuk Aplikasi Baut Tulang” dibawah bimbingan Bapak Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. dan Prof. M. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.

Bandar Lampung, 25 Mei 2021
Penulis,

Fauzi Ibrahim
1925021003

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

“Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang”

Atas Rahmat Allah SWT

Kupersembahkan Karyaku ini

*kepada ayah dan ibuku tercinta Idham, B.Sc., dan Liyawati,
S.pd., istriku tersayang dr. Aminah Zahra, adik-adikku terkasih
Briptu Fauzia Aini, S.H. dan Fitria Nuraini*

*Karena sesungguhnya setelah kesulitan itu ada kemudahan
(Q.S Al. Insyirah : 5)*

*Engkau tak dapat meraih ilmu kecuali dengan enam hal yaitu; cerdas, selalu
ingin tahu, tabah, punya bekal dalam menuntut ilmu, bimbingan dari guru, dan
dalam waktu yang lama
(Ali bin Abi Thalib)*

*Education is the most powerful weapon we can use to change the world.
(Nelson Mandela)*

*Barang siapa belum pernah merasakan pahitnya menuntut ilmu walau sesaat, ia
akan menelan hinanya kebodohan sepanjang hidupnya
(Imam Syafi'i)*

*Allah akan mengangkat derajat orang-orang yang beriman dan orang-orang
yang berilmu di antara kamu sekalian
(Q.S Al-Mujadilah: 11)*

*Bantinglah otak untuk mencari ilmu sebanyak-banyaknya guna mencari rahasia
besar yang terkandung di dalam benda besar bernama dunia ini, tetapi
pasanglah pelita dalam hati sanubari, yaitu pelita kehidupan jiwa
(Al-Ghazali)*

SANWACANA

Assalamu 'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah puji syukur kehadiran Allah SWT. atas berkat rahmat, hidayah serta karunia-Nya dan tak lupa pula sholawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi besar Muhammad SAW. sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis ini dengan judul, **“Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) Magnesium Ekstrusi AZ31B Untuk Aplikasi Baut Tulang”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Jurusan Magister Teknik Mesin Universitas Lampung. Pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T., selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung
2. Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., selaku pembimbing utama yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan, arahan, bantuan, dukungan, saran dan kritik kepada penulis dalam proses penyelesaian tesis ini.

6. Prof. M. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D., selaku pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan saran kepada penulis sebelum, saat, dan setelah penelitian hingga tesis ini selesai disusun.
7. Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met., selaku penguji utama yang telah bersedia memberikan arahan, koreksi, saran dan kritik untuk pelaksanaan penelitian dan penyusunan tesis ini.
8. Prof. Dr. Sugiyanto, M.T., selaku penguji pendamping yang telah memberikan saran dan kritik untuk pelaksanaan penelitian dan penyusunan tesis ini.
9. Yusup Hendronursito, Ulin Herlina, Kiki Eko Suwanto dan Widya yang telah bersedia dan membantu dalam peminjaman alat maupun semua keperluan penelitian.
10. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis.
11. Seluruh karyawan dan staf Jurusan Teknik Mesin atas bantuan-bantuannya selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin.
12. Teman-teman RM (Rekayasa Material), Yusup Hendronursito, Ulin Herlina, Farid Nanda Syanur, Sugiyanto dan Arifo Cahyo yang telah menjadi teman berbagi dukungan, saling membantu, menemani, berbagi pengetahuan, dan semangat dalam melaksanakan penelitian.
13. Teman teman *Non Block* SWD, Okky Ariffan Rasyid, Izqho Dhi Martha, Repki, Yanuar Prayogi, Anggi Septian dan Sandy sebagai sahabat seperjuangan mengajar yang tak pernah henti mendorong penulis untuk segera menyelesaikan studi ini.

14. Teman teman Tahsin Brotherfillah dan PKS yang telah memberikan semangat, perhatian, dukungan, dan tempat untuk meningkatkan iman dan taqwa.
15. Kepada teman-teman angkatan 2019, terima kasih atas keluarganya yang telah terjalin selama ini, salam SOLIDARITY M FOREVER.
16. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu secara tulus memberikan bantuan moril dan materil kepada penulis.

Semoga Allah SWT. Senantiasa membalas semua kebaikan-kebaikan yang telah kalian berikan. Akhir kata, penulis memohon maaf kepada semua pihak apabila tesis ini masih terdapat kesalahan dan kekeliruan, semoga tesis ini dapat berguna dan bermanfaat sebagaimana mestinya, Aamiin.

Bandar Lampung, 25 Mei 2021
Penulis,

Fauzi Ibrahim
1925021003

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	5
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Sistematika Penulisan	6

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnesium.....	7
2.2 Magnesium AZ31B.....	8
2.3 Pengaruh Elemen Padu Mg AZ31B	11
2.4 <i>Fatigue</i>	13
2.5 Fatik Siklus Rendah	15
2.6 Observasi <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	19
2.7 Observasi Struktur Mikro.....	20
2.8 Kekerasan.....	22

2.9 Kekuatan Tarik.....	24
2.10 <i>Strain Hardening</i>	28

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian yang digunakan	31
3.3 Prosedur Pengujian	36
3.4 Variabel Pengujian	42
3.5 Diagram Alir Penelitian	43

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Microvickers</i>	44
4.2 Hasil Pengujian Tarik Statis.....	46
4.3 Hasil Pengujian Fatik Siklus Rendah.....	49
4.4 Observasi Struktur Mikro	69
4.5 Observasi Fraktografi.....	73

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan	77
5.2 Saran.....	78

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Kurva perubahan <i>stress – strain</i> Mg AZ31B	18
2.2 Daerah permukaan patah (<i>fracture</i>) pada sampel uji fatik.....	20
2.3 Struktur mikro Mg AZ31B yang diekstrusi	21
2.4 Microvickers Mg AZ31B Ekstrusi.....	22
2.5 Skema Uji Tarik	24
2.6 Kurva Tegangan - Regangan Mg AZ31B Ektrusi	25
2.7 Kurva Tegangan - Regangan Mg AZ31B Ektrusi sampel O, H dan L ..	26
2.8 Mekanisme Proses Ektrusi	28
2.9 Struktur mikro Mg AZ31B yang dibentuk dengan proses ekstrusi	29
3.1 Foto Mg AZ31B bentuk silinder (Tanpa Satuan)	31
3.2 Mesin MTS <i>Landmark</i> 100 kN	32
3.3 <i>Vertical Machining Center (CNC Miling Machine)</i>	33
3.4 <i>Vickers Hardness Tester</i>	34
3.5 Mikroskop Metalurgi	34
3.6 Micrometer Digital.....	35

3.7 Scanning Electron Microscope Zeiss EVO MA10	35
3.8 Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik (ASTM B557-02a)	37
3.9 Foto spesimen uji tarik	37
3.10 Bentuk dan ukuran spesimen uji LCF (ASTM E606-92)	37
3.11 Foto spesimen uji fatik siklus rendah	38
3.12 Diagram Alir Penelitian	43
4.1 Kurva hasil uji kekerasan <i>Microvickers</i> Mg AZ31B	45
4.2 Hubungan incremental tegangan perubahan panjang spesimen.....	46
4.3 Hubungan tegangan maksimum dan tegangan minimum	50
4.4 Histerisis kurva tegangan-regangan	53
4.5 Rasio pelunakan atau pengerasan siklik	58
4.6 Kurva tegangan - regangan siklus pertama dan kondisi monotonik	60
4.7 <i>Bauschinger effect</i>	61
4.8 Kurva tegangan-regangan dari tegangan tekan	64
4.9 Kurva <i>plastic strain amplitude vs stress</i>	67
4.10 Kurva amplitudo regangan vs jumlah kebalikan siklus patah (2Nf)....	69
4.11 Struktur Mikro Mg AZ31B <i>Transverse section</i>	70
4.12 Struktur Mikro Mg AZ31B <i>Longitudinal section</i>	71
4.13 SEM permukaan patah pada sampel LCF.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Magnesium Murni (Mg).....	8
2.2 Komposisi Kimia Mg AZ31B	10
2.3 Sifat Mekanik AZ31B	10
3.1 Hasil Komposisi Kimia Magnesium AZ31B	31
3.2 Data Uji Kekerasan <i>Microvickers</i>	40
3.3 Larutan etsa dan cara penggunaannya untuk material Mg AZ31B	42
3.4 Variabel Pengujian	42
4.1 Hasil Uji Kekerasan <i>Microvickers</i> Mg AZ31B.....	44
4.2 Hasil Uji Tarik Mg AZ31B	47
4.3 Hasil Uji Fatik Siklus Rendah Mg AZ31B	49
4.4 Hasil penghitungan rasio pelunakan dan rasio pengerasan.....	57
4.5 Hasil penghitungan <i>bauschinger</i> efek faktor	64
4.6 Nilai parameter sifat fatik siklus rendah	68

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tipikal Magnesium AZ31B (Mg AZ31B) umumnya mengandung elemen padu: Al 2,71%, Zn 0,69%, Mn 0,32%, Fe 0,002%, Si 0,18%, Cu 0,001%, Ni 0,001% dan Ca 0,001% diproses melalui proses ekstrusi (Castro *and* Yanyao, 2017). Secara umum material ini memiliki sifat seperti densitas atau massa jenis tergolong rendah, kekuatan tarik cukup baik, ketahanan korosi yang tinggi dan khususnya memiliki sifat *biodegradable* (Buldum, *et al.*, 2013). Salah satu pemanfaatannya digunakan untuk membuat biomaterial *biodegradable* (Rajan, *et al.*, 2020). *Biodegradable* merupakan istilah penggunaan biomaterial yang tertanam di dalam tubuh manusia, namun terdegradasi, pengkorosian maupun penghancuran secara alamiah tanpa adanya bantuan atau faktor dari luar (Prakash *et al.*, 2020). Karena sifat tersebut logam ini dimanfaatkan sebagai implan baut tulang manusia dengan beberapa ketentuan yang harus dipenuhi agar dapat diaplikasikan secara sempurna sesuai sifat mekanik tulang. Seperti data kekerasan, kekuatan tarik maupun karakteristik sifat fatik harus dilakukan *research* secara bertahap dan berkelanjutan, karena kondisi tulang manusia dapat mengalami beban tarik ataupun siklik pada kondisi berjalan atau berlari (Hart, *et al.*, 2017).

Deformasi tulang manusia terjadi akibat penyakit atau kecelakaan dapat diperbaiki dengan teknologi implantasi. Implantasi tersebut berfungsi untuk memperbaiki jaringan tulang yang mengalami kerusakan dengan menanamkan material sebagai alat bantu proses *recovery* atau penyembuhan (Rodrigues *et al.*, 2009). Konsep implantasi tersebut harus dilakukan beberapa tahap pengujian yang dikondisikan dalam keadaan kerja atau pembebanan berulang. Ketika keadaan kerja atau pembebanan berulang area implantasi atau biomaterial akan mengalami kegagalan (Radha *and* Sreekanth, 2017). Kegagalan pada biomaterial umumnya dikarenakan ketidakmampuan bahan terhadap pembebanan berulang yang mengakibatkan deformasi plastis dalam jumlah besar, sehingga biomaterial tersebut akan mengalami kelelahan dan kemudian patah atau *fracture* (Chen, *et al.*, 2018). Kelelahan (*fatigue*) merupakan bentuk dari kegagalan material atau bahan yang terjadi pada struktur karena beban dinamik yang cenderung naik dan turun. Beban dinamik tersebut terjadi di bawah kekuatan luluh dalam waktu yang lama dan tentunya berulang – ulang (Hasegawa, *et al.*, 2007). Kelelahan pada keadaan plastis yang terjadi pada siklus yang pendek di bawah 10^4 disebut *low cycle fatigue*. Sedangkan kelelahan pada kondisi elastis dengan siklus di antara 10^4 hingga 10^7 adalah *high cycle fatigue*.

