

**EFEK PELAPISAN PERMUKAAN TERHADAP PERILAKU
KEGAGALAN MAGNESIUM TEREKSTRUSI (EXTRUDED
Mg) AZ31B UNTUK APLIKASI PELAT TULANG (BONE
PLATE)**

(Tesis)

**RIZAL NUR SAFII
2125021002**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**EFEK PELAPISAN PERMUKAAN TERHADAP PERILAKU
KEGAGALAN MAGNESIUM TEREKSTRUSI (EXTRUDED
Mg) AZ31B UNTUK APLIKASI PELAT TULANG (BONE
PLATE)**

Oleh

RIZAL NUR SAFII

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Tesis

: EFEK PELAPISAN PERMUKAAN TERHADAP
PERILAKU KEGAGALAN MAGNESIUM
TEREKSTRUSI (EXTRUDED Mg) AZ31B UNTUK
APLIKASI PELAT TULANG (BONE PLATE)

Nama Mahasiswa

: Rizal Nur Safii

NPM

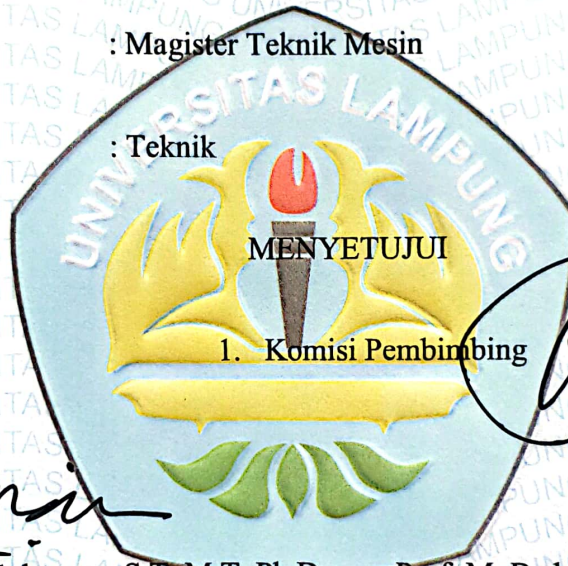
: 2125021002

Jurusan

: Magister Teknik Mesin

Fakultas


: Teknik



1. Komisi Pembimbing


Prof. Ir. 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


Dr. Harmen, S.T.,M.T.

NIP 19690620 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Ir. 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

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

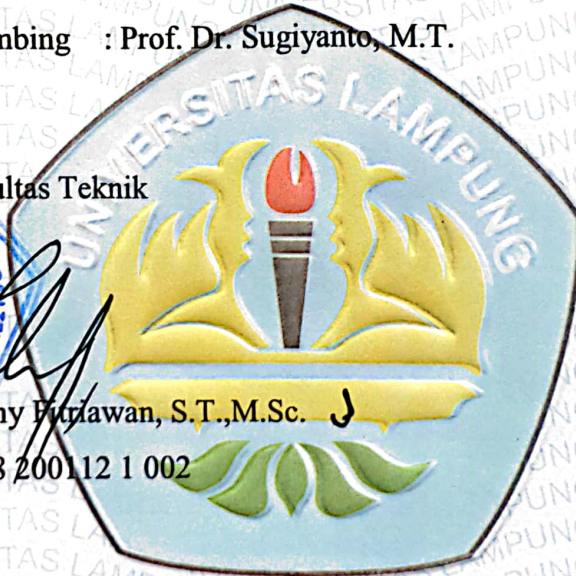
NIP 19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana

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

NIP 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: 15 Januari 2024



PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa sesungguhnya tesis yang saya susun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik pada Program 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 "Efek Pelapisan Permukaan Terhadap Perilaku Kegagalan Magnesium Terekstrusi (Extruded Mg) AZ31B Untuk Aplikasi Pelat Tulang (Bone Plate)" dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu:

1. Prof. Ir. 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 Program 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, Januari 2023



Rizal Nur Safii
2125021002

ABSTRAK

EFEK PELAPISAN PERMUKAAN TERHADAP PERILAKU KEGAGALAN MAGNESIUM TEREKSTRUSI (EXTRUDED Mg) AZ31B UNTUK APLIKASI PELAT TULANG (BONE PLATE)

Oleh

Rizal Nur Safii

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh anodisasi pada perilaku kelelahan paduan magnesium AZ31B. Sampel dianodisasi dalam mode (tegangan 10,20,30 Volt) selama 10 menit pada suhu kamar, dalam elektrolit Natrium Hidroksida (NaOH) 1 M. Uji microvickers dan Tarik Statis dilakukan pada material sebelum dan sesudah anodisasi. Uji kelelahan dilakukan di udara pada suhu kamar dalam mode tegangan-tegangan, pada frekuensi 10 Hz dan rasio tegangan -0,5. Kurva S-N diperoleh untuk sampel raw dan dianodisasi. Morfologi permukaan fraktur diperiksa dengan *scanning electron microscopy* (SEM). Nilai microvickers pada material anodized AZ31 turun rata-rata 4% dari 60,1 HV, pada material anodized AZ31B turun rata-rata 22,1% dari 73,73 HV. Nilai uji tarik pada material anodized AZ31 *ultimate tensile stress* (σ_u) naik rata-rata 1,75% dari 227,465 MPa, *yield stress* (σ_y) naik rata-rata 2,44% dari 86,309 MPa, *young modulus* (E) turun 8,38% dari 35,15 GPa. Material anodized AZ31B *ultimate tensile stress* (σ_u) naik rata-rata 0,55% dari 243,986 MPa, *yield stress* (σ_y) naik rata-rata 0,78% dari 127,735 MPa, *young modulus* (E) turun rata-rata 28,77% dari 35,48 GPa. Hasil menunjukkan bahwa batas kelelahan berkurang sekitar 45,89% pada 27952 siklus untuk spesimen anodized AZ31. Pada spesimen anodized AZ31B batas kelelahan naik dengan rata-rata 1,50% pada 35294 siklus. Material AZ31B cenderung memiliki sifat mekanik yang sensitif terhadap anodizing.

Kata kunci: Mg AZ31B, anodisasi, perlakuan permukaan, fatik, mekanik

SANWACANA

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh, Ba'da Salam, Puji syukur kehadiran ALLAH SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tesis dengan judul, “Efek Pelapisan Permukaan Terhadap Perilaku Kegagalan Magnesium Terekstrusi (Extruded Mg) AZ31B Untuk Aplikasi Pelat Tulang (Bone Plate)” 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. Dr. Harmen S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
2. Prof. Ir. 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.
3. 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.
4. 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.

5. Prof. Dr. Sugiyanto, M.T., selaku penguji yang telah bersedia memberikan arahan, koreksi, saran dan kritik untuk pelaksanaan penelitian dan penyusunan tesis ini.
6. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis.
7. Kepada teman-teman angkatan 2021, terima kasih atas kekeluargaannya yang telah terjalin selama ini, salam SOLIDARITY M FOREVER.
8. 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

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak memiliki kekurangan, baik dari segi penyusunan, bahasan, ataupun penulisannya. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari para pembaca sangat dibutuhkan untuk penyempurnaan tesis ini. Demikian tesis ini dibuat dengan harapan semoga berguna dan bermanfaat, Aamiin.

Nuun Walqolami Wamaayasturun

Wassalammualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, Januari 2023

Penulis



Kizal Nur Safii

2125021002

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	vi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	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 Pemasu Mg AZ31B	11
2.4 <i>Anodizing</i>	14
2.5 Klasifikasi <i>Anodizing</i>	14
2.6 Konsentrasu Elektrolit pada Proses <i>Anodizing</i>	16
2.7 Tujuan <i>Anodizing</i>	17
2.8 Fatik	18
2.9 Fatik Siklus Rendah	20
2.10 Observasi Scanning Electron Microscope (SEM).....	24
2.11 Observasi Struktur Mikro.....	25
2.12 Kekerasan.....	26
2.13 Kekuatan Tarik.....	28
2.14 <i>Strain Hardening</i>	33

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	36
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian yang Digunakan.....	36
3.3 Prosedur <i>Anodizing</i>	43
3.4 Prosedur Pengujian	46
3.5 Variabel Pengujian	51
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	53

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses <i>Anodizing</i>	55
4.2 Hasil Pengujian Kekerasan	57
4.3 Hasil Pengujian Tarik Statis.....	60
4.4 Hasil Pengujian Fatik.....	68
4.5 Observasi Struktur Mikro	74
4.6 Observasi Fraktografi.....	79
4.7 SEM EDS	88

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan	94
5.2 Saran	95

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1 Elektroda pada proses <i>anodic oxidation</i>	15
2 Grafik waktu pencelupan <i>anodizing</i> terhadap berat lapisan oksidasi.....	17
3 Kurva perubahan <i>stress-strain</i> Mg AZ31B Ekstrusi temperatur.....	23
4 Daerah permukaan patahan (<i>fracture</i>) pada sampel uji fatik	25
5 Struktur mikro Mg AZ31B yang diekstrusi.....	26
6 <i>Microvickers</i> Mg AZ31B Ekstrusi	27
7 Skema Uji Tarik.....	29
8 Kurva Tegangan-Regangan Mg AZ31B Ekstrusi	30
9 Kurva Tegangan-Regangan Mg AZ31B Ekstrusi dengan sampel.....	31
10 Mekanisme Proses Ekstrusi	33
11 Struktur mikro Mg AZ31B yang dibentuk dengan proses ekstrusi	34
12 Foto Mg AZ31B (pelat).....	36
13 Mesin MTS <i>Landmark 100 KN</i>	38
14 Mesin CNC Milling BoruiVMC 650.....	39
15 Mikroskop Metalurgi.....	40
16 Mikrometer Digital	40
17 <i>Scanning Electron Microscope</i> Zeiss EVO MA10.....	41
18 <i>Power Supply</i> P-3005D	42
19 Ultrasonic Cleaner	43
20 Tahapan proses <i>anodizing</i>	44
21 Skema Proses Anodisasi	45
22 Bentuk dan ukuran spesimen uji Tarik	46
23 Spesimen Uji Tarik.....	46
24 Bentuk dan ukuran specimen uji fatik	47
25 Spesimen Uji Fatik	47

26	Diagram Alir Penelitian.....	54
27	Proses Anodisasi.....	55
28	Proses Pembentukan Pelapisan.....	56
29	Kurva Uji Kekerasan Microvickers AZ31 dan AZ31B.....	59
30	Kurva tegangan-regangan Magnesium AZ31 dan AZ31B Anodizing ...	60
31	Kurva tegangan-regangan Raw Material AZ31 dan AZ31B.....	62
32	Kurva tegangan-regangan Material AZ31 Anodizing	63
33	Kurva tegangan-regangan Material AZ31B Anodizing	64
34	Bentuk patahan spesimen setelah pengujian tarik AZ31 Anodizing.....	67
35	Bentuk patahan spesimen setelah pengujian tarik AZ31B Anodizing ...	67
36	Bentuk patahan spesimen setelah pengujian tarik Raw Material	68
37	Fatik Stress yang diberikan pada spesimen uji.....	69
38	Kurva hubungan Nf dengan Parameter Anodizing (volt).....	70
39	Kurva SN Spesimen AZ31-AZ31B sebelum dan sesudah anodizing	70
40	Kurva tegangan maksimum terhadap siklus fatik Magnesium AZ31	71
41	Kurva Histerisis tegangan-regangan pada setiap siklus yang berbeda ...	72
42	Kurva Histerisis tegangan-regangan pada setiap siklus yang berbeda ...	73
43	SEM dari lapisan anodized sampel AZ31 10	75
44	SEM dari lapisan anodized sampel AZ31 20	75
45	SEM dari lapisan anodized sampel AZ31 30	76
46	SEM dari lapisan anodized sampel AZ31B 10.....	76
47	SEM dari lapisan anodized sampel AZ31B 20.....	77
48	SEM dari lapisan anodized sampel AZ31B 30.....	77
49	Grafik nilai ketebalan (μm) dengan beda potensial porses anodizing	78
50	Bentuk patahan sampel AZ31 uji fatik	80
51	Bentuk patahan sampel AZ31B uji fatik	80
52	Bentuk patahan sampel Raw uji fatik	81
53	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31 10.....	82
54	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31 20.....	82
55	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31 30.....	83
56	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31B 10.....	83

57	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31B 20	84
58	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31B 30	84
59	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31 Raw	85
60	Mikrograf SEM permukaan patahan fatik AZ31B Raw.....	85
61	SEM EDS AZ31 10	88
62	SEM EDS AZ31 20	89
63	SEM EDS AZ31 30	90
64	SEM EDS AZ31B 10	90
65	SEM EDS AZ31B 20	91
66	SEM EDS AZ31B 30	91
67	SEM EDS AZ31 Raw.....	92
68	SEM EDS AZ31B Raw	92

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1 Magnesium Murni (Mg)	8
2 Komposisi Kimia Mg AZ31B	10
3 Sifat Mekanik Mg AZ31B	10
4 Hasil Komposisi Kimia Magnesium AZ31B.....	37
5 Larutan etsa dan cara penggunaannya untuk material Mg AZ31B	50
6 Variabel Pengujian Tarik	51
7 Variabel Pengujian Fatik	52
8 Variabel Pengujian Kekerasan.....	53
9 Hasil Uji Kekerasan Microvickers Mg AZ31.....	58
10 Hasil Uji Kekerasan Microvickers Mg AZ31B.....	58
11 Hasil uji tarik statis Magnesium AZ31 dan AZ31B.....	61
12 Data hasil pengujian fatik	69
13 Hasil pengujian ketebalan lapisan oksida setelah proses anodizing	78
14 Standar Kelas ketebalan permukaan Magnesium Hasil Anodizing.....	79
15 Rangkuman karakteristik spesimen retak magnesium AZ31 dan	87

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Magnesium dan paduannya memiliki potensi aplikasi yang luas sebagai logam *biodegradable*; karena bobotnya yang ringan dan kepadatannya yang mirip dengan kepadatan tulang manusia, ia memiliki potensi sebagai aplikasi dalam implan tulang (Mousa, H. M., *et al.*, 2015). Tahap arah pengembangan biomaterial dilakukan pada skala laboratorium (*in vitro*), skala hewan (*in vivo*) dan skala manusia (*clinical test*) (Sukmana, Irza., 2017). Salah satunya material Magnesium AZ31B, material ini telah diselidiki laju degradasi oleh Yibin R. *et al.*, (2007) melalui *In Vitro* bahwa paduan AZ31B memiliki laju degradasi yang tepat dan pelepasan hidrogen yang jauh lebih rendah dalam larutan Hank, dengan laju degradasi sekitar 0,3 mm/tahun dan pelepasan hidrogen di bawah 0,15 mL/cm². Uji implantasi hewan (*In Vivo*) menunjukkan bahwa paduan AZ31B dapat terurai secara perlahan di tulang paha kelinci dan membentuk kalsium fosfat di sekitar sampel paduan, dengan rasio Ca/P mendekati tulang alami. Paduan AZ31B dapat terurai secara perlahan di dalam tubuh hewan dan membentuk kalsium fosfat di sekitar implan dengan rasio Ca/P yang mendekati tulang alami. Paduan AZ31B berpotensi untuk digunakan sebagai jenis baru bahan implan yang dapat terdegradasi dalam bedah ortopedi (Yibin, R. *et al.*, 2007). Pemanfaatan untuk implan tulang manusia memiliki 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 dengan kondisi suhu tubuh manusia (Hart, N.H. *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 (Radha, R., and D. Sreekanth, 2017). Umumnya implantasi ataupun komponen magnesium dapat mengalami deformasi plastis yang besar selama dalam kondisi kerja. Kegagalan fatik yang terjadi karena deformasi plastis melalui mekanisme pembebanan siklik dalam kondisi tarik dan tekan, yang biasa dikenal dengan nama kegagalan fatik siklus rendah (*Low Cycle Fatigue/ LCF*). Magnesium paduan AZ31 yang digulung dapat ditingkatkan ketahanan lelah dengan dilakukan pra-kompresi, siklus fatik diselidiki pada amplitudo regangan total 1%, 1 Hz (Hong, SG. *et al.*, 2010). Pada Magnesium paduan AZ31, umur kelelahan dari sampel yang digulung dan dikompresi berkurang dengan meningkatnya amplitudo tegangan. Sampel pra-kompresi menunjukkan umur kelelahan yang jauh lebih lama daripada sampel *as-rolled* pada amplitudo tegangan rendah, terutama ketika amplitudo tegangan mendekati kekuatan luluh tarik sampel *as-rolled* (Huang *et al.*, 2014).

Saat ini, para peneliti juga mengujikan kegagalan fatik pada siklus yang tidak sesuai dengan kondisi tulang manusia dan *strain amplitude* yang diaplikasikan berkisar 0.005, 0.008 dan 0.0125 (Jabbari, A.H. *et al.*, 2020). Magnesium atau

material modifikasi yang diujikan tidak sesuai kondisi tulang tidak akan memenuhi kualifikasi untuk bahan pengganti implan. Tidak hanya beban tekan, kekuatan tarik dari bahan implan harus menyerupai sifat tulang, dalam kondisi elastis maupun plastis serta kekerasan material tidak melebihi hasil yang direkomendasikan (Shu, Y. *et al.*, 2018). Untuk mencapai tujuan tersebut, material kandidat pengganti implan tulang *Degradable* ini perlu dilakukan kajian secara berkelanjutan, salah satunya perlakuan permukaan pada Magnesium AZ31B untuk meningkatkan kekuatan material secara fisik dan mekanik. Perlakuan permukaan paduan magnesium saat ini merupakan metode anti-korosi yang paling efektif dengan menutupi permukaan paduan magnesium dengan lapisan pelindung untuk mengisolasi substrat dari lingkungan eksternal (Gray, J.E. and B. Luan. 2002.). Salah satunya melalui proses *Anodizing*. Lapisan *anodized* dapat secara signifikan mengurangi tingkat degradasi magnesium. Magnesium AZ31 dilakukan pelapisan dengan *Anodizing*, studi tersebut menghasilkan pendekatan yang efektif untuk mengurangi laju degradasi. Magnesium dapat digunakan sebagai bahan implan yang dapat terdegradasi selama degradasinya dikendalikan pada tingkat yang rendah (Wang, Hao and Zhiming Shi, 2011).

Mahruri dkk (2019) melakukan penelitian perlakuan permukaan material Biodegradable Magnesium AZ31 dengan *Anodizing*. *Anodizing* merupakan teknik pelapisan logam dengan cara mengonversi permukaan logam membentuk lapisan oksida secara elektrolisis, yang salah satu tujuannya adalah meningkatkan nilai kekerasan suatu material. Penelitian tersebut dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi larutan elektrolit terhadap kekerasan lapisan hasil

proses *Anodizing*. Dengan variasi tegangan dan waktu dalam konsentrasi larutan yang berbeda maka terjadi perbedaan nilai kekerasan dan nilai ketebalan hasil *coating* material magnesium AZ31 (Wicaksono, M. A., 2018).

Pada proses *Anodizing*, ada beberapa parameter yang berperan penting dalam optimasi hasil perlakuan permukaan material Magnesium AZ31B. Selama proses pembentukan film anodik, kinerja pelapisan paduan magnesium dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti komposisi elektrolit, suhu, sifat paduan dan parameter listrik, dll. Secara khusus, komposisi elektrolit memainkan peran paling penting dalam proses pembentukan film anodik. struktur mikro, morfologi permukaan dan komposisi pelapis dari paduan magnesium (Pan, S. *et al.*, 2022). Selain komposisi elektrolit, kerapatan arus merupakan faktor penting lain yang mempengaruhi sifat lapisan anodik (Shi, Z., *et al.*, 2006).