Pada penelitian oleh Wu, *et al.*, (2015) yang melakukan pengujian fatik pada baut tulang dalam kondisi siklik, amplitudo regangan yang tinggi sangat mempengaruhi umur baut tulang dan modulus elastisitasnya. Laju regangan serta frekuensi yang diaplikasikan pada baut tulang akan mempengaruhi umur fatiknya. Kedalaman baut tulang juga berperan penting terhadap kelelahannya, semakin panjang baut

tulang semakin tinggi nilai kekakuan baut tersebut. Zand, *et al.*, (1983) melakukan studi eksperimental umur kelelahan baut tulang kortikal dalam kondisi siklik. Hasil menunjukkan bahwa terdapat dua faktor penting yang mempengaruhi umur kelelahan yaitu tegangan aksial baut (gaya normal yang terjadi pelat ke tulang) dan beban geser akibat pembebanan siklik. Fraktur yang terjadi terdapat pada daerah tengah baut antara pelat dan tulang. Aplikasi beban yang diterapkan pada baut mempengaruhi umur fatiknya, semakin meningkatnya beban yang diaplikasikan akan memperpendek umur fatiknya. Daerah tengah baut merupakan daerah inisiasi awal kegagalan sekrup. Penelitian yang dilakukan oleh Baumann (2015) menunjukkan hasil yang serupa, ketikan beban siklik diaplikasikan pada baut tulang di bawah kekuatan luluhnya bergantung pada laju regangan dan amplitudo regangan nya. Ketika amplitudo regangan dinaikkan area patahan fatik lebih besar dan umur fatik jauh lebih rendah. Pola kegagalan dan bentuk patahan setiap pengujian spesimen memiliki bentuk yang serupa sehingga bisa ditarik kesimpulan bahwa beban yang diterima baut ketika proses pengujian diakibatkan oleh beban siklik. Ukuran dari baut tulang yang diujikan juga mempengaruhi terhadap stabilitas antara pelat dan tulang, meskipun pengaruh tersebut dapat diminimalisirkan dengan aplikasi beban yang diterima.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Huang, *et al.*, (2014), paduan magnesium AZ31B yang telah diuji dengan kegagalan fatik siklus rendah dan pengujian dilakukan pada temperatur ruang. Hasil pengujian tersebut membuktikan bahwa *twins* berkontribusi pada sifat kelelahan dan proses kerusakan siklik paduan magnesium AZ31B. Kelelahan pada sampel *pre-compressed* lebih didominasi dari

sampel *as-rolled* pada amplitudo tegangan yang berbeda, terutama di bawah amplitudo tegangan yang dekat dengan kekuatan luluh dan tarik. Salah satu penelitian yang dilakukan oleh Jabbari, *et al.*, (2020), paduan magnesium AZ31B yang diekstrusi telah dilakukan pengujian kelelahan fatik siklus rendah pada temperatur ruang. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, 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. Namun penelitian oleh Geng, *et al.*, (2013) menunjukkan perbedaan karakteristik pengerasan regangan siklik dalam kisaran regangan dari 0,7% hingga 1,5%. Pada besaran regangan rendah 0,5%, paduan menunjukkan pengerasan siklik pada periode awal dan kemudian tegangan tetap konstan di periode akhir. Deformasi plastis *LCF* pada regangan tinggi di dominasi oleh *twinning-detwinning* dan *dislocation*.

Berdasarkan uraian di atas, penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai **“Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) Magnesium Ekstrusi AZ31B untuk Aplikasi Baut Tulang”**. Analisa struktur mikro dan observasi penampang patahan sampel akan dilakukan setelah bahan diuji pada kondisi fatik siklus rendah untuk menjelaskan mekanisme kegagalan fatik selama pengujian.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengkonfirmasi rata – rata nilai kekerasan pada daerah *transverse* dan *surface* untuk pembandingan hasil fabrikasi Mg AZ31B.
2. Mengetahui rata – rata nilai kekuatan luluh dan modulus elastisitas Mg AZ31B untuk parameter pengujian fatik siklus rendah serta mempelajari pengaruh perbedaan *speed rate* yang dinaikkan hingga dua kali.
3. Mempelajari fatik siklus rendah melalui pendekatan persamaan *Coffin-Manson-Basquin* dan mengamati fenomena yang terjadi selama proses pengujian Mg AZ31B.
4. Mengetahui perubahan mikrostruktur dan pengaruh fasa dalam Mg AZ31B terhadap perilaku deformasi plastis atau beban siklik.
5. Menjelaskan korelasi karakteristik patahan fatik Mg AZ31B terhadap deformasi yang terjadi akibat beban siklik.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah diberikan agar pembahasan dari hasil yang didapatkan lebih tertuju dan tersusun dengan baik. Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini, yaitu:

1. Pengujian LCF pada laju regangan konstan dan temperatur ruang $\sim 25^{\circ}\text{C}$.
2. Amplitudo regangan yang diberikan dalam *range* 0,004 mm/mm – 1,0 mm/mm.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. PENDAHULUAN

Pendahuluan berisi latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka membahas mengenai magnesium, magnesium AZ31B, pengaruh elemen padu Mg AZ31B, *fatigue*, observasi *Scanning Electron Microscope (SEM)*, observasi struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian berisi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan penelitian, pengujian – pengujian dan diagram alir penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan berisi data, hasil penelitian dan pembahasan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penutup berisi hasil akhir berupa kesimpulan serta saran.

6. DAFTAR PUSTAKA

Berisikan mengenai literatur – literatur atau jurnal internasional yang didapat penulis demi mendukung dalam penyusunan penelitian ini.

7. LAMPIRAN

Berisikan hal-hal yang mendukung pada penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnesium

Pada tahun 1808 logam magnesium (Mg) pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey. Pada masa lalu, logam jenis ini digunakan secara luas dalam aplikasi khusus di industri nuklir, logam dan pesawat militer (Mordike *and* Ebert, 2001). Umumnya magnesium memiliki sifat sebagai berikut: Memiliki densitas yang rendah dibandingkan material logam lainnya, nilai kekerasan yang tinggi, ketahanan korosi, konduktivitas listrik dan termal yang lebih baik serta kekuatan tarik menengah (Friedrich *and* Mordike, 2006). Magnesium termasuk golongan logam dasar yang ringan karena massa jenis atau densitas berkisar antara 1,74 – 1,83 g/cm³ (Endo, *et al.*, 2016).

Apabila ingin memperbaiki sifat fisik, mekanik, komposisi dan bentuk maupun struktur, magnesium dapat dikombinasikan dengan unsur lainnya sebagai unsur pepadu contohnya seperti logam aluminium. Kekuatan tarik dan kekerasan magnesium dapat ditingkatkan kualitasnya dengan cara dipadu dengan kombinasi unsur aluminium, zinc, mangan dan material lain. Salah satu magnesium paduan magnesium, aluminium dan zinc adalah Magnesium AZ31B. Unsur logam magnesium tersedia sangat berlimpah pada kerak bumi sekitar 2 – 3% dengan

persentase untuk magnesium murni 99,9%. Titik lebur magnesium cenderung rendah dibandingkan semua jenis logam khususnya alkali tanah berkisar antara 650 °C atau 923 K (Jayasathyakawin, *et al.*, 2020). Klasifikasi Mg murni alkali tanah seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Magnesium Murni (Mg) (Friedrich *and* Mordike, 2006)

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

2.2 Magnesium AZ31B

Magnesium AZ31B (Mg AZ31B) merupakan jenis magnesium paduan yang mengandung aluminium, zinc dan besi yang paling sedikit persentasenya. Penggunaan magnesium jenis ini banyak dikembangkan oleh peneliti material modern atau material maju karena potensinya yaitu penggunaan material masa depan di bidang kedokteran atau *medicals and clinical sciences* khususnya tulang manusia (*orthopedic*) (Faruk, 2017). Mg AZ31B menarik perhatian yang signifikan di bidang biomedis karena sifatnya sifat mekanik yang sangat baik yaitu biodegradasi dan biokompatibilitas. Kepadatan dan modulus elastisitas berada dalam kisaran yang sama dengan tulang manusia alami, sehingga membuatnya menjadi pengganti tulang yang ideal. Tidak seperti biomaterial logam lainnya, Mg AZ31B dapat diadsorpsi oleh jaringan dan tidak perlu melakukan pembedahan kedua setelah jaringan sembuh. Dalam hal ini, implan yang dapat terurai secara hayati larut dalam lingkungan fisiologis setelah memenuhi fungsinya, terutama di bidang kardiovaskular (Zhang, *et al.*, 2018). Modulus elastisitas (*young's modulus*)

atau kekakuan magnesium diantara 40 hingga 50 GPa. Kekakuan material tersebut menyerupai kekakuan tulang manusia yaitu diantara 10 hingga 40 GPa. Sejak awal 1878 Mg dan paduannya telah diteliti untuk penggunaan material modern atau material maju sebagai biomaterial. Meskipun logam Mg memiliki kekuatan tarik tidak seperti baja dan kekakuannya rendah, namun Mg memiliki sifat dan kemampuan apabila dijadikan sebagai bahan implan tulang manusia, tidak hanya aman namun menekan biaya atau *cost* jauh dari harga material implan lainnya (Staiger, *et al.*, 2006). Logam Mg memiliki kelebihan yang tidak dipunyai oleh logam lain nya, yaitu sifat *biodegradable*, *non – toxic* dan *mechanical properties* layaknya tulang manusia pada umumnya (Sukmana, 2017). Sifat *Biodegradable* menjadikan logam Mg populer di bidang *materials*, *mechanical*, *science*, dan *tissue engineering* sebagai kandidat terbaik untuk bahan implan tulang (Witte, *et al.*, 2008).

Idealnya, material implan yang dapat terurai seperti material berbasis Mg diharapkan memiliki penghalang korosi dengan tingkat korosi awalnya rendah di lingkungan tubuh, memungkinkan implan untuk bertindak sebagai perancah sampai pembentukan jaringan baru, dan selanjutnya bagian yang tersisa akan terkorosi secara cepat tanpa adanya toksisitas (Sezer, *et al.*, 2018). Banyak elemen paduan, termasuk elemen esensial (Ca, Sr, Zn, Si) dan unsur toksik rendah (Sn, Zr), telah ditambahkan ke dalam matriks magnesium untuk mendapatkan ketahanan korosi yang diinginkan serta untuk menjaga sifat mekanik selama proses degradasi berlangsung. Meskipun penambahan elemen paduan dapat meningkatkan ketahanan korosi pada beberapa sampel pengujian, namun sejauh ini

biokompatibilitas dan perilaku korosinya masih belum memuaskan. Pada tabel 2.2 secara umum Mg AZ31B memiliki komposisi kimia aluminium 2.5 - 3.5 %, Zinc 0.60 - 1.4 % dan kadar besi atau Fe yang harus rendah berkisar ≤ 0.0050 %, hal ini untuk menghindari korosi atau karat berlebih (Witte, *et al.*, 2005).

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Mg AZ31B (Matweb)

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

Sifat mekanik Mg AZ31B terdapat pada tabel 2.3 dengan *Hardness Brinell* berkisar 49 HB, *Tensile Strength* berkisar antara 200 – 260 MPa, elongasi 15% dengan modulus 15%.

Tabel 2.3 Sifat Mekanik Mg AZ31B (Matweb)

Sifat Mekanik (<i>Mechanical Properties</i>)	Satuan Metric
Kekerasan (<i>Hardness Brinell</i>)	49
Kekuatan Tarik Maksimum (<i>Ultimate Tensile Strength</i>)	260 MPa
Kekuatan tarik luluh (<i>Tensile Strength, Yield</i>)	200 MPa
	Strain 0.200 %
Kekuatan Mulur (<i>Elongation</i>)	15%
Kekakuan (<i>Young's Modulus</i>)	45.0 GPa
<i>Compressive Yield Strength</i>	97.0 MPa
<i>Ultimate Bearing Strength</i>	385 MPa
<i>Bearing Yield Strength</i>	230 MPa
Rasio Poisso	0.35
Modulus Geser	17.0 GPa
Kekuatan Geser	130 MPa
<i>Charpy Impact</i>	4.30 J

2.3 Pengaruh Elemen Padu Mg AZ31B

Material magnesium AZ31B merupakan paduan utama dari magnesium, aluminium dan zinc, dimana aluminium merupakan unsur yang lebih efektif untuk menaikkan sifat keras dan tarik magnesium. Maka dari itu pada dasarnya sebagian besar magnesium paduan elemen kedua terbanyak adalah aluminium. Unsur paduan lainnya diantaranya seperti aluminium, zinc, mangan, besi, silikon, tembaga, nikel dan kalsium (Li, *et al.*, 2006). Adapun pengaruh dari unsur-unsur paduan untuk bahan magnesium AZ31B sebagai berikut:

1. Aluminium (Al)

Sifat keras dan tarik yang ditimbulkan dari magnesium AZ31B berasal dari aluminium, semakin tinggi persentase aluminium, maka nilai kekuatan tarik dan kekerasan akan meningkat, begitupun sebaliknya. Aluminium (dengan simbol unsur Al), adalah salah satu unsur logam. Unsur yang terbesar ketiga di kerak bumi setelah oksigen (O₂) dan silikon (Si) adalah logam aluminium, dan membentuk 8% dari litosfer. Aluminium terdapat dalam bentuk senyawa aluminium oksida (Al₂O₃) yang merupakan senyawa aluminium yang paling banyak ditemukan. Karena itu harga barang dari aluminium murah. Massa jenis atau densitas aluminium termasuk golongan yang ringan namun tidak seperti magnesium, memiliki warna yang putih cenderung keperakan, sedikit lentur dan cukup lunak dengan kekuatan tarik sedikit melebihi magnesium. Logam aluminium sudah banyak digunakan dalam produk rumah tangga atau *home industries* seperti produk makanan berupa kaleng, *aluminium foil*, wajan atau kombinasi *teflon*, panggangan ikan berjaring, pisau, bingkai jendela, daun pintu

dan bagian pesawat maupun kapal. Aluminium juga kerap kali dikatakan logam kembar dengan magnesium, hal ini dikarenakan sifat dan tampilan aluminium sangat mirip dengan magnesium. Densitasnya yang rendah, *non – toxic*, memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik atau tahan karat dan dapat dengan mudah dilakukan proses pemesinan dengan tingkat kesulitan sedang.