Maka, tujuan dari penelitian ini mendapatkan data magnesium AZ31B yang direkayasa dengan melakukan perlakuan *Anodizing*. Hal itu untuk mendapatkan data karakteristik fatik, kekerasan, kekuatan tarik yang sesuai dengan kebutuhan implan tulang manusia dan untuk menyempurnakan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sukmana (2017) agar mendapatkan sifat mekanik fatik yang optimum. Magnesium AZ31B yang diekstrusi telah diselidiki sifat kelelahan siklus rendah, kemudian menunjukkan aplikasi potensial AZ31B untuk *bone bolt* dan bahan biomedis lainnya (Sukmana *et al.*, 2022). Karena sangat jarang peneliti yang melakukan pengujian fatik dalam kondisi deformasi plastis pada beban siklik. Material yang dikembangkan akan menjadi bahan dasar baut tulang dengan karakteristik fatik yang diujikan pada *strain amplitude* 0.004 hingga 1.0 dengan

laju regangan konstan dalam temperatur ruang dan akan didapat variabel frekuensi yang berubah – ubah. Kemudian akan diamati perilaku yang terjadi terhadap bahan yang mengalami deformasi plastis pada *strain amplitude* yang ditentukan. Dalam penelitian ini, paduan magnesium AZ31 dan AZ31B sebelum dan sesudah dilakukan perlakuan permukaan (*Anodizing*) akan diselidiki kekuatan mekaniknya melalui sifat fatik.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui beberapa hal sebagai berikut:

1. Mengetahui optimalisasi proses *Anodizing* pada kekuatan tarik dan *microvickers* magnesium AZ31 dan AZ31B
2. Mengkaji optimalisasi proses *Anodizing* terhadap fatik magnesium AZ31 dan AZ31B
3. Menjelaskan karakteristik patahan fatik AZ31 dan AZ31B sebelum dan sesudah dilakukan proses *Anodizing* terhadap deformasi yang terjadi akibat beban siklik.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah di atas, peneliti memberi batasan dalam pembahasan masalah agar terfokus dalam melakukan penelitian, sebagai berikut:

1. Kuat tegangan 10, 20, 30 volt, dengan waktu 10 menit
2. Material yang digunakan Plat AZ31 dan AZ31B
3. Variasi Konsentrasi Larutan Elektrolit 1 M NaOH, 100 rpm magnetic *mixer*
4. Pengujian fatik pada laju regangan konstan temperatur ruang $\sim 25^{\circ}\text{C}$.

5. 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. Bab I Pendahuluan

Bab I berisi latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab II membahas mengenai Magnesium, Magnesium AZ31B, Pengaruh Elemen Padu Mg AZ31B, *Anodizing*, Klasifikasi *Anodizing*, Konsentrasi Elektrolit pada Proses *Anodizing*, Tujuan *Anodizing*, Fatik, Fatik Siklus Rendah, Observasi Scan Electron Microscope (SEM), Observasi Struktur Mikro, Kekerasan, Kekuatan Tarik, Strain Hardening

3. Bab III Metodologi Penelitian

Bab III berisi Waktu dan Tempat Penelitian, Bahan dan Peralatan Penelitian yang Digunakan, Prosedur *Anodizing*, Prosedur Pengujian, Variabel Pengujian, Diagram Alir Penelitian.

4. Bab III Hasil dan Pembahasan

Bab IV berisi Proses *Anodizing*, Hasil Pengujian Kekerasan, Hasil Pengujian Tarik Statis, Hasil Pengujian Fatik, Observasi Struktur Mikro, Observasi Fraktografi, SEM EDS.

5. Bab V Simpulan dan Saran

Bab V berisi Simpulan, Saran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Magnesium

Logam magnesium (Mg) pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey pada tahun 1808. 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, 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 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 1.

Tabel 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 *medical 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 sebagai unsur paduan 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 %,

halini untuk menghindari korosi atau karat berlebih (Witte, *et al.*, 2005).

Tabel 2. Komposisi Kimia Mg AZ31B (Matweb)

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

Sifat mekanik Mg AZ31B terdapat pada tabel 3 dengan *Hardness Brinell* berkisar 49 HB, *Tensile Strength* berkisar antara 200 – 260 MPa, elongasi 15% dengan modulus 15%.

Tabel 3. Sifat Mekanik Mg AZ31B (Matweb)

Sifat Mekanik (<i>Mechanical Properties</i>)	Satuan <i>Metric</i>
Kekerasan (<i>Hardness Brinell</i>)	49
Kekuatan Tarik Maksimum(<i>Ultimate Tensile Strength</i>)	260 MPa
Kekuatan tarik luluh (<i>Tensile Strength, Yield</i>)	<u>200 MPa</u> 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 permesinan dengan tingkat kesulitan sedang.

2. Zinc (Zn)

Unsur paduan 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 Anodizing

Magnesium *anodizing* adalah proses pelapisan secara elektrokimia yang mengkonversi Magnesium menjadi Magnesium Hidroksida (MgOH) pada permukaan material yang akan dilapisi (*Jeff Pernick, International Hardcoat, Inc*). Proses elektrolisis adalah terjadinya reaksi kimia pada arus listrik. Komponen yang terpenting dari proses elektrolisis adalah elektroda dan elektrolit. Pada proses elektrolisis, katoda merupakan kutub negatif (sebagai penghantar benda kerja) dan anoda merupakan kutub positif (benda kerja). Dari definisi tersebut diketahui bahwa prinsip dasar proses *anodizing* adalah elektrolisis seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pada proses *anodizing* komponen yang terpenting dari proses elektrolisis ini adalah elektroda dan elektrolit. Pada proses elektrolisis, katoda merupakan kutub negatif (-) dan anoda merupakan kutub positif (+). Karakteristik dalam lapisan *anodizing* menghasilkan suatu lapisan tipis oksida yang baik terhadap logam dasarnya. Lapisan tersebut memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

1. Keras, mendekati kekerasan *sapphire*.
2. Transparan, dengan beberapa variasi warna.
3. Terintegrasi dengan baik pada logam dasarnya, dan tidak dapat mengelupas.

Sifat-sifat diatas merupakan keunggulan dari lapisan oksida pada proses *anodizing*.

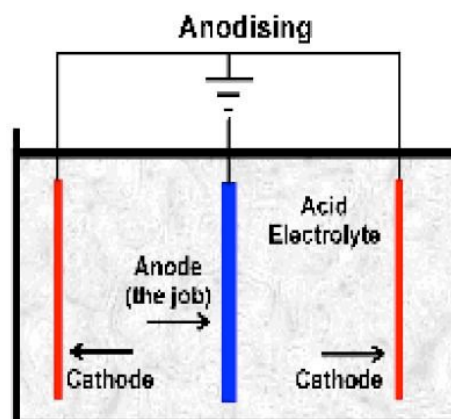
2.5 Klasifikasi *Anodizing*

Adapun klasifikasi yang ada dalam proses *anodizing* adalah sebagai berikut:

1. Elektroda

Elektroda adalah sebuah konduktor yang digunakan untuk bersentuhan dengan bagian non-logam dari sebuah rangkaian listrik, ditemukan oleh Michael

Faraday dari bahasa Yunani elektron. Pada percobaan *anodizing* ini, digunakan elektron magnesium AZ31B sebagai anoda sedangkan katodanya adalah platina. Sebuah elektron dalam sebuah sel elektrolisis ditunjukkan sebagai anoda atau katoda. Anoda ini didefinisikan sebagai elektroda dimana elektron memasuki sel kemudian menimbulkan reduksi. Setiap elektroda dapat menjadi sebuah anoda atau katoda tergantung voltase yang diberikan kedalam sel tersebut. Sebuah elektroda bipolar adalah elektroda yang berfungsi sebagai anoda dari sebuah sel elektrokimia dan katoda, bagi sel elektrokimia lainnya. Proses elektroda pada anodizing dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Elektroda pada proses *anodic oxidation* (Febriyanti, 2011).

2. Elektrolit

Elektrolit adalah senyawa yang dapat menghantarkan arus listrik apabila dilarutkan kedalam larutan pelarut air. Elektrolit diklasifikasikan berdasarkan kandungan ion H^+ . Elektrolit yang dapat menghantarkan arus listrik dengan baik digolongkan kedalam elektrolit kuat, salah satunya adalah asam klorida

(HCL), asam sulfat (H_2SO_4), dan asam nitrat (HNO_3). Selain elektrolit kuat ada pula golongan elektrolit lemah seperti asam cuka encer (CH_3COOH), aluminium hidroksida, kalium karbonat ($CaCO_3$), Natrium Hidroksida ($NaOH$).

3. Power Supply

Power supply berfungsi untuk penghantar arus dan tegangan searah. Arus DC yang dialirkan bisa diukur menggunakan Amperemeter, sedangkan untuk mengukur besarnya tegangan DC digunakan Voltmeter.

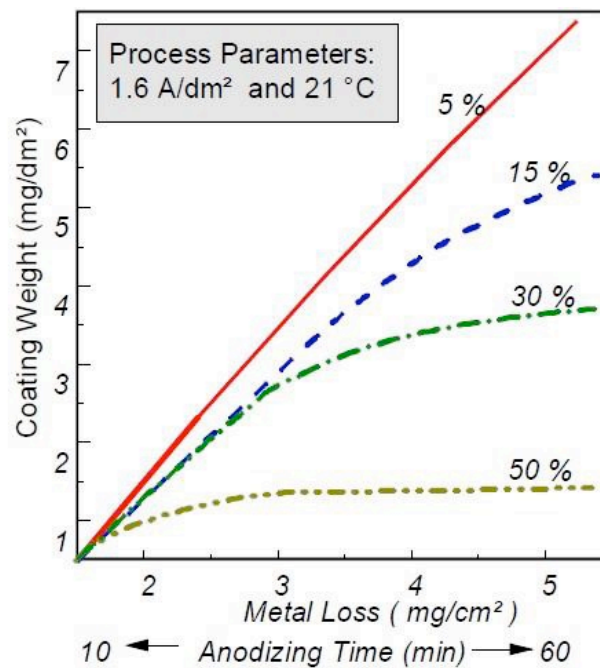
4. Elektrolisis

Elektrolisa benda kerja yang berupa magnesium AZ31B pada proses anodizing berlaku sebagai anoda dan dengan dihubungkan pada kutub platina sebagai katodanya. Logam magnesium AZ31B akan berubah menjadi ion magnesium AZ31B yang larut dalam larutan basa kuat.

2.6 Konsentrasi Elektrolit pada Proses *anodizing*

Umumnya larutan elektrolit yang digunakan dalam proses anodizing adalah asam sulfat dan asam kromat, namun beberapa jenis asam lain seperti asam oksalat, asam phospat, dan *sulphosalicylic acid* juga dapat digunakan untuk proses *anodizing*. Peningkatan konsentrasi dalam hubungannya dengan karakteristik lapisan, mempengaruhi kehilangan logam (*metal loss*) yang terjadi pada proses *anodizing*. Peningkatan konsentrasi yang lebih akan mengakibatkan terjadinya pelarutan lapisan film, untuk itu konsentrasi perlu diatur dengan tepat agar menghasilkan

lapisan film yang optimal. Grafik konsentrasi elektrolit terhadap ketebalan lapisan oksida dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik waktu pencelupan *anodizing* terhadap berat lapisan oksida yang terbentuk dengan variasi konsentrasi elektrolit. (Gazapo & Gea., 2009)

2.7 Tujuan *Anodizing*

Proses *anodizing* memiliki beberapa tujuan, antara lain :

1. Meningkatkan ketahanan korosi.

Dari proses anodisasi, lapisan oksida yang dihasilkan dari anodisasi tahan terhadap karat/korosi dan bisa menahan atmosfer atau air garam. Lapisan oksida melindungi logam yang ada di bawahnya dengan bertindak sebagai penghalang (*barrier*) dari serangan lingkungan yang korosif.

2. Meningkatkan sifat *adhesif*.

Lapisan ini hasil proses anodisasi yang menggunakan asam fosfor dan kromat dapat meningkatkan kekuatan ikatan dan ketangguhan, biasanya digunakan pada industri pesawat terbang.

3. Meningkatkan ketahanan aus (*wear resistanct*).
4. Ketahanan abrasi.

Dimana lapisan hidroksida (MgOH) ini memiliki nilai kekerasan yang cukup Pori dari lapisan anodik oksida mendukung proses *elektroplating*, kebanyakan asam yang digunakan apabila ingin melakukan pelapisan lanjutan adalah asam *phosfor*.

5. Isolator listrik

Lapisan oksida memiliki resistivitas yang tinggi khususnya lapisan oksida yang porinya tertutup.

6. Dapat menempel pada proses plating selanjutnya.

2.8 Fatik

Kelelahan (fatik) 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 (fatik) 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 fatik. 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 fatik 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). Fatik terbagi menjadi dua jenis antara lain.

1. Apabila fatik yang terjadi diantara 0 hingga 10⁴ siklus dengan kondisi plastis pada material, fatik 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 fatik yang terjadi diantara 10⁴ hingga 10⁷ siklus dengan kondisi elastis pada material, fatik jenis ini disebut *high cycle fatigue*.

2.9 Fatik Siklus Rendah

Fatik yang terjadi diantara 0 hingga 10⁴ siklus dengan kondisi plastis pada material, fatik 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 $\Delta\epsilon_p/2$ dan $2N_f$ (Chen, et al., 2018). Pada persamaan 2.1 hubungan siklik regangan dapat dijelaskan dengan persamaan *coffin manson*:

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

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 amplitude 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)

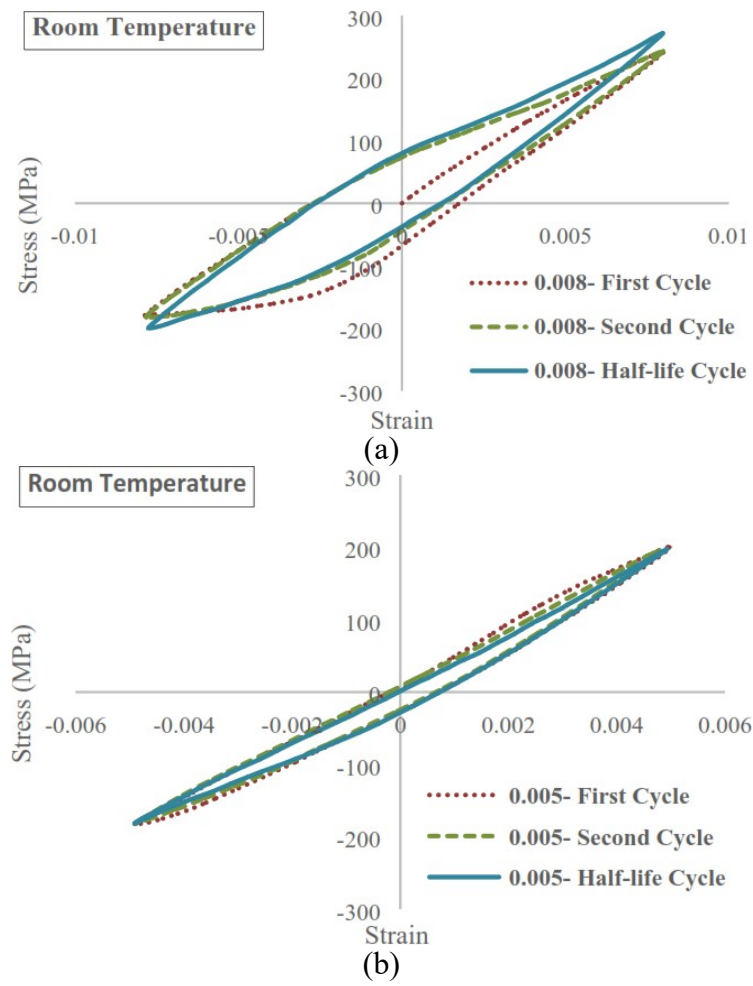
b = kekuatan exponent fatik

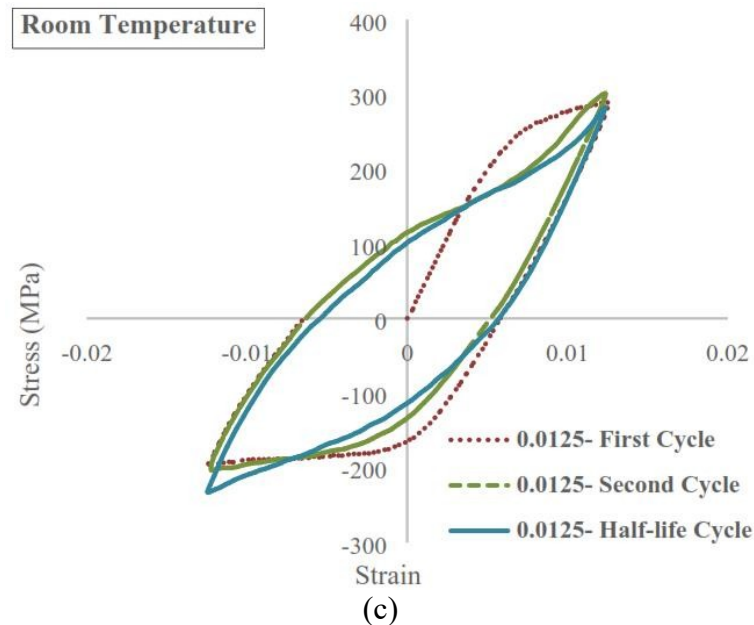
ε'_f = koefisien daktilitas fatik

c = exponent daktilitas fatik

Ada beberapa hal yang mempengaruhi serta dapat merubah kondisi kelelahan (*fatik*) 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).





Gambar 3. Kurva perubahan *stress – strain* Mg AZ31B Ektrusi temperatur ruangan dengan siklus yang berbeda pada kondisi *strain amplitude* (a) 0,005 (b) 0,008 dan(c) 0,0125 (Jabbari, *et al*, 2020).

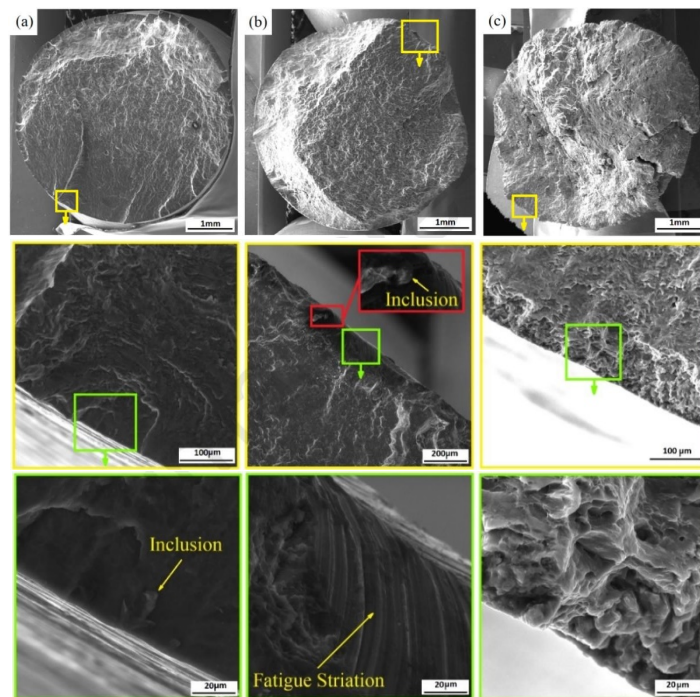
Contoh kurva perubahan *stress – strain* Jabbari (2020) pada gambar 2.1 pada temperatur ruang Mg AZ31B Ektrusi pada kondisi *strain amplitude* (a) 0,005 (b) 0,008 dan (c) 0,0125. Menurut hasil pengujian pada *strain amplitude* 0,005 batas regangan plastis dapat diamati pada semua siklus. Ketika pengaplikasian *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).