2. Zinc (Zn)

Unsur pepadu zinc yang terdapat pada magnesium AZ31B, memperlihatkan peluang *weight loss* yang semakin tinggi pertahunnya, apabila 2 – 5% zinc terdapat pada magnesium itu sendiri. Zinc juga berfungsi sebagai pelapis bagi magnesium, pengaplikasian ini sama halnya seperti pipa galvanis. Zinc merupakan unsur yang dapat dipadukan dengan magnesium karena mempunyai sifat ketahanan karat yang baik atau bisa dipakai sebagai unsur pengendali karat. Sebagai contoh pencegahan unsur zinc diaplikasikan dengan cara menjadi lapisan proteksi atau *coating* dari suatu material agar material dasar lebih terlindungi dari karat, fungsinya tak hanya untuk melapisi, tetapi zinc juga berperan ganda menyerap elektron dari logam dan melapisinya sehingga reaksi oksidasi dapat berkurang. Paduan Mg – 5% Zn memiliki peluang di bidang *medical and clinical science* sebagai implan tulang yang bersifat *biodegradable* dengan nilai massa jenis atau densitas 1,753 gram/cm³, pengurangan berat sebesar 3,82 cm/tahun serta nilai kekerasan antara 44 – 60 HV.

3. Mangan (Mn)

Pada magnesium AZ31B mangan sangat dibutuhkan dalam pembuatan magnesium, karena semakin bertambahnya unsur paduan mangan pada magnesium maka suhu kritis menurun secara seimbang dan dapat meningkatkan kekuatan tarik tanpa mengurangi regangan, dan mangan merupakan salah satu unsur kimia yang memiliki kemampuan untuk mencegah ataupun mengurangi kegetasan suatu material pada suhu tinggi pada saat *hot rolled* atau *extrusion*. Meskipun Mg logam yang digolongkan getas namun mangan dapat mengurangi sifat getas tersebut setidaknya tidak seperti material keramik.

4. Besi (Fe)

Elemen besi pada paduan magnesium AZ31B merupakan unsur yang tidak diperlukan dalam jumlah yang besar, karena besi meningkatkan dan memicu korositas secara signifikan. Peranan unsur kimia besi sangat penting dalam kajian maupun ilmu biologi terutama pada tubuh manusia. Namun dalam ilmu biomaterial besi adalah unsur yang harus dihindari, apabila unsur besi dalam jumlah banyak terdapat pada implan tulang, besi akan menimbulkan infeksi dan menghambat proses penyembuhan atau *healing process*. Persentase kadar besi yang harus disesuaikan sebagai material implan tulang berkisar <0,002% dan tidak dianjurkan persentase di atas itu (Begum, *et al.*, 2009).

2.4 *Fatigue*

Kelelahan (*fatigue*) merupakan bentuk dari kegagalan material atau bahan yang terjadi pada struktur karena beban dinamik yang cenderung naik dan turun. Beban

dinamik tersebut terjadi di bawah kekuatan luluh dalam waktu yang lama dan tentunya berulang – ulang (Hasegawa, *et al.*, 2006). Kelelahan (*fatigue*) umumnya diawali kegagalan berupa keretakan pada permukaan material benda uji (Morita, *et al.*, 2010). Sebelum material mengalami kegagalan terdapat beberapa fase yang terjadi seperti:

1. *Crack Initiation*

Crack Initiation atau permulaan retak dapat terjadi apabila terdapat pemicu yang dapat menimbulkan *crack* lalu merambat dan menjalar hingga batasan tertentu akibat pembebanan yang naik turun serta berulang. Pemicu tersebut seperti lubang, porositas, *notch*, goresan, maupun cacat yang berasal dari material pabrik atau hasil *casting*.

2. Penyebaran atau Perambatan Retak

Penyebab utama penyebaran atau perambatan retak terjadi akibat jumlah siklus yang sudah melebihi kekuatan bahan. *Crack Initiation*, fase perambatan lalu perambatan retak terjadi dan terus berkembang hingga terdapat *microcracks*. Beberapa gabungan *cracks* yang telah menjadi *microcracks* akan membentuk dan menjadi *macrocracks* yang menimbulkan *cracks* semakin besar dan tidak terlihat halus, apabila pembebanan terus dilakukan *macrocracks* akan merusak bahan dan akhirnya bahan mengalami kegagalan atau *failure*.

3. *Fracture*

Kerusakan yang terdapat pada struktur merupakan tahapan akhir dari proses *fatigue*. Pembebanan yang berulang mengakibatkan struktur rusak dan mengalami kegagalan, hal ini didasari oleh konsep semakin cepat perambatan

retak yang terjadi maka bahan akan mengalami patah atau *fracture* sehingga bahan yang semula sempurna akan terbagi dua. Bahan yang mengalami tegangan dan regangan selama siklus berlangsung akan menimbulkan kerusakan atau cacat secara permanen (Badaruddin, *et al*, 2019).

Umumnya *fatigue* memiliki tiga siklus tegangan seperti: siklus tegangan yang bersifat dinamis dengan *amplitude* yang tetap (konstan), siklus tegangan yang berulang dan siklus yang tidak memiliki tegangan konstan (random atau acak). *Fatigue* terbagi menjadi dua jenis antara lain.

1. Apabila *fatigue* yang terjadi diantara 0 hingga 10^4 siklus dengan kondisi plastis pada material, *fatigue* jenis ini disebut *low cycle fatigue* yang kerap kali digunakan untuk perancangan struktur yang bersifat dinamik. Level tegangan yang diberikan pada *low cycle fatigue* akan dikurangi, namun akan mengabaikan keseluruhan efek dari pembebanan yang berulang tersebut.
2. Apabila *fatigue* yang terjadi diantara 10^4 hingga 10^7 siklus dengan kondisi elastis pada material, *fatigue* jenis ini disebut *high cycle fatigue*.

2.5 Fatik Siklus Rendah

Fatigue yang terjadi diantara 0 hingga 10^4 siklus dengan kondisi plastis pada material, *fatigue* jenis ini disebut *low cycle fatigue* yang kerap kali digunakan untuk perancangan struktur yang bersifat dinamik. Apabila ingin mengevaluasi, mendapatkan data pembahasan karakteristik sifat fatik dan meningkatkan kapabilitas fatik suatu material, diperlukan relasi antara $\Delta\varepsilon_p/2$ dan $2N_f$ (Chen, *et al.*,

2018). Pada persamaan 2.1 hubungan siklik regangan dapat dijelaskan dengan persamaan *coffin manson*:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

Pendekatan teori coffin manson basquin

ε'_f = koefisien daktilitas fatik

c = eksponen daktilitas fatik

A = Amplitudo regangan total

B = Amplitudo regangan elastis

C = Amplitudo regangan plastis

A = B + C

Korelasi antara *strain ampitude total* (amplitudo regangan total) dengan jumlah pembalikan regangan terhadap *failure* (kegagalan) dijelaskan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

E = modulus young (GPa)

N_f = jumlah siklus kegagalan (siklus)

$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2}$ = total amplitudo regangan (mm/mm)

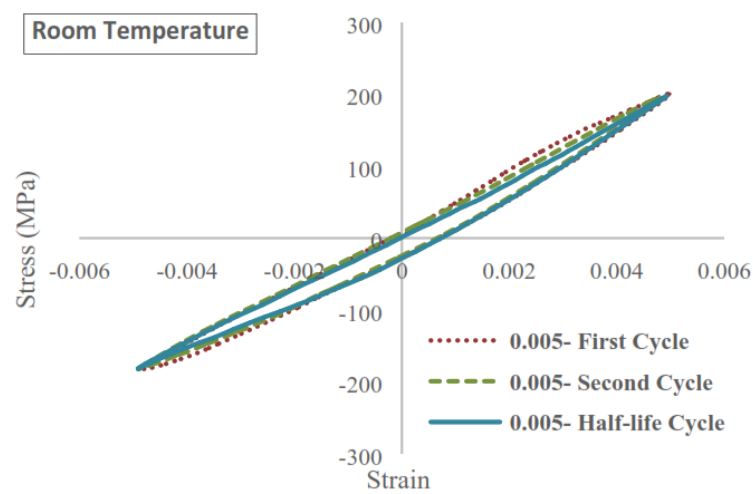
σ'_f = koefisien kekuatan fatik (MPa)

b = kekuatan exponent fatik

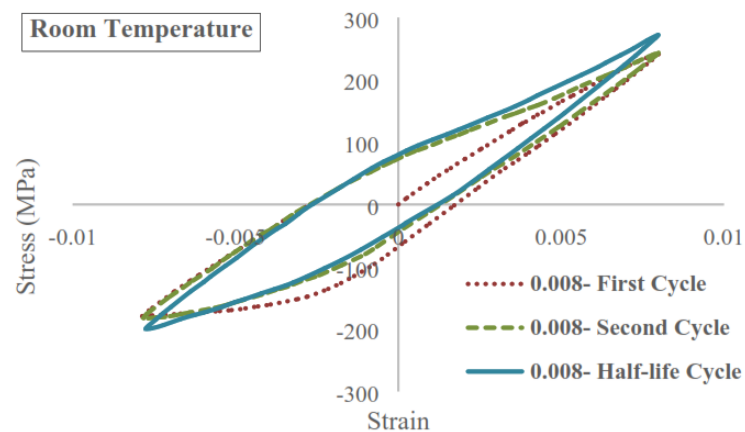
ε'_f = koefisien daktilitas fatik

c = exponent daktilitas fatik

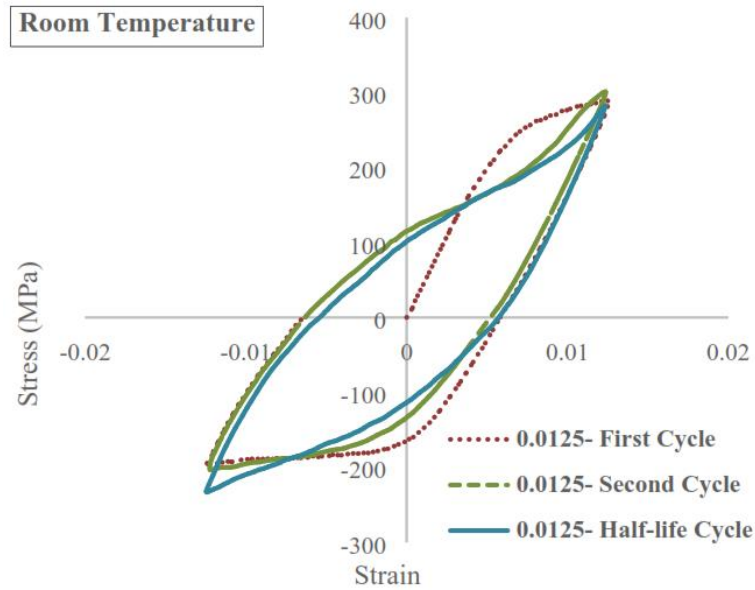
Ada beberapa hal yang mempengaruhi serta dapat merubah kondisi kelelahan (*fatigue*) seperti: tegangan konsentrasi yang berada pada lubang, porositas, *notch*, goresan, maupun cacat yang berasal dari material pabrik atau hasil *casting*, perubahan bentuk dan ukuran material yang berasal dari permukaan (*surface*) yang akan menimbulkan *crack initiation* atau retak awal, tegangan sisa akibat penekanan sebelumnya dan sifat yang berulang serta faktor komposisi kimia bisa mempengaruhi kondisi kelelahan (Hazeli, *et al.*, 2015).