2.10 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 4 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

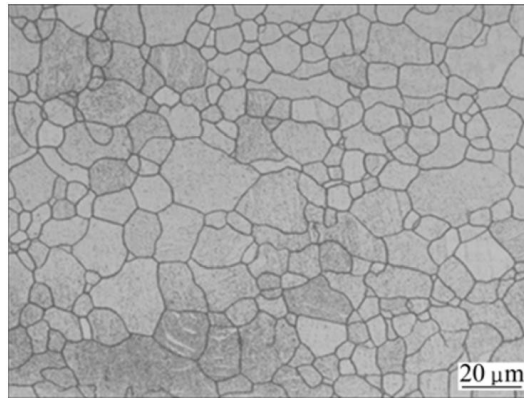
karena ketika proses pembalikan menimbulkan tegangan yang seragam sehingga terlihat seperti goresan.



Gambar 4. Daerah permukaan patah (*fracture*) pada sampel uji fatik: a) temperatur ruang, b) 100 °C, and c) 200 °C (Jabbari, *et al.*, 2020).

2.11 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 miskroskop yang digunakan memiliki pembesaran 1 hingga 100 kali.



Gambar 5. 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 5, 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:

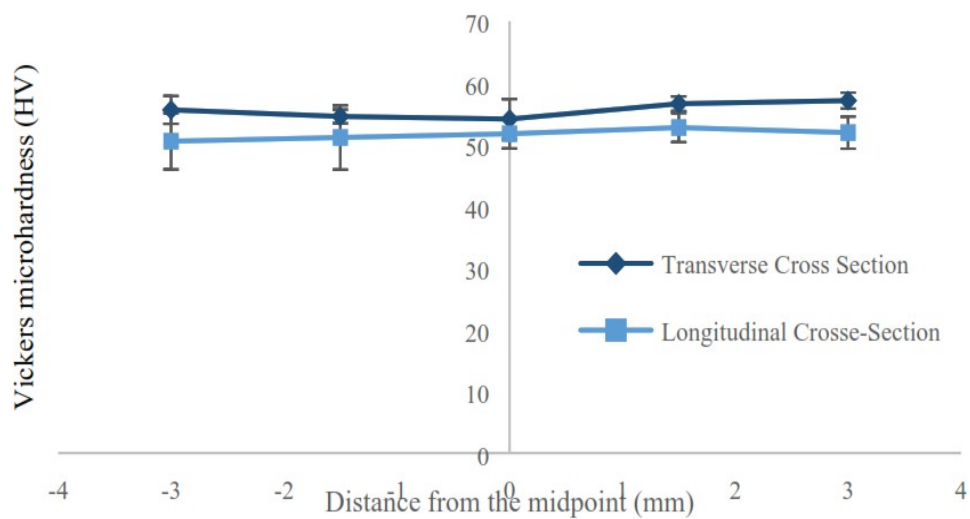
4.2 g picric acid 10 mL acetic acid 10 mL air

70 L ethanol

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

2.12 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 6. *Microvickers* Mg AZ31B Ekstrusi (Jabbari, *et al.*, 2020).

Hasil uji kekerasan yang telah dilakukan Jabbari (2020) pada gambar 6, menunjukkan bahwa proses pembentukan logam mempengaruhi nilai kekerasan. Proses ekstruksi 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 :

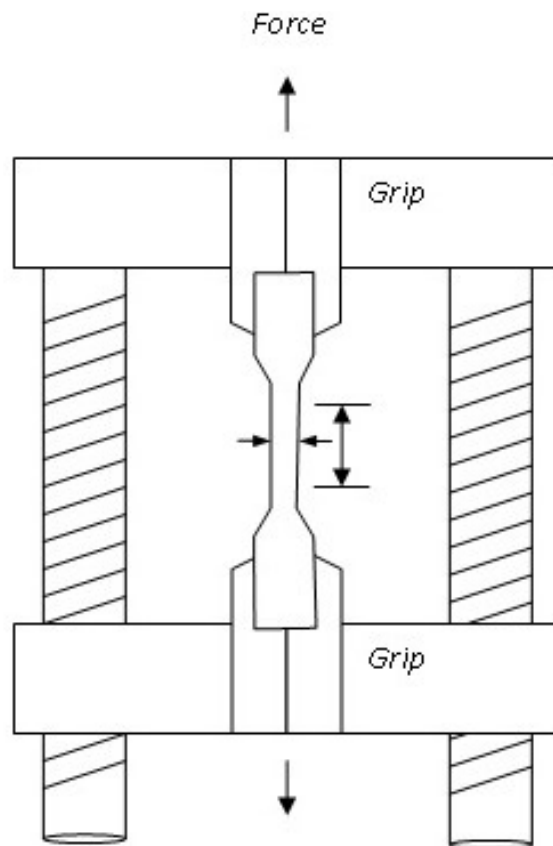
$HV = \text{Hardness Vickers}$

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

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

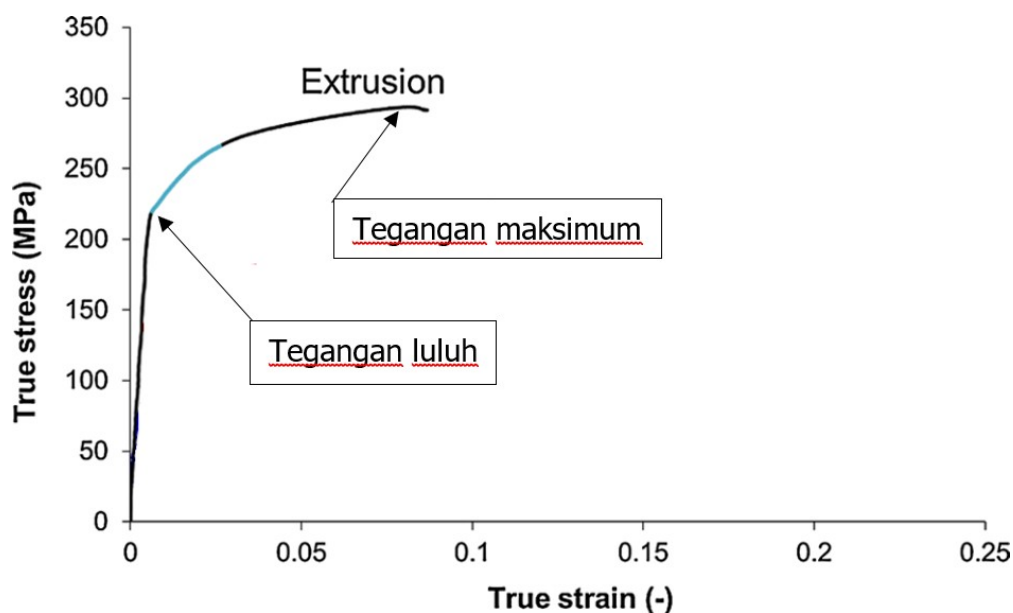
2.13 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik suatu material dapat diketahui dengan melakukan uji tarik statis, seperti pada gambar 7 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.



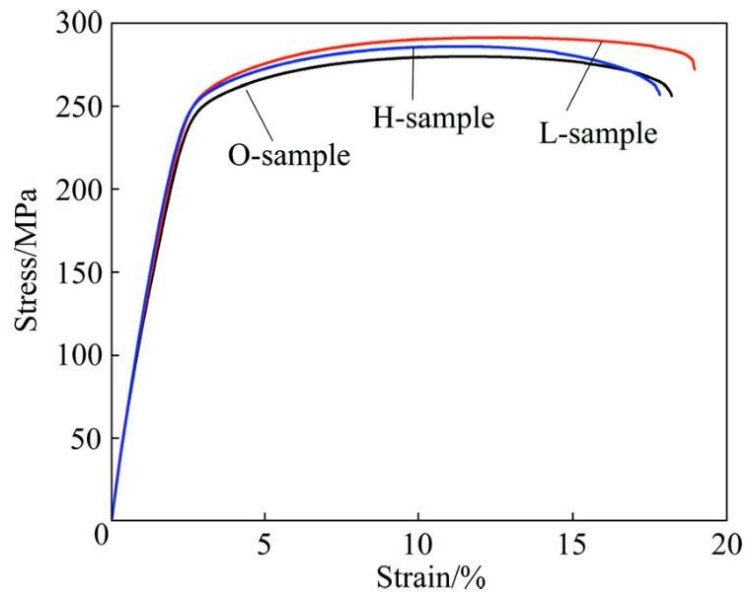
Gambar 7. Skema Uji Tarik (ASM, 2002).