(a)



(b)



(c)

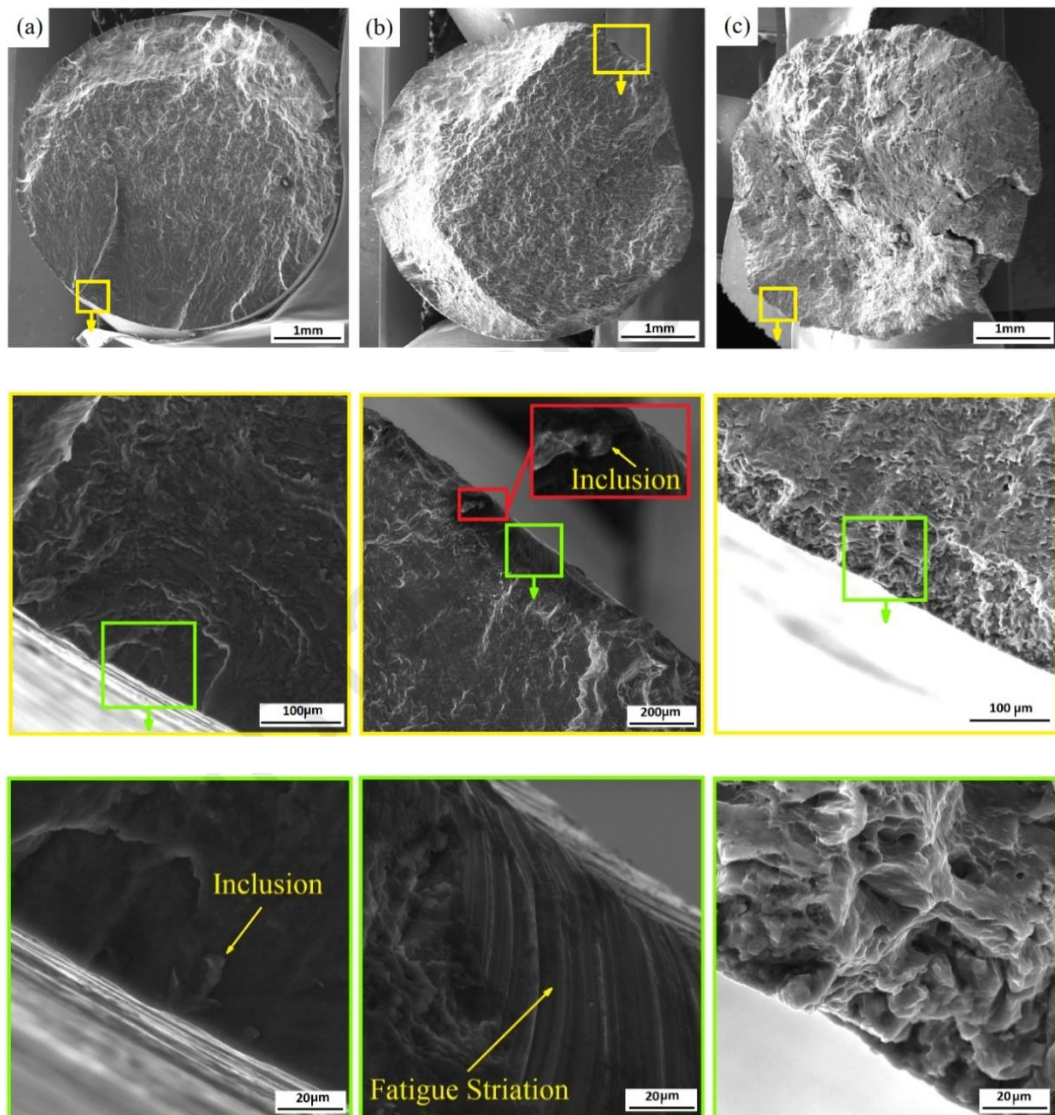
Gambar 2.1 Kurva perubahan *stress – strain* Mg AZ31B Ekstrusi temperatur ruang dengan siklus yang berbeda pada kondisi *strain amplitude* (a) 0,005 (b) 0,008 dan (c) 0,0125 (Jabbari, *et al*, 2020).

Contoh kurva perubahan *stress – strain* Jabbari (2020) pada gambar 2.1 pada temperatur ruang Mg AZ31B Ekstrusi pada kondisi *strain amplitude* (a) 0,005 (b) 0,008 dan (c) 0,0125. Menurut hasil pengujian pada *strain amplitude* 0,005 batas regangan plastis dapat diamati pada semua siklus. Ketika pengaplikasian *strain amplitude* 0,008 kurva histerisis menunjukkan perilaku asimetris karena terdapat *bulk defect* berupa *twinning* selama pembebanan tekan. Mengingat tekstur basal yang kuat pada Mg AZ31B ekstrusi, ketika bahan dikompresi ke arah ekstrusi (tegak lurus terhadap sumbu C), permulaan retak yang ditimbulkan cenderung memicu deformasi plastis. Pada pembalikan pertama dari kompresi ke tegangan, *bulk defect* berupa *detwinning* terjadi pertama kali di bagian bagian butir – butir yang menyebabkan penurunan tingkat pengerasan, untuk meningkatkan kekuatan

regangan tarik harus mengubah mekanisme deformasi dalam pengujian menjadi *slip – dominant*, yang mengakibatkan peningkatan laju pengerasan. Jika *strain amplitude* meningkat menjadi 0,0125, *crack* dimulai waktu pembebanan pertama dimulai (Jabbari, *et al*, 2020).

2.6 Observasi *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Observasi *Scanning Electron Microscope* atau SEM memiliki tujuan untuk mengetahui gambar hasil perlakuan maupun pengujian atau foto struktur yang telah dilakukan sejumlah tahapan pengujian dan dilihat menggunakan mikroskop sesuai dengan pembesaran yang diperlukan. Umumnya mikroskop yang digunakan memiliki pembesaran hingga 1000 kali. Hasil dari observasi bergantung pada proses atau tahapan optimisasi seperti: preparasi sampel, pengaturan parameter *spot intensity*, *aperture*, *contrast*, *brightness*, *capturing time* dan *image processing* (Clemens and Scheu., 2006). Seperti pada gambar 2.2 pengujian yang dilakukan oleh (Jabbari, *et al.*, 2020). Hasil observasi menunjukkan bahwa retakan dimulai dari atau dekat permukaan sampel pada suhu yang berbeda. Pada suhu ruang dan 100 °C, retakan berasal dari daerah inklusi. Ketika peningkatkan suhu hingga 100 °C, kegagalan fatik dapat diamati lebih awal pada permukaan fraktur. Pada suhu 200 °C, permukaan fraktur menunjukkan bahwa retakan yang dimulai pada batas butir, dimana bidang geser batas butir memainkan peran penting dalam deformasi plastis, suhu dan rongga terbentuk pada batas-batas butir. Ketika suhu 100 °C terdapat kegagalan berbentuk goresan (*striation*), hal ini bisa saja disebabkan karena ketika proses pembalikan menimbulkan tegangan yang seragam sehingga terlihat seperti goresan.

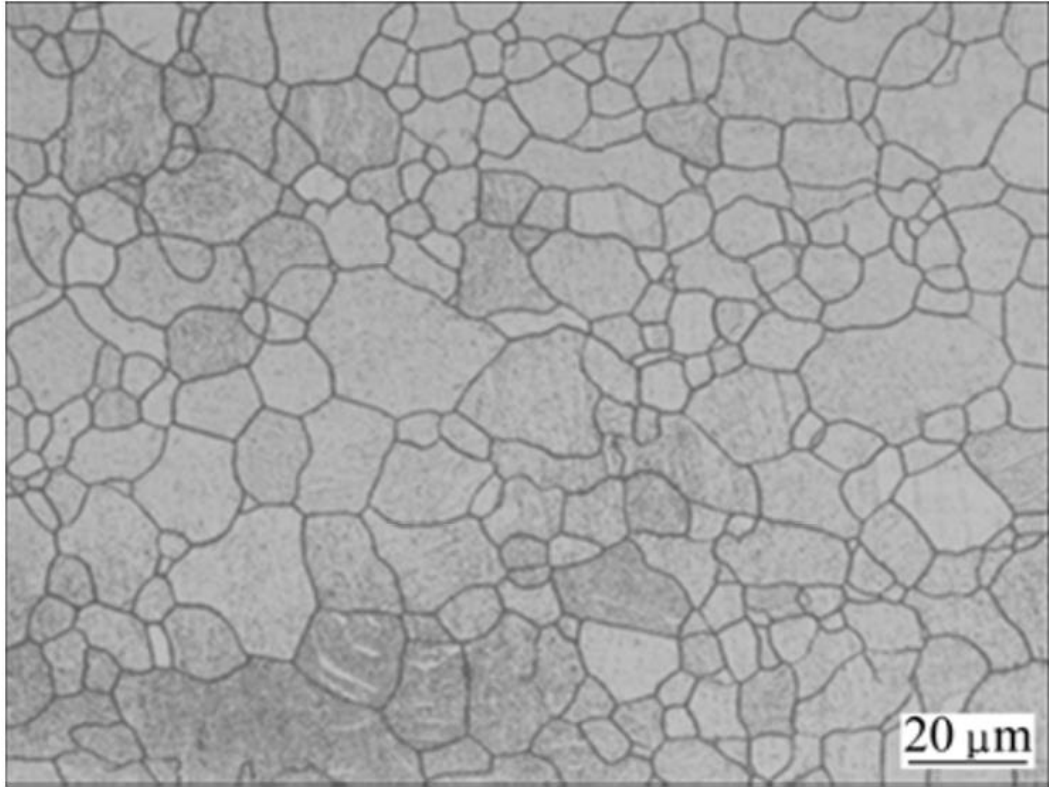


Gambar 2.2 Daerah permukaan patah (*fracture*) pada sampel uji fatik: a) temperatur ruang, b) 100 °C, and c) 200 °C (Jabbari, *et al.*, 2020).

2.7 Observasi Struktur Mikro

Bentuk, ukuran dan jumlah butir suatu material yang telah melewati tahapan proses pembentukan, perlakuan dan pengujian yang mengakibatkan deformasi plastis akan berubah secara permanen, dengan dilakukannya observasi struktur mikro kita dapat

mengetahui bagaimana bentuk, ukuran dan jumlah butir (Farbaenic, *et al.*, 2016). Umumnya mikroskop yang digunakan memiliki pembesaran 1 hingga 100 kali.



Gambar 2.3 Struktur mikro Mg AZ31B yang diekstrusi (Geng, *et al.*, 2012)

Observasi struktur mikro yang telah dilakukan Geng (2012) pada Mg AZ31B yang diekstrusi dan dipotong dengan penampang longitudinal pada gambar 2.2, ukuran butir berkisar 15 μm dan orientasi butir menyebar secara simetri aksial, garis putus-putus kasar warna putih menunjukkan lokasi distribusi tegangan. Proses etsa (*etching treatment*) dengan menggunakan:

4.2 g picric acid

10 mL acetic acid

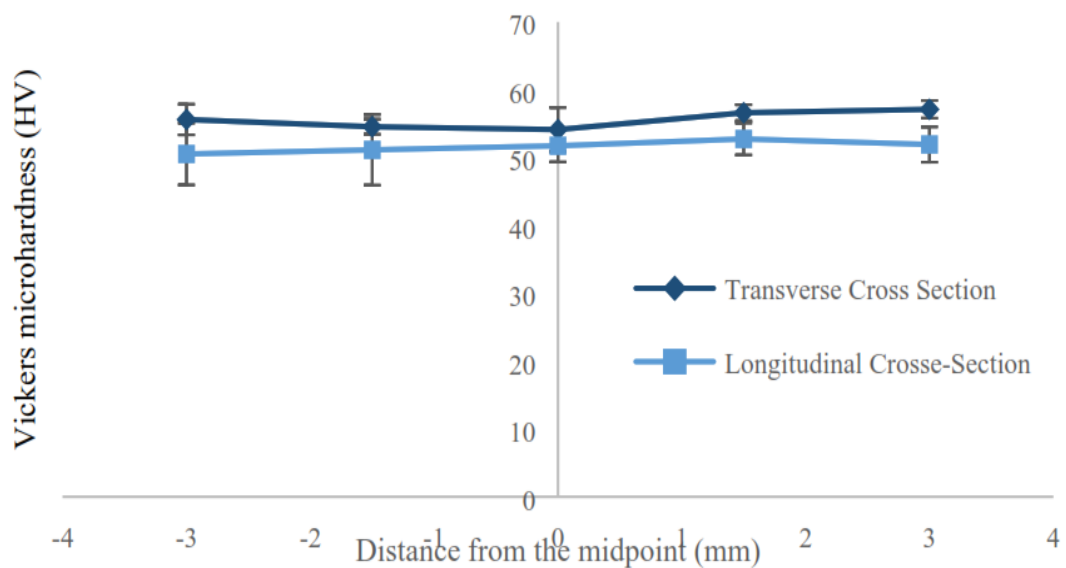
10 mL air

70 mL ethanol

Cairan etsa yang digunakan sangat mempengaruhi hasil observasi, gambar yang sedikit agak gelap dan samar, bentuk butir cenderung memanjang karena hasil ekstrusi.