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 8. 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 8. Tegangan luluh ditandai dengan warna biru muda (*cyan*) dengan nilai tegangan 220MPa, dan tegangan luluh merupakan tanda bahwa material tersebut mengalami fasetransisi 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 9. 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 9. 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

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

Dimana:

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

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:

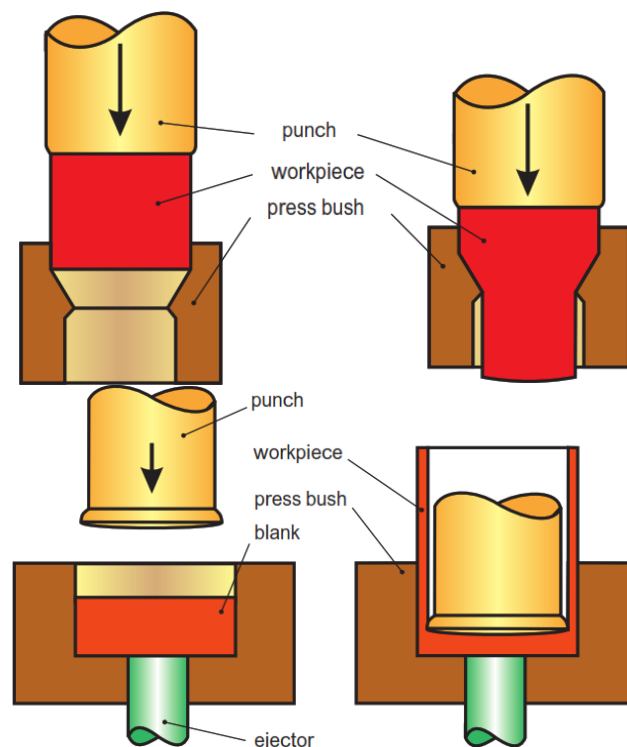
E = Modulus elastis (N/m²)

σ = Tegangan (MPa)

ε = Regangan (mm/mm)

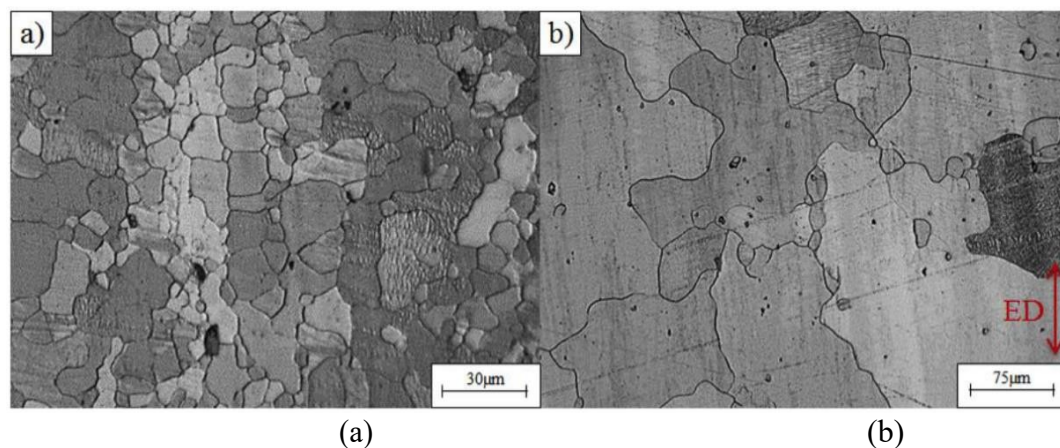
2.14 Strain Hardening

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 10 ekstrusi di sini diartikan pembuatan logam yang ditarik menyesuaikan ukuran yang diharapkan namun penampangnya tetap (Zhou, *et al.*, 2016).



Gambar 10. 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 11. 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 11, 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 logamnya ditarik.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Oktober 2022 sampai dengan Juni 2023. Penelitian ini akan dilakukan di beberapa tempat, yaitu sebagai berikut:

1. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung
2. Pusat Riset Teknologi Pertambangan Lampung, Badan Riset dan Inovasi Nasional
3. Unit Produksi SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo, Lampung Tengah, Lampung

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian yang digunakan

Adapun alat dan bahan penelitian yang dipergunakan adalah:

1. Bahan Penelitian

Magnesium AZ31 dan AZ31B yang dibeli di pasaran dalam bentuk pelat dengan dimensi panjang 100x200x3 mm yang digunakan dalam penelitian, seperti ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Mg AZ31B (pelat)

Berdasarkan gambar 12 bahan yang digunakan dalam penelitian ini magnesium AZ31B berbentuk pelat yang telah diuji komposisi kimia seperti pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Komposisi Kimia Magnesium AZ31B

Unsur	%wt
Aluminum, Al	$\leq 3,93$
Zinc, Zn	$\leq 0,91$
Iron, Fe	$\leq 0,0024$
Silicon, Si	$\leq 0,010$
Magnesium, Mg	94,67 (Balance)
Mangan, Mn	$\leq 0,48$

2. Peralatan Penelitian

a. MTS *Landmark* 100 Kn

Pengujian tarik statis dan fatik menggunakan MTS *landmark*. MTS *landmark* mampu menerima beban hingga 100 kN.



Gambar 13. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

SPEKIFIKASI

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. Mesin CNC Milling Borui VMC 650

Mesin CNC Milling Borui Vertical Machining Center digunakan untuk pembuatan spesimen uji tarik dan fatik. Spindle utama mesin ini terdapat

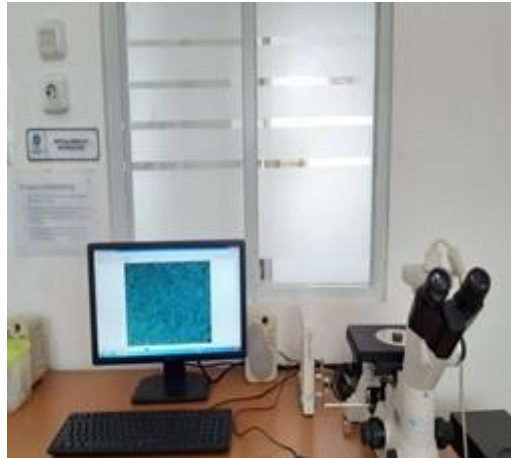
pada posisi vertikal. Proses pemesinan yang mampu dilakukan mesin ini antara lain seperti: frais (milling), kontur permukaan. Pada Mesin ini putaran spindle, gerakan pada 3 Axis (Sumbu X, Sumbu Y, Sumbu Z), dengan bantuan CNC controller maka putaran spindle, gerakan pada masing-masing sumbu dan tool yang tersimpan pada automatic tool changer akan bekerja secara simultan mengikuti program yang sudah dipersiapkan.



Gambar 14. Mesin CNC Milling Borui VMC 650

c. Mikroskop Metalurgi

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



Gambar 15. Mikroskop Metalurgi

d. Micrometer Digital



Gambar 16. 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

e. *Scanning Electron Microscope*



Gambar 17. *Scanning Electron Microscope* Zeiss EVO MA10

SPEKIFIKASI

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

f. *Power Supply*

Power Supply berfungsi untuk mensuplai listrik pada proses anodizing.

Cara kerja Power Supply mengubah tegangan AC menjadi daya DC.



Gambar 18. *Power Supply P-3005D*

SPESIFIKASI

Model Sunshine Type P-3005D

Output Voltage DC 0-30 Volt

Output Current 0-5 Amper

Input Voltage AC 220 Volt

Automatic Control ON/OFF

g. **Ultrasonic Cleaner**

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



Gambar 19. Ultrasonic Cleaner

SPESIFIKASI

Model MH-020S

Power Supply AC 200-240 Volt, 50 Hz

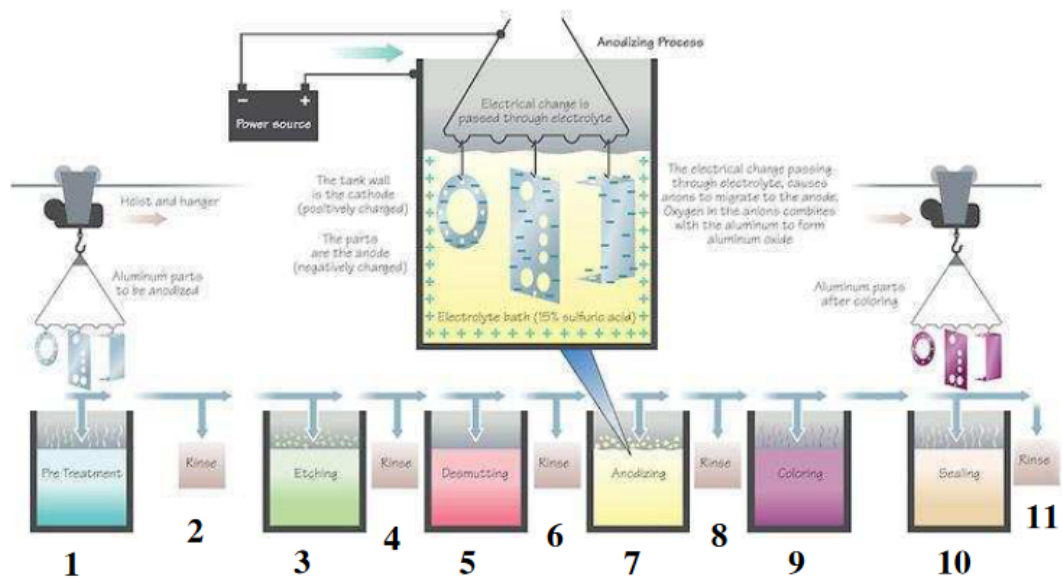
Ultrasonic Frekuensi 40 KHz

Ultrasonic Power 120 W

Heating Power 100 W

3.3 Prosedur *Anodizing*

Langkah-langkah proses *anodizing* pada magnesium dapat ditunjukkan Gambar 20.



Gambar 20. Tahapan proses anodizing (Arifin, 2016)

1. Cleaning

Proses *cleaning* adalah langkah untuk membersihkan magnesium AZ31B dengan menggunakan larutan etanol dan aseton 100 ml kemudian di ultrasonic cleaner untuk menghilangkan kotoran-kotoran yang menempel pada magnesium AZ31B sebelum dilakukan proses *etching* (De Oliveira et. al., 2020)

2. Rinsing cleaning

Proses *rinsing cleaning* adalah proses pembersihan aluminium yang baru saja di cleaning prosesnya magnesium AZ31B di semprotkan dengan air RO agar larutan yang ada di cleaning luntur.

3. Etching

Etching (etsa) adalah proses untuk menghilangkan lapisan oksida di aluminium yang susah di hilangkan. Selain itu, proses ini untuk memperoleh permukaan benda kerja yang lebih rata dan halus dengan menggunakan bahan asam nitrat (HNO_3) konsentrasi 1,2 ml/100 ml.

4. Rinsing Etching

Proses *rinsing Etching* adalah proses pembersihan alumunium yang baru saja *di etching*, prosesnya alumunium di semprotkan dengan air RO agar larutan yang ada di etching.

5. Desmut

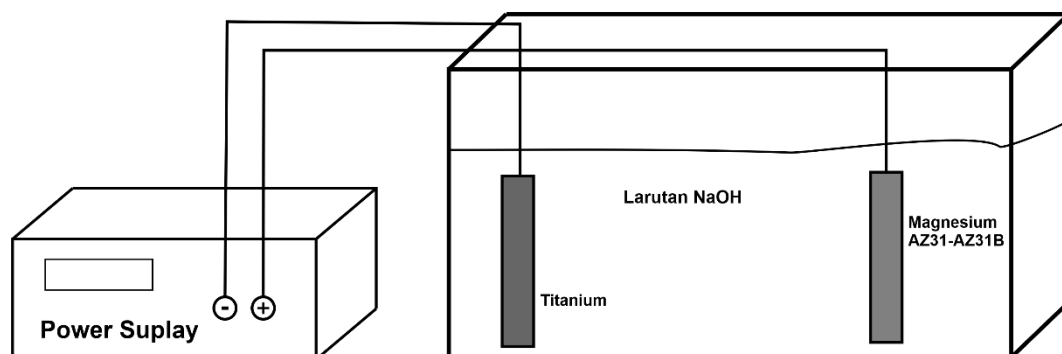
Proses *desmut* adalah proses untuk membesihkan bercak-bercak hitam yang di akibatkan dari proses etching. Larutan yang dipakai adalah Campuran dari asam phospat (H_3PO_4) 75% ditambah asam sulfat (H_2SO_4) 15% dan asam nitrat (HNO_3)10%.

6. Rinsing Desmut

Proses *rinsing Desmut* adalah proses pembersihan alumunium yang baru saja *di rinsing desmut*, prosesnya alumunium di semprotkan dengan air RO agar larutan yang ada di desmut luntur.

7. Anodizing

Proses *anodic oxidation* adalah proses pelapisan secara elektrokimia yang merubah alumunium menjadi alumunium oksida dengan proses elektrolisis, larutan yang digunakan natrium hidroksida ($NaOH$) dengan konsentrasi 5 gr/500 ml. Logam atau benda kerja dipasang pada anoda (+) dan sebagai katoda (-) dapat menggunakan lembaran titanium.



Gambar 21. Skema Proses Anodisasi

3.4 Prosedur Pengujian

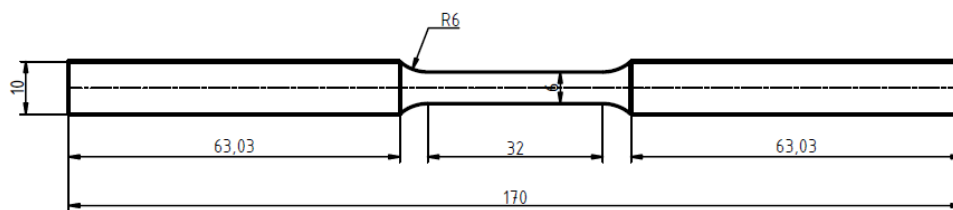
Adapun prosedur penelitian tesis ini dibagi menjadi beberapa tahapan proses, yaitu:

1. Persiapan Spesimen

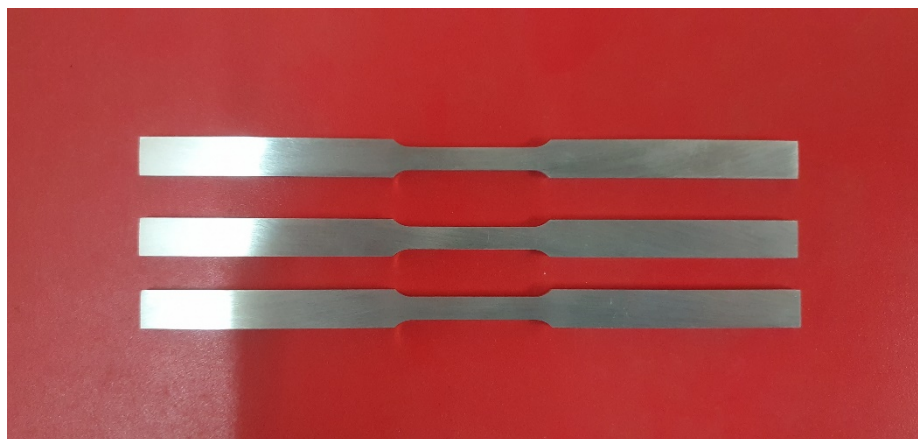
Material yang digunakan dalam penelitian tesis ini yaitu Magnesium AZ31 dan AZ31B dalam bentuk pelat.

2. Pembuatan Spesimen

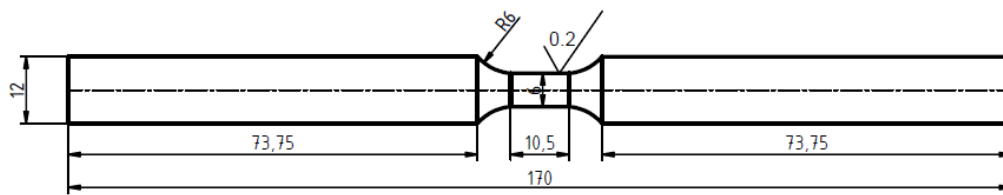
Magnesium AZ31 dan AZ31B berbentuk pelat 200x100x3 mm. Spesimen uji tarik dibentuk sesuai standar ASTM B557-02a (Gambar 22). Dimensi dan ukuran spesimen uji fatik dibuat sesuai standar ASTM E606-92 (Gambar 24).



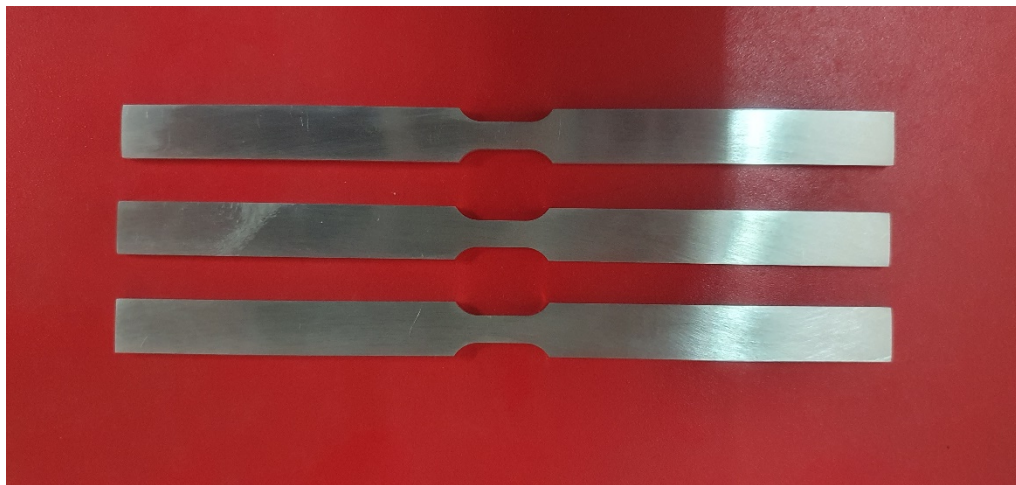
Gambar 22. Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik (ASTM B557-02a)



Gambar 23. Sepesimen Uji Tarik



Gambar 24. Bentuk dan ukuran spesimen uji fatikASTM E606-92)



Gambar 25. Spesimen Uji Fatik

3. Uji Tarik Statis

Data nilai *yield stress* (σ_y) dan *young's modulus* (E) harus diketahui terlebih dahulu sebelum uji fatik . 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. Memasukkan data spesimen.
- j. Memasukan initial speed dan secondary speed (mm/s).
- k. Setelah menginput semua data lalu klik RUN

4. Uji Fatik

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. 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 amplas karbon. Pengamplasanurut berdasarkan urutan dari amplas kasar hingga halus (500, 800, 1000, 2000). Arah pengamplasan adalah tegak lurus terhadap amplas 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 5. Lama pencelupan disesuaikan berdasarkan Tabel 5.
- 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 5. 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	Pencelupan beberapa detik saja	Magnesium Alloys (AZ31B)

3.5 Variabel Pengujian

Matriks variabel pengujian sebagai berikut:

Tabel 6. Variabel Pengujian Tarik

NO	Material	Anodizing	Waktu 10 Menit	Pengujian Tarik	Rata- Rata
		t1=10 Volt, t2=20 Volt, t3=30 Volt			
1	AZ31	t1	10	T1	
2	AZ31	t1	10	T2	
3	AZ31	t1	10	T3	
4	AZ31	t2	10	T1	
5	AZ31	t2	10	T2	
6	AZ31	t2	10	T3	
7	AZ31	t3	10	T1	
8	AZ31	t3	10	T2	
9	AZ31	t3	10	T3	
10	AZ31B	t1	10	T1	
11	AZ31B	t1	10	T2	
12	AZ31B	t1	10	T3	
13	AZ31B	t2	10	T1	
14	AZ31B	t2	10	T2	
15	AZ31B	t2	10	T3	
16	AZ31B	t3	10	T1	
17	AZ31B	t3	10	T2	
18	AZ31B	t3	10	T3	
19	AZ31	t0	0	T1	
20	AZ31	t0	0	T2	
21	AZ31	t0	0	T3	
22	AZ31B	t0	0	T1	
23	AZ31B	t0	0	T2	
24	AZ31B	t0	0	T3	