2.8 Kekerasan

Sifat mekanik suatu material yang perlu diperhatikan adalah kekerasan (*hardness*). Kekerasan merupakan sifat mekanik yang sangat penting karena sifat tersebut akan menjadi tolak ukur material terhadap kekuatan untuk menahan deformasi plastis, gaya tekan permukaan maupun penetrasi.



Gambar 2.4 *Microvickers* Mg AZ31B Ekstrusi (Jabbari, *et al.*, 2020).

Hasil uji kekerasan yang telah dilakukan Jabbari (2020) pada gambar 2.4, menunjukkan bahwa proses pembentukan logam mempengaruhi nilai kekerasan. Proses ekstrusi merubah struktur butir dan sifat kekuatannya bertambah namun material akan cenderung getas. Potongan *transverse cross section* memiliki nilai

kekerasan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan potongan *longitudinal cross section*. Hal ini dikarenakan deformasi plastis yang terjadi cenderung lebih besar pada daerah *transverse cross section* dan semakin jauh titik penetrasi dari titik pusat maka semakin besar pula nilai kekerasannya. Apabila aplikasi material maju atau modern seperti biomaterial *biodegradable* ingin dilakukan pengujian kekerasan sebaiknya menggunakan metode indentasi *microvickers*. Pemilihan metode yang tepat akan meningkatkan akurasi hasil sehingga penelitian yang dilakukan akan memiliki *mechanical properties* yang sempurna. Terutama pada baut tulang dengan ukuran yang tidak terlalu besar, karena alasan inilah diwajibkan untuk menggunakan metode yang memfasilitasi atau mendukung luas daerah permukaan kecil yang hendak diindentasi. Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk kalkulasi nilai kekerasan, yang pertama nilai kekerasan langsung terbaca pada *dial* indikator dan yang kedua menghitung secara manual dapat menggunakan persamaan 2.3.

$$HV = 1,8544\left(\frac{P}{d^2}\right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

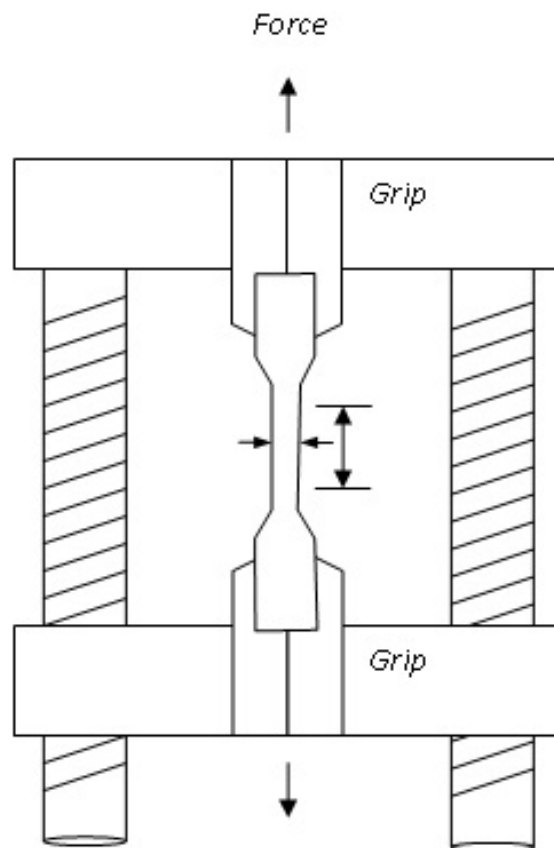
$HV = \text{Hardness Vickers}$

$P = \text{Pembebanan (Kgf)}$

$D = \text{Panjang rata – rata dua diagonal indentasi (mm)}$

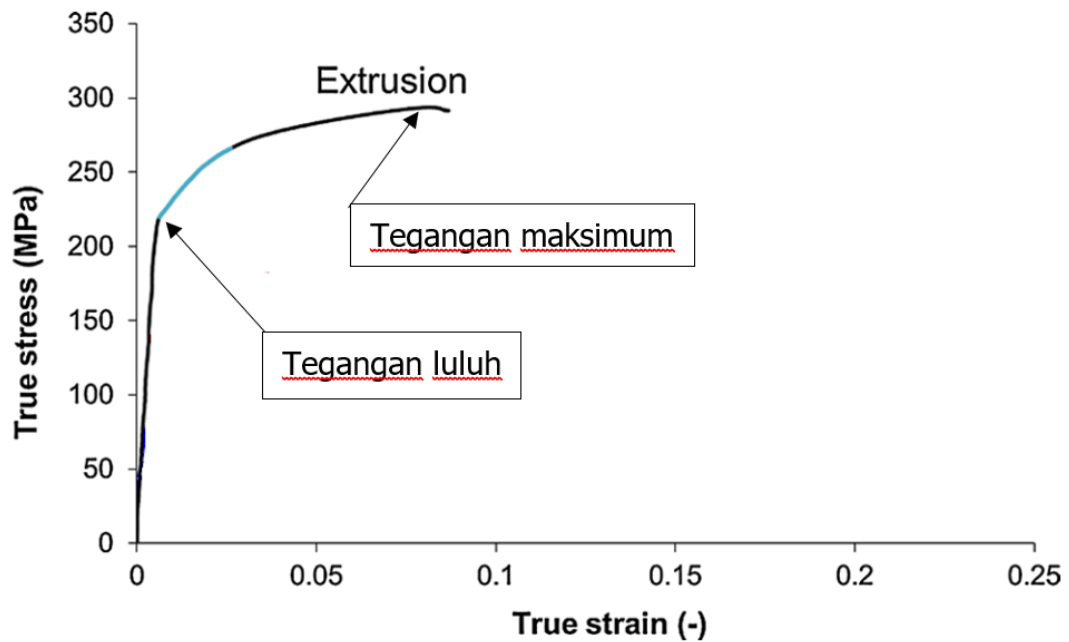
2.9 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik suatu material dapat diketahui dengan melakukan uji tarik statis, seperti pada gambar 2.5 material yang akan ditarik dicekam terlebih dahulu lalu diberi gaya tarik secara bertahap dan terus menerus hingga material tersebut mengalami deformasi plastis dan akhirnya patah. Material terbagi menjadi dua jenis yaitu patah getas dan patah ulet, untuk Mg AZ31B yang dibentuk melalui proses ekstrusi jenis patahan akan bersifat getas.



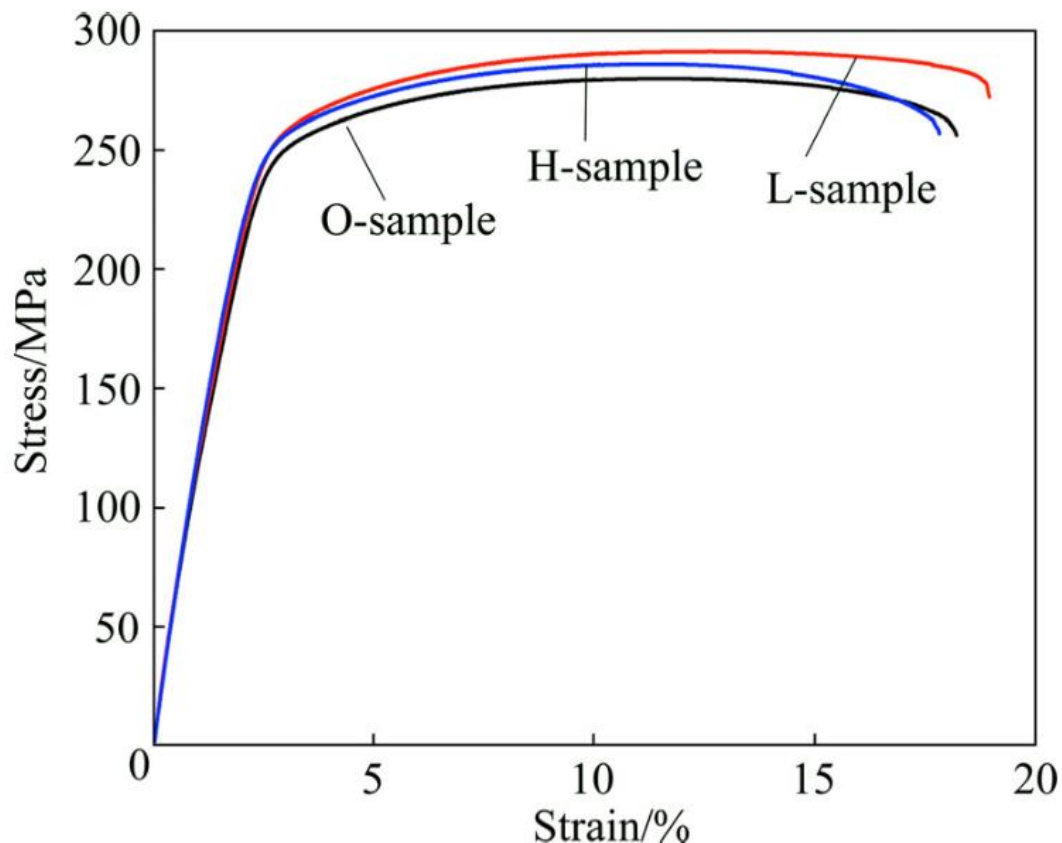
Gambar 2.5 Skema Uji Tarik (ASM, 2002).

Standar dalam pengujian tarikpun berbeda-beda, umumnya untuk logam baja dan paduannya memakai standar ASTM E8, namun untuk Mg AZ31B ekstrusi menggunakan ASTM B557-02a yaitu untuk *magnesium alloy products*.



Gambar 2.6 Kurva Tegangan - Regangan Mg AZ31B Ektrusi (Gzyl, *et al.*, 2014).

Gzyl (2014) telah melakukan *tensile test* terhadap Mg AZ31B Ektrusi dan mendapatkan kurva tegangan – regangan seperti tampak pada gambar 2.6. Tegangan luluh ditandai dengan warna biru muda (*cyan*) dengan nilai tegangan 220 MPa, dan tegangan luluh merupakan tanda bahwa material tersebut mengalami fase transisi dari elastis menjadi plastis. Kekuatan tarik maksimum atau tegangan maksimum memiliki nilai tegangan 280 Mpa. Setelah mengalami kekuatan tarik maksimum material langsung putus atau patah getas. Secara teoritis maupun praktikal logam magnesium tidak akan mengalami pemuluran atau *necking* dan regangan yang dihasilkan pun sangat kecil serta tidak seperti logam baja maupun paduannya, magnesium umumnya memiliki kekuatan menengah atau di bawah logam – logam lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh Yang (2018) kekuatan tarik yang didapatkan tidak berbeda jauh dengan Gzyl (2014) hanya saja variasi yang diujikan terhadap 3 sampel yaitu sampel O, H dan L.



Gambar 2.7 Kurva Tegangan - Regangan Mg AZ31B Ektrusi dengan sampel O, H dan L (Yang, *et al.*, 2018).

Kurva Tegangan - Regangan Mg AZ31B Ektrusi dengan sampel O, H dan L kekuatan tarik oleh Yang (2018) pada gambar 2.7. Kekuatan luluh dari Sampel O, L dan H adalah 238, 254 dan 253 MPa dan kekuatan tarik sampel O, L dan H adalah 269, 293 dan 278 MPa. Kekuatan luluh atau tarik sampel O lebih rendah dari dua sampel lainnya. Sampel O terlihat adanya dislokasi dalam batas butir, hal ini terjadi akibat proses pembentukan logam yaitu ekstrusi dingin. Meskipun hasil menunjukkan bahwa kekuatan luluh atau tarik hanya meningkat sedikit dan memiliki regangan yang rendah. Secara teoritis atau penghitungan manual ada

beberapa persamaan yang dapat digunakan untuk mengetahui beberapa aspek kekuatan tarik seperti:

1. Tegangan tarik (*Stress*)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

$$\sigma = \text{Tegangan tarik; } \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (MPa)}$$

F = Gaya (N)

A₀ = Luas mula dari penampang batang uji (mm²)

2. Regangan tarik (*Strain*)

$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

ε = Regangan atau bilangan murni

ℓ = Panjang batang (mm)

Δℓ = Perubahan panjang (mm)

ℓ₀ = Panjang semula (mm)

3. Modulus Elastisitas (*Young's Modulus*)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

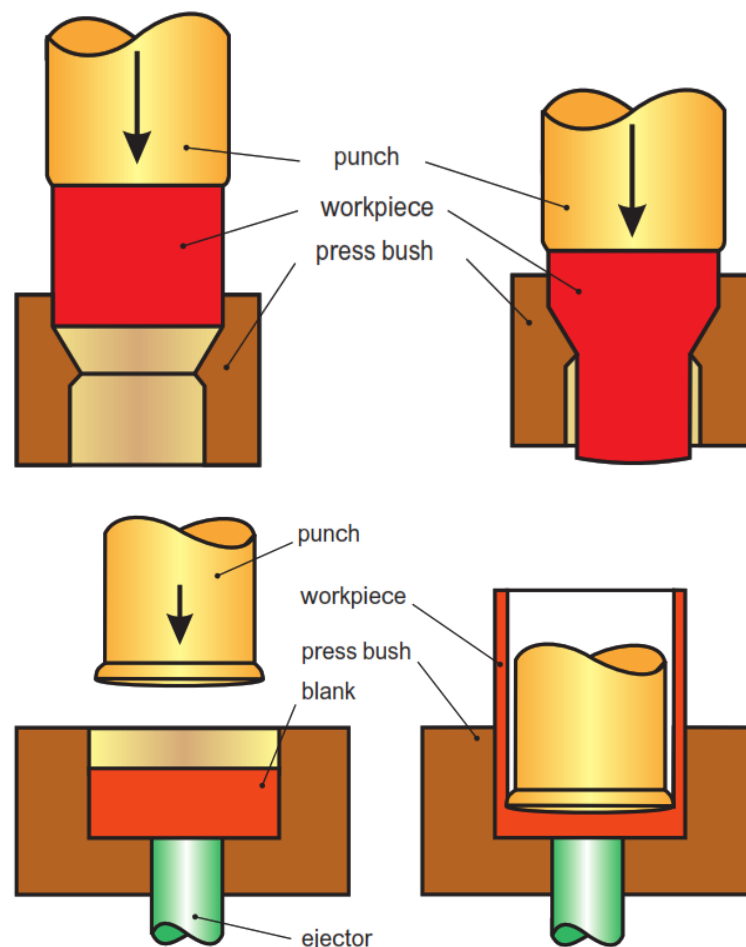
E = Modulus elastis (N/m²)

σ = Tegangan (MPa)

ε = Regangan (mm/mm)

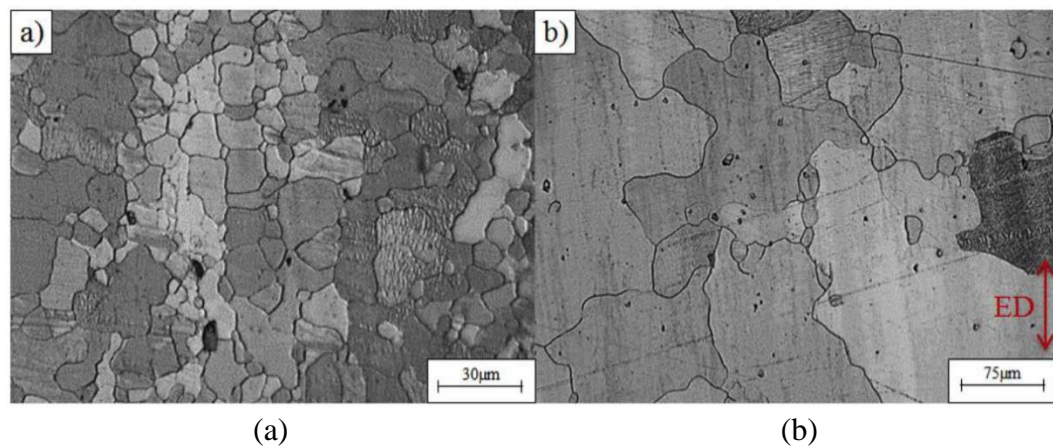
2.10 Strain Hardening

Material yang melewati proses pembentukan pengerjaan dingin (*cold working*) akan mendapati fase pengerasan regangan (*strain hardening*) dan perubahan ukuran, bentuk serta struktur butir (Morita, *et al.*, 2010). Pengerjaan dingin pada temperatur atau suhu yang rendah lebih tepatnya di bawah fase rekristalisasi. Terdapat beberapa pembentukan logam yang menggunakan pengerjaan dingin yaitu ekstrusi. Logam magnesium berbentuk poros (*rod*) umumnya dilakukan pembentukan dengan proses ekstrusi, seperti pada gambar 2.8 ekstrusi di sini diartikan pembuatan logam yang ditarik menyesuaikan ukuran yang diharapkan namun penampangnya tetap (Zhou, *et al.*, 2016).



Gambar 2.8 Mekanisme Proses Ekstrusi (Springer, 1998).

Pengerjaan dingin akan memicu timbulnya efek pengerasan regangan (*strain hardening*). Proses pengerasan regangan ditandai dengan perubahan fisik dan sifat mekaniknya, seperti kekuatan yang meningkat dan kekerasan yang naik dengan signifikan. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar efek deformasi pada bahan atau material semakin besar pula perubahan sifat mekaniknya. *Strain hardening* erat kaitannya dengan kekuatan dan keuletan, apabila mengharapkan kekuatan proses pembentukan pengerjaan dingin adalah solusinya namun dibalik kelebihan pasti ada kekurangan, kekurangan yang sangat menonjol material tidak akan bersifat ulet cenderung getas (Chowdhury, *et al.*, 2010).



Gambar 2.9 Struktur mikro Mg AZ31B yang dibentuk dengan proses ekstrusi (a) 30 μm (b) 75 μm (Wong, *et al.*, 2018).

Proses ekstrusi akan merubah struktur mikro Mg AZ31B seperti pada gambar 2.9, bentuk butir memiliki bentuk yang memanjang dan pipih, bintik hitam yang ada merupakan aluminium untuk menaikkan sifat keras magnesium dan garis garis halus hingga kasar merupakan deformasi yang dihasilkan akibat gaya tarik ketika proses pembentukan logam tersebut. Deformasi yang terjadi sangat besar pada area permukaan (*surface*), karena penampang tetap dan logam nya ditarik.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Juli 2020 sampai dengan Desember 2020. Penelitian ini akan dilakukan di beberapa tempat, yaitu sebagai berikut:

1. Pembuatan spesimen uji tarik dan fatik dilakukan di Solo Abadi (*Chemical Nitrate – Precision Part*) Surakarta, Jawa Tengah.
2. Pengujian tarik statis dan fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Pengujian sifat keras bahan dengan *micro vickers* dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Serpong.
4. Pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop metalurgi dilakukan di Balai Penelitian Teknologi Mineral Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Lampung.

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian yang digunakan

Adapun alat dan bahan penelitian yang dipergunakan adalah:

1. Bahan Penelitian

Magnesium AZ31B yang dibeli di pasaran dalam bentuk silinder dengan dimensi panjang 130 mm dan diameter 16 mm yang digunakan dalam penelitian, seperti ditampilkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Foto Mg AZ31B bentuk silinder (Tanpa Satuan)

Berdasarkan gambar 3.1 bahan yang digunakan dalam penelitian ini magnesium AZ31B berbentuk *cylinder* yang telah diuji komposisi kimia seperti pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Hasil Komposisi Kimia Magnesium AZ31B

Unsur	% .wt
Aluminum, Al	2,71
Nickel, Ni	0,001
Calcium, Ca	0,001
Zinc, Zn	0.69
Copper, Cu	0,001
Iron, Fe	0,002
Silicon, Si	0,18
Magnesium, Mg	Bal
Manganese, Mn	0,32

2. Peralatan Penelitian

a. MTS *Landmark* 100 kN

Pengujian tarik statis dan fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) menggunakan MTS *landmark*. MTS *landmark* mampu menerima beban hingga 100 kN.



Gambar 3.2 Mesin MTS *Landmark* 100 kN

SPESIFIKASI

Merk = MTS *Landmark*

Kapasitas = 100kN

Tipe = U PD 10

Tahun = 2015

Memiliki tiga skala pengukuran beban

A = 0 – 20 kN

A + B = 0 – 50 kN

A + B + C = 0 – 100 kN

b. *Vertical Machining Center (CNC Milling Machine)*

Vertical Machining Center digunakan untuk pembuatan spesimen uji tarik dan fatik. *Spindle* utama mesin VMC ini terdapat pada posisi vertikal. Proses pemesinan yang mampu dilakukan mesin ini antara lain seperti: frais (*milling*), pengeboran (*drilling*), *tapping*, pembesaran lubang, kontur permukaan, dan lain-lain. Pada Mesin VMC ini putaran *spindle*, gerakan pada 3 Axis (Sumbu X, Sumbu Y, Sumbu Z), dengan bantuan *CNC controller* maka putaran *spindle*, gerakan pada masing-masing sumbu dan *tool* yang tersimpan pada *automatic tool changer* akan bekerja secara simultan mengikuti program yang sudah dipersiapkan.



Gambar 3.3 *Vertical Machining Center (CNC Milling Machine)*

SPESIFIKASI

Max. Tool Length = 300 mm

Max. Tool Weight = 7 Kg

Max. Tool Diameter Adjacent Empty = \varnothing 150 mm

Max. Distance from Spindle Nose to worktable = 800 mm

Speed = $10000 \frac{r}{min}$ (inner cooler)

c. *Vickers Hardness Tester*

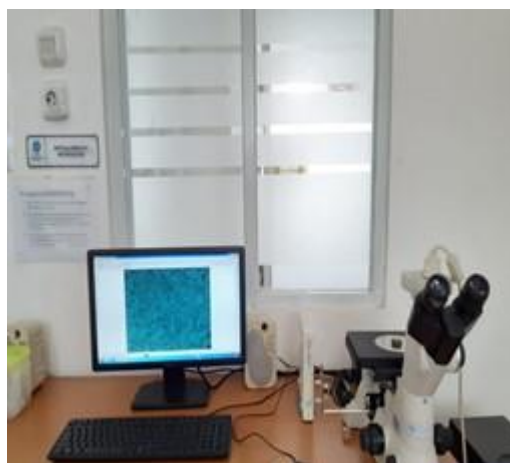
Prinsip dasar dari pengujian *Vickers Hardness* ini sangat sederhana yakni indenter yang berbentuk piramida menekan material atau benda yang diuji dan selanjutnya dievaluasi bagian permukaan benda atau material yang mengalami indentasi setelah diberikan penekanan yang telah diatur besar gayanya.



Gambar 3.4 *Vickers Hardness Tester*

d. Mikroskop Metalurgi

Mikroskop Metalografi digunakan untuk mengetahui karakteristik struktur sebuah logam atau sebuah paduan



Gambar 3.5 Mikroskop Metalurgi

e. Micrometer Digital



Gambar 3.6 Micrometer Digital

SPESIFIKASI

Range = 0 – 25 mm

Accuracy = $\pm 3\mu\text{m}$

Mass = 625 g

Digital step = 0,001 mm

Flatness = 0,3 μm f. *Scanning Electron Microscope*Gambar 3.7 *Scanning Electron Microscope* Zeiss EVO MA10

SPESIFIKASI

Maximum specimen heights = 100 mm

Maximum specimen diameter = 230 mm

Motorized stage travel XYZ = 80 x 100 x 35 mm

High Vacuum (HV) mode

Variable Pressure (VP) mode

Extended Pressure (EP) mode

3.3 Prosedur Pengujian

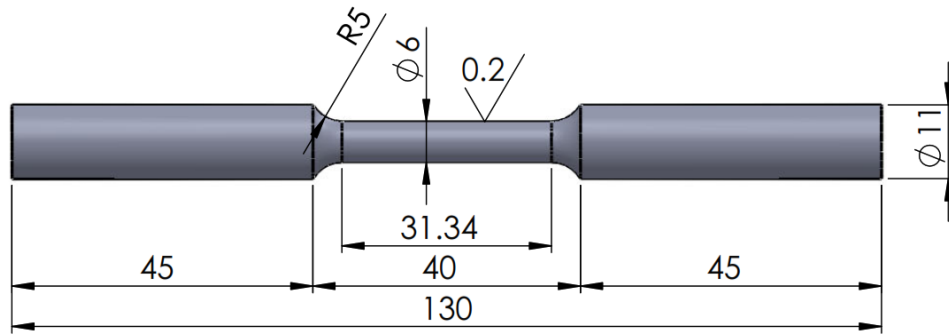
Adapun prosedur penelitian tesis ini dibagi menjadi beberapa tahapan proses, yaitu:

1. Persiapan Spesimen

Material yang digunakan dalam penelitian tesis ini yaitu Magnesium AZ31B dalam bentuk poros atau silinder.

2. Pembuatan Spesimen

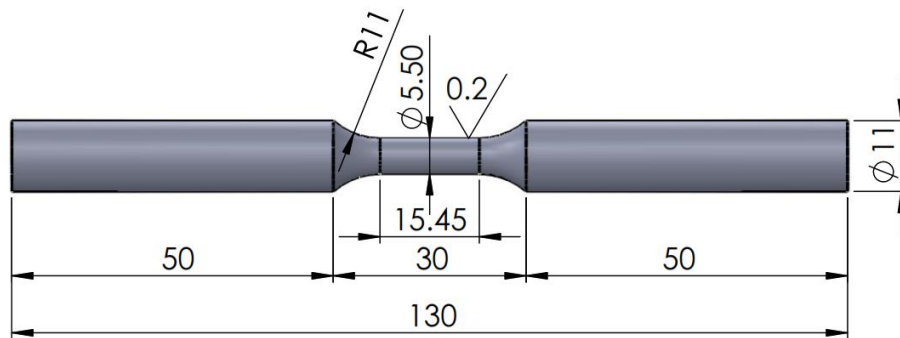
Magnesium AZ31B berbentuk poros atau silinder diameter 16 mm dan panjang 130 mm. Spesimen uji tarik dibentuk sesuai standar ASTM B557-02a (Gambar 3.8) dan foto spesimen uji tarik yang sudah dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.9. Dimensi dan ukuran spesimen uji fatik siklus rendah dibuat sesuai standar ASTM E606-92 (Gambar 3.10) dan foto spesimen ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.8 Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik (ASTM B557-02a)



Gambar 3.9 Foto spesimen uji tarik



Gambar 3.10 Bentuk dan ukuran spesimen uji fatik silus rendah (ASTM E606-92)



Gambar 3.11 Foto spesimen uji fatik silus rendah

3. Uji Tarik Statis

Data nilai *yield stress* (σ_y) dan *young's modulus* (E) harus diketahui terlebih dahulu sebelum uji fatik siklus rendah. Data tersebut dapat diketahui dengan cara uji tarik statis. Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

- a. Menyediakan sampel uji tarik statis dengan standar ASTM B557 – 02a
- b. Membuka program Controller 793B setelah itu klik manual command
- c. Memilih displacement mode, lalu naikan actuator keposisi nol (zero).
- d. Memasang spesimen pada cross head grip atas kemudian spesimen dicekam.
- e. Menurunkan cross head sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan ke dalaman 3 cm.
- f. Klik manual command dan klik control mood ke force.
- g. Kemudian klik auto offset untuk force. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- h. Memasang extensometer ke spesimen dengan posisi zero pin, dan klik manual offset untuk extensometer. Lalu lepaskan zero pin dari extensometer.
- i. Membuka Software MTS Test Suite (MPE), pilih template untuk uji tarik statis.
- j. Memasukkan data spesimen.

k. Memasukan initial speed dan secondary speed (mm/s).

l. Setelah menginput semua data lalu klik RUN

4. Uji Fatik Siklus Rendah

Prosedur pengujian perambatan retak fatik yang akan dilakukan menggunakan langkah-langkah berikut:

- a. Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E 606 – 92
- b. Membuka program *Controller 793B* setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (i).
- c. Pasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- d. Lalu *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam *grip* bawah dengan ke dalaman 3 cm.
- e. Klik *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
- f. Kemudian klik *auto offset* untuk *force*. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- g. Membuka *Software MTS Test Suite (MPE)*, pilih *template* untuk *low cycle fatigue testing* dan masukkan data *yield stress* dan modulus lalu, klik *RUN*.

5. Uji Kekerasan

Prosedur pengujian kekerasan menggunakan langkah langkah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan spesimen uji yang permukaannya rata, bersih dan mengkilap bebas dari kotoran serta minyak.
- b. Memilih indenter yang sesuai dengan uji microvickers dan letakkan pada pencekam (*ball holder*).

- c. Menentukan beban indentasi yang sesuai dengan cara memutar *handle* pada *load saver*.
- d. Meletakkan spesimen pada *anvil* dan menaikkan dengan memutar *hand wheel* hingga indenter kerucut intan menyentuh permukaan spesimen hingga jarum kecil pada indikator dial menunjukkan titik merah.
- e. Menurunkan *load handle* kebelakang sehingga terjadi pembebanan.
- f. Menunggu sampai beberapa detik (tergantung sifat material) penetrasi dirasa cukup dan memiliki hasil yang sempurna.
- g. Mengangkat kembali *load handle* keposisi semula, kemudian turunkan spesimen dengan memutar *handle wheel*.
- h. Mengeluarkan spesimen dari *anvil*, kemudian ukur diameter bekan penekanan dengan mikroskop pengukuran. Pengukuran sebaiknya dilakukan 3 – 5 kali ditempat yang berbeda dan pembuatan tabel data uji kekerasan seperti pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data uji kekerasan *Microvickers*

<i>Transverse Section</i>							
Lama Indentasi (s)	Beban (P) Kgf	No. Test	d ₁	d ₂	d	Nilai Kekerasan (HV)	Rata-rata HV
12	0,1	1					
		2					
		3					
		4					
		5					
<i>Surface Section</i>							
Lama Indentasi (s)	Beban (P) Kgf	No. Test	d ₁	d ₂	d	Nilai Kekerasan (HV)	Rata-rata HV
12	0,1	1					
		2					
		3					
		4					
		5					

6. Observasi Mikrostruktur dan Fraktografi

Secara singkat proses uji struktur mikro secara umum meliputi tahapan-tahapan berikut ini:

- a. Sampel yang akan diperiksa diratakan dengan memotongnya (ukuran sampel disesuaikan dengan kapasitas mikroskop), untuk sampel yang kecil bisa dilakukan *mounting* menggunakan resin sebagai pemegang sampel dengan arah permukaan yang akan diperiksa berada di bawah dan dibuat tidak tertutup resin.
- b. Sampel digerinda agar rata selanjutnya diampelas menggunakan ampelas karbon. Pengamplasanurut berdasarkan urutan dari ampelas kasar hingga halus (biasanya ampelas no 2000). Arah pengamplasan adalah tegak lurus terhadap ampelas sebelumnya. Hal ini dimaksudkan agar guratan-guratan bekas pengamplasan dapat hilang dan tidak mengganggu saat pemeriksaan menggunakan mikroskop optik. Potong material menjadi 2 arah yaitu *Transverse section/ cross section* (potongan melintang) yaitu bagian sampel dipotong tegak lurus mengikuti sumbu horizontal dan *Longitudinal Radial section* (sayatan radial/ membujur) yaitu sampel dipotong langsung pada bagian tengah dan sejajar mengikuti sumbu vertikal.
- c. *Polishing* sampel menggunakan kain beludru, hal ini dimaksudkan untuk menghilangkan guratan-guratan halus pada permukaan sampel yang telah selesai diampelas.
- d. Membersihkan sampel menggunakan air dan alkohol.
- e. Sampel ditetesi atau dicelupkan ke dalam cairan etsa yang telah dipersiapkan sesuai dengan konsentrasi cairan etsa pada Tabel 3.3. Lama pencelupan disesuaikan berdasarkan Tabel 3.3.

- f. Sampel dibersihkan dengan alkohol dan dikeringkan menggunakan hair dryer
- g. Sampel dilap menggunakan kain bludru atau tisu.
- h. Pemeriksaan menggunakan mikroskop optik.
- i. Apabila dilihat menggunakan mikroskop optik tidak jelas atau terlalu gosong maka ulangi langkah-langkah di atas dengan memvariasikan lama pencelupan.

Tabel 3.3 Larutan etsa dan cara penggunaannya untuk material Mg AZ31B

No	Nama	Komposisi	Cara	Penggunaan
1	Acetic – Picral	Acetic – picral: 10 mL acetic acid, 4.2 g picric acid, 10 mL H ₂ O, 70 mL ethanol (95%)	Pencelupan beberapa detik saja	Magnesium Alloys (AZ31B)

3.4 Variabel Pengujian

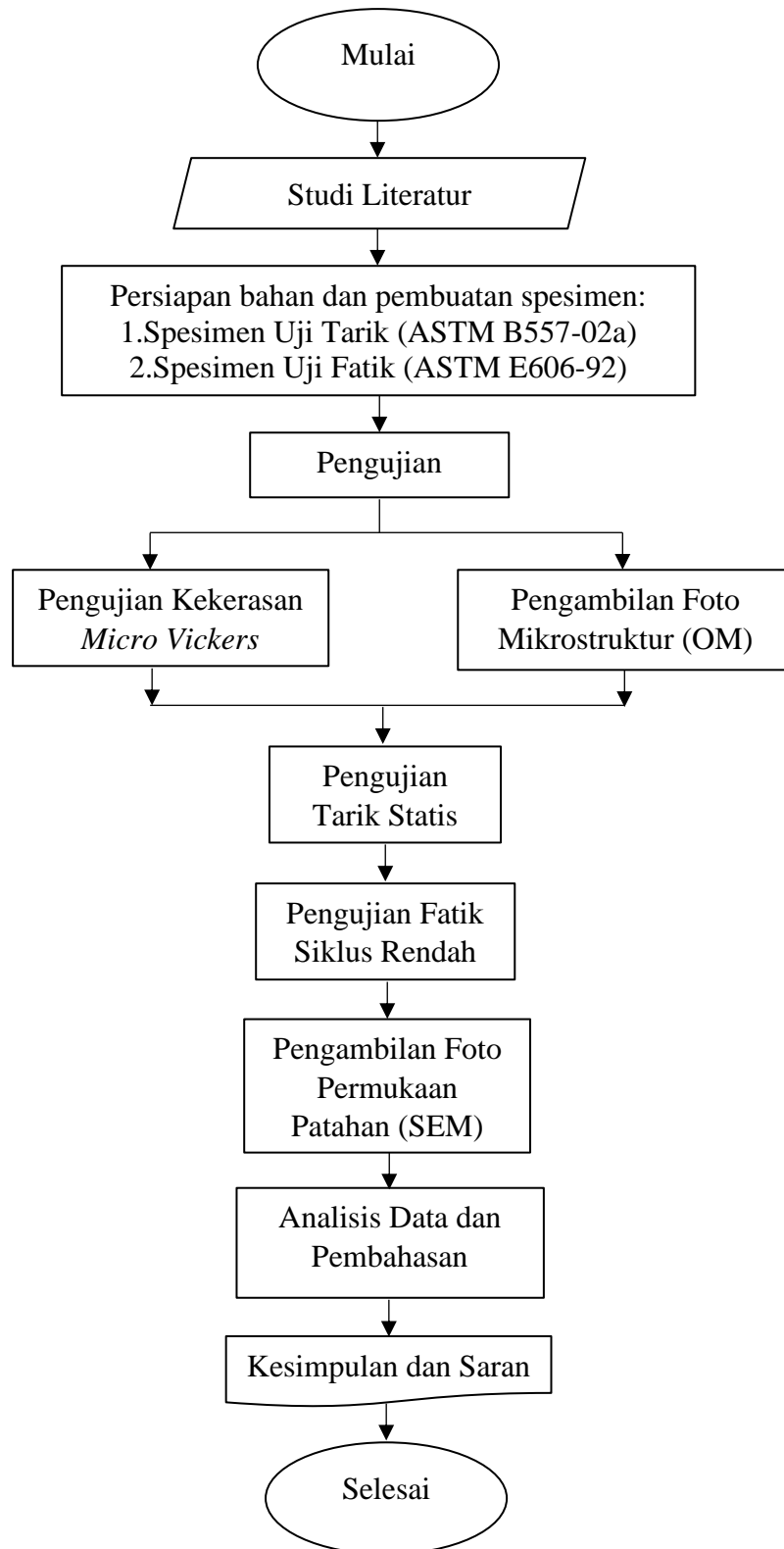
Matriks variabel pengujian fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) ditampilkan pada

Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Variabel Pengujian

No	Nama Spesimen	Laju regangan (1/s)	Amplitudo Regangan (mm/mm)	Frekuensi (Hz)
1	Mg3	0,00627	0,0040	0,3919
2	Mg4	0,00627	0,0040	0,3919
3	Mg5	0,00627	0,0050	0,3135
4	Mg6	0,00627	0,0050	0,3135
5	Mg7	0,00627	0,0060	0,2613
6	Mg8	0,00627	0,0060	0,2613
7	Mg9	0,00627	0,0080	0,1959
8	Mg10	0,00627	0,0080	0,1959
9	Mg11	0,00627	0,0100	0,1568
10	Mg12	0,00627	0,0100	0,1568

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.12 Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Adapun simpulan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Pengujian kekerasan *microvickers* pada *transverse section* memiliki rata – rata 61,78 HV dan *surface section* yaitu 64,27 HV. Hasil pengujian kekerasan tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil fabrikasi Mg AZ31B.
2. Data pengujian tarik yang akan digunakan untuk parameter uji fatik siklus rendah adalah nilai kekuatan luluh dengan rata – rata 186,01 MPa dan modulus elastisitas 43,72 GPa. Saat *speed rate* dinaikkan hingga dua kali, menghasilkan energi plastis dan elastis yang lebih tinggi dengan reduksi luas penampang lebih tinggi 5% dan elongasi meningkat 2%.
3. Umur fatik Mg AZ31B yang paling tinggi pada amplitudo regangan 0.004 mm/mm dengan 5112 siklus. Pada amplitudo regangan 0,01 mm/mm regangan plastis yang dihasilkan lebih besar yaitu 0,00451 mm/mm, dan regangan elastis 0.00549 mm/mm. *Cyclic softening* terjadi pada amplitudo regangan 0,005 dan 0,006 mm/mm, dan *cyclic hardening* pada amplitudo regangan 0,008 dan 0,01 mm/mm serta fenomena *Bauschinger effect* dapat diamati pada ampiltudo regangan 0,006 – 0,01 mm/mm. Penurunan BEF sekitar 1,6% tiap amplitudo regangan dinaikkan. Persamaan empiris untuk memprediksi fatik siklus rendah Mg AZ31B dapat dilakukan melalui pendekatan amplitudo regangan plastis-

elastis terhadap jumlah kebalikan siklus (*reversal to failure*, $2N_f$) (Persamaan Basquin-Coffin-Manson), yaitu:

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = 0,01324(2N_f)^{-0,1464} + 8,1202(2N_f)^{-1,2827}$$

4. Observasi struktur mikro yang dilakukan pada magnesium dengan amplitudo regangan 0,006 mm/mm memiliki bentuk butir yang bulat, memanjang dan pipih, ukuran butir tidak homogen antara 5-15 μm . Ukuran butir $<5 \mu\text{m}$ terdistribusi pada daerah batas butir. Fraktur yang terjadi bertipe intergranular fraktur.
5. Pada permukaan fraktur terdapat *cleavage surface* dan pada daerah patahan sebagian besar terdiri dari *cleavage* atau *brittle intergranular facets*, terdapat *crack* yang menyerupai seperti pola sungai yang merambat dari inisiasi retaknya, setelah itu pada bagian sisi kanan bawah terdapat *fatigue striation* dalam jumlah kecil dan pada zona deformasi plastis banyak ditemukan *dimples*.

B. Saran

Adapun saran dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian fatik siklus rendah pada Mg AZ31B dengan pemberian perlakuan terhadap spesimen.
2. Pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan pengambilan gambar menggunakan *Transmission Electron Microscope* untuk analisis mikrostruktur, identifikasi kecacatan material, analisis interfasa, struktur kristal, tatanan atom pada kristal, serta analisa elemental skala nanometer pada Mg AZ31B.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM B557 – 02a. 2002. *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy*. West Conshohocken. ASTM International.
- ASM E606 – 92. 1998. *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*. West Conshohocken. ASTM International.
- ASM Speciality Handbook. 1999. *Magnesium and Magnesium Alloys*. ASM International.
- ASM Speciality Handbook Vol 9. 1998. *Metallography and Microstructures*. ASM International.
- Badaruddin, M., Wardono, H., Wang, C. J., & Rivai, A. K. 2019. Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment. *International Journal of Fatigue*, 125, 406-417.
- Baumann, M. 2015. Screw Pull Out under Cyclic Fatigue Loading in Synthetic and Cadaveric Bone (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- Begum, S., Chen, D. L., Xu, S., & Luo, A. A. 2009. Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy. *International Journal of Fatigue*, 31(4), 726-735.
- Buldum, B. B., Aydın, S. I. K., & Ozkul, I. 2013. Investigation of magnesium alloys machinability. *International Journal of Electronics Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2(3), 261-268.
- Castro, F., & Jiang, Y. 2017. Fatigue of extruded AZ31B magnesium alloy under stress-and strain-controlled conditions including step loading. *Mechanics of Materials*, 108, 77-86.

- Chen, G., Gao, J., Cui, Y., Gao, H., Guo, X., & Wu, S. 2018. Effects of strain rate on the low cycle fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy processed by SMAT. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 536-546.
- Chowdhury, S. M., Chen, D. L., Bhole, S. D., Cao, X., Powidajko, E., Weckman, D. C., & Zhou, Y. 2010. Tensile properties and strain-hardening behavior of double-sided arc welded and friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(12), 2951-2961.
- Clemens, H., Mayer, S., & Scheu, C. 2017. Microstructure and properties of engineering materials. *Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science: From fundamentals to applications*, 1-20.
- 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.
- Farbaniec, 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.
- Faruk, M. E. R. T. 2017. Wear behaviour of hot rolled AZ31B magnesium alloy as candidate for biodegradable implant material. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(12), 2598-2606.
- Friedrich, Horst E., Barry L. Mordike. 2006. *Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications*. Germany. Springer.
- Geng, C. J., Wu, B. L., Du, X. H., Wang, Y. D., Zhang, Y. D., Claude, E., & Francis, W. 2013. Low cycle fatigue behavior of extruded AZ31B magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(6), 1589-1594.
- Gzyl, M., Pesci, R., Rosochowski, A., Boczkal, S., & Olejnik, L. 2015. In situ analysis of the influence of twinning on the strain hardening rate and fracture mechanism in AZ31B magnesium alloy. *Journal of Materials Science*, 50(6), 2532-2543.
- Hart, N. H., Nimphius, S., Rantalainen, T., Ireland, A., Siafarikas, A., & Newton, R. U. 2017. Mechanical basis of bone strength: influence of bone material, bone structure and muscle action. *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions*, 17(3), 114.

- Härtel, M., Illgen, C., & Wagner, M. F. 2016. Experimental evaluation of Bauschinger effects during tension-compression in-plane deformation of sheet materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 118, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- Hasegawa, S., Tsuchida, Y., Yano, H., & Matsui, M. 2007. Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy. *International Journal of Fatigue*, 29(9-11), 1839-1845.
- Hazeli, K., Askari, H., Cuadra, J., Streller, F., Carpick, R. W., Zbib, H. M., & Kontsos, A. 2015. Microstructure-sensitive investigation of magnesium alloy fatigue. *International Journal of Plasticity*, 68, 55-76.
- Huang, G., Li, J., Han, T., Zhang, H., & Pan, F. 2014. Improving low-cycle fatigue properties of rolled AZ31 magnesium alloy by pre-compression deformation. *Materials & Design*, 58, 439-444.
- 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.
- Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Chairman, C. A., & Balasundaram, R. 2020. Mechanical properties and applications of Magnesium alloy–Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 909-913.
- Li, F., Zhao, X., Zhang, H., He, W., Chen, H., & Guo, H. 2020. Bauschinger Effect of Mn18Cr18N Austenitic Stainless Steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 35, 399-406.
- Li, P. X., Zhang, B. P., Chen, J. Y., & Tu, Y. F. 2006. Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy Sheets Prepared by Extruding and Rolling. In *Advanced Materials Research* (Vol. 11, pp. 653-656). Trans Tech Publications Ltd.
- Manninen, T., Myllykoski, P., Taulavuori, T., & Korhonen, A. S. (2009). Large-strain Bauschinger effect in austenitic stainless steel sheet. *Materials Science and Engineering: A*, 499(1-2), 333-336.
- Matweb, Material Property Data. Magnesium AZ31B-F, Extruded Solid Shapes. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=5a005487e02e4e18b894b7867c3772f4&ckck=1>. Diakses pada 15 Oktober 2020.

- Mordike, B. L., & Ebert, T. 2001. Magnesium: properties applications potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45.
- Morita, S., Ohno, N., Tamai, F., & Kawakami, Y. 2010. Fatigue properties of rolled AZ31B magnesium alloy plate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, s523-s526.
- Prakash, C., Singh, S., & Ramakrishna, S. 2020. Characterization of indigenously coated biodegradable magnesium alloy primed through novel additive manufacturing assisted investment casting. *Materials Letters*, 275, 128-137.
- Radha, R., & Sreekanth, D. 2017. Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications—a review. *Journal of magnesium and alloys*, 5(3), 286-312.
- Rajan, A. V., Sundaram, C. M., & Rajesh, A. V. 2020. Mechanical and morphological investigation of bio-degradable magnesium AZ31 alloy for an orthopedic application. *Materials Today: Proceedings*, 21, 272-277.
- Rodrigues, A., Caetano-Lopes, J., Nery, A., Sousa, E., PoIido-Pereira, J., Vale, M., & Canhão, H. 2009. Evaluation of Bone Mechanical Strenght And Fracture Risk Assessment [Frax] In Patients with Hip Joint Replacement Surgery. *Acta reumatologica portuguesa*, 34(3).
- Yang, S. H. U., Zhang, X. Y., Yu, J. P., Li, T. A. N., Yin, R. S., & Qing, L. I. U. 2018. Tensile behaviors of fatigued AZ31 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(5), 896-901.
- Sezer, N., Evis, Z., Kayhan, S. M., Tahmasebifar, A., & Koç, M. 2018. Review of magnesium-based biomaterials and their applications. *Journal of magnesium and alloys*, 6(1), 23-43.
- Springer, Verlag Berlin Heidelberg. 1998. *Metal Forming Handbook/ Schuler (c)*. Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme. Berlin.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G. 2006. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review. *Biomaterials*, 27(9), 1728-1734.
- Sukmana, Irza. 2017. *Pengembangan biomaterial berbasis paduan magnesium dengan aplikasi sistem pengecoran squeeze casting untuk pembuatan baut tulang (bonescrew)*. Hal. 9-10.

- Witte, F., Hort, N., Vogt, C., Cohen, S., Kainer, K. U., Willumeit, R., & Feyerabend, F. 2008. Degradable biomaterials based on magnesium corrosion. *Current opinion in solid state and materials science*, 12(5-6), 63-72.
- 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.
- Wu, Z., Nassar, S. A., & Yang, X. 2015. Axial fatigue performance of medical screws in synthetic bone. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 17(2), 192-207.
- Zand, M. S., Goldstein, S. A., & Matthews, L. S. 1983. Fatigue failure of cortical bone screws. *Journal of biomechanics*, 16(5), 305-311.
- Zhang, L. C., Xu, M., Hu, Y. D., Gao, F., Gong, T., Liu, T. & Pan, C. J. 2018. Biofunctionalization of biodegradable magnesium alloy to improve the in vitro corrosion resistance and biocompatibility. *Applied Surface Science*, 451, 20-31.
- Zhou, P., Beeh, E., Friedrich, H. E., & Grünheid, T. 2016. Mechanical behavior and microstructural analysis of extruded AZ31B magnesium alloy processed by backward extrusion. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(7), 2866-2877.