Tabel 7. Variabel Pengujian Fatik

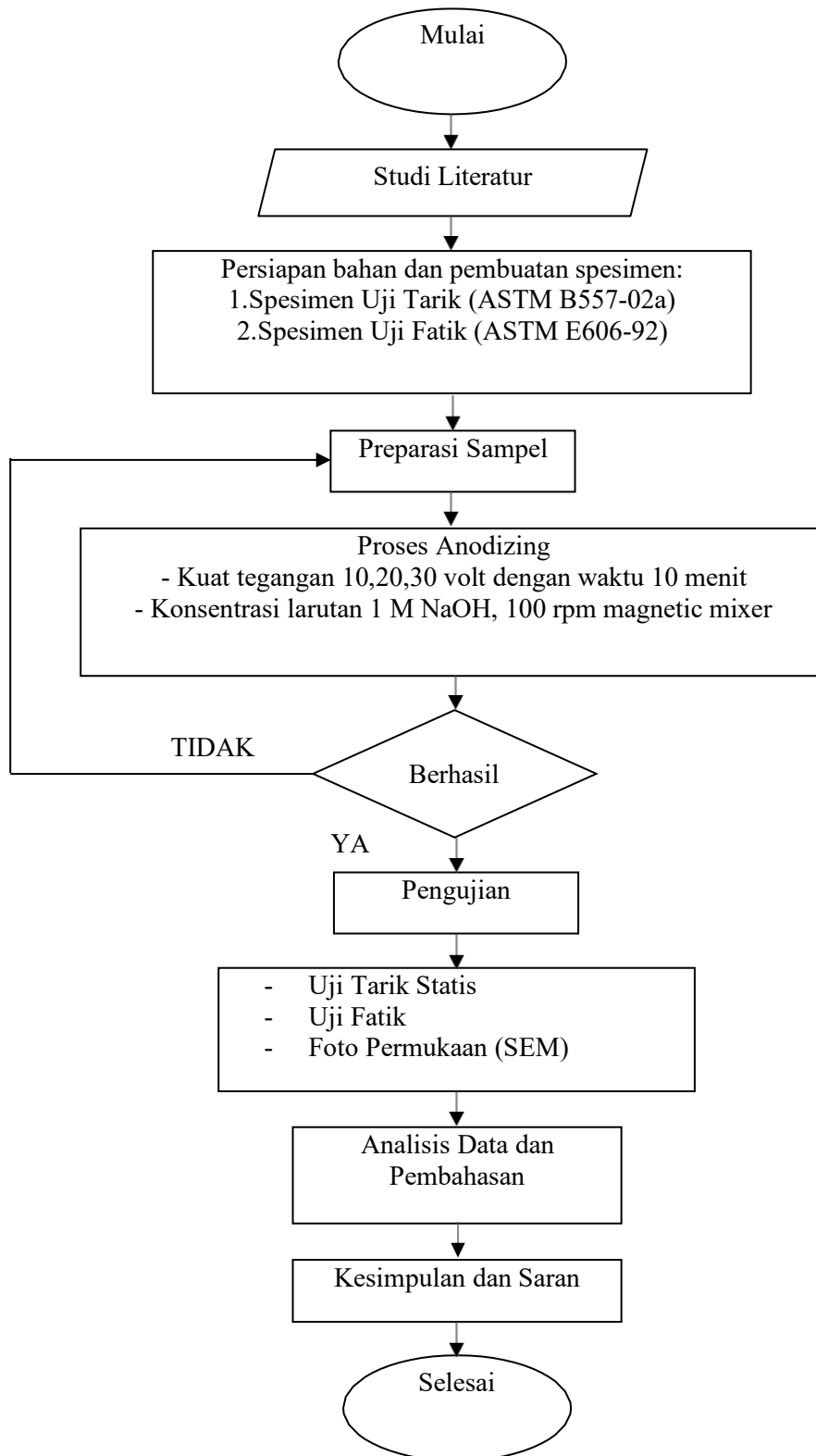
NO	Material	Anodizing		Waktu 10 Menit	Pengujian Fatik	Rata- Rata
		t1=10 Volt, t2=20 Volt, t3=30 Volt				
1	AZ31	t1		10	F1	
2	AZ31	t1		10	F2	
3	AZ31	t1		10	F3	
4	AZ31	t2		10	F1	
5	AZ31	t2		10	F2	
6	AZ31	t2		10	F3	
7	AZ31	t3		10	F1	
8	AZ31	t3		10	F2	
9	AZ31	t3		10	F3	
10	AZ31B	t1		10	F1	
11	AZ31B	t1		10	F2	
12	AZ31B	t1		10	F3	
13	AZ31B	t2		10	F1	
14	AZ31B	t2		10	F2	
15	AZ31B	t2		10	F3	
16	AZ31B	t3		10	F1	
17	AZ31B	t3		10	F2	
18	AZ31B	t3		10	F3	
19	AZ31	t0		0	F1	
20	AZ31	t0		0	F2	
21	AZ31	t0		0	F3	
22	AZ31B	t0		0	F1	
23	AZ31B	t0		0	F2	
24	AZ31B	t0		0	F3	

Tabel 8. Variabel Pengujian Kekerasan

NO	Material	Anodizing		Waktu 10 Menit	Pengujian Kekerasan	Rata- Rata
		t1=10 Volt, t2=20 Volt, t3=30 Volt				
1	AZ31	t1		10	H1	
2	AZ31	t1		10	H2	
3	AZ31	t1		10	H3	
4	AZ31	t2		10	H1	
5	AZ31	t2		10	H2	
6	AZ31	t2		10	H3	
7	AZ31	t3		10	H1	
8	AZ31	t3		10	H2	
9	AZ31	t3		10	H3	
10	AZ31B	t1		10	H1	
11	AZ31B	t1		10	H2	
12	AZ31B	t1		10	H3	
13	AZ31B	t2		10	H1	
14	AZ31B	t2		10	H2	
15	AZ31B	t2		10	H3	
16	AZ31B	t3		10	H1	
17	AZ31B	t3		10	H2	
18	AZ31B	t3		10	H3	
19	AZ31	t0		0	H1	
20	AZ31	t0		0	H2	
21	AZ31	t0		0	H3	
22	AZ31B	t0		0	H1	
23	AZ31B	t0		0	H2	
24	AZ31B	t0		0	H3	

3.6 Diagram Alir Penelitian

Demi kelancaran penelitian ini, penyusun telah menentukan tahapan penelitian sebagai berikut :



Gambar 26. Diagram Alir Penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun simpulan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Pengujian kekerasan *microvickers* pada material Magnesium AZ31 mengalami penurunan nilai kekerasan dari sebelum anodizing 60.1 HV, setelah dilakukan anodizing dengan variasi tegangan 10 volt, 20 volt, 30 volt. Nilai kekerasan turun rata-rata 4%. Pada material Magnesium AZ31B sebelum anodizing nilai kekerasan 73.73 HV. Setelah dilakukan proses anodizing dengan variasi tegangan 10 volt, 20 volt, 30 volt nilai kekerasan turun dengan rata-rata 22,1 %.
2. Perilaku anodizing yang optimal pada AZ31 yakni pada tegangan 20 volt, karena material memiliki *yield stress* (σ_y) terbaik dan *ultimate tensile stress* (σ_u) cukup baik. Sedangkan material AZ31B perlakuan anodizing yang optimal adalah tegangan 10 volt, karena material memiliki *yield stress* (σ_y) terbaik dan *ultimate tensile stress* (σ_u) cukup baik.
3. Umur Fatik Magnesium AZ31 sebelum anodizing sebesar 27952 siklus, Setelah dilakukan proses anodizing dengan variasi tegangan 10 volt, 20 volt, 30 volt, umur fatik naik dengan rata-rata 45.89%. Sedang umur Fatik Magnesium AZ31B sebelum anodizing sebesar 35294 siklus, setelah dilakukan proses anodizing dengan variasi tegangan 10 volt, 20 volt, 30 volt, umur fatik turun dengan rata-rata 1.50%. Material AZ31 cenderung lebih baik digunakan sebagai material implan, karena karakteristik AZ31B sifat mekaniknya sensitif terhadap

proses perlakuan anodizing. Efektifitas material AZ31 dan AZ31B untuk proses perlakuan anodizing cenderung lebih baik untuk material AZ31.

4. Hasil pengujian struktur mikro didapatkan lapisan yang terbentuk pada Magnesium AZ31 pada masing-masing variasi proses anodizing, pada 10 volt lapisan layer 5.88 μm kemudian 20 volt dan 30 volt naik bertahap dengan rata-rata 166%. Pada material Magnesium AZ31B pada 10 volt lapisan layer yang terbentuk 5.93 μm kemudian pada 20 volt dan 30 volt naik bertahap dengan rata-rata 164%. Pada proses anodizing lapisan layer yang terbentuk adalah MgO.
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*.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian fatik lebih lanjut dengan kondisi material terkorosi larutan dengan konsentrasi ion yang mendekati plasma darah manusia atau *simulated body fluid* (SBF).

DAFTAR PUSTAKA

- Albinmousa, J. (2020). *Fatigue of Magnesium-Based Materials. Magnesium - The Wonder Element for Engineering/Biomedical Applications*. doi:10.5772/intechopen.85226
- Arifin, Ahmad Zainal. 2016. *Pengaruh Variasi Konsentrasi Larutan Asam Sulfat (H_2SO_4) Pada Proses Anodizing Dengan Bahan Alumunium Seri Ixxx*. Skripsi Jurusan Teknik Mesin UMY: Jogjakarta.
- ASM B557 – 02a. 2002. *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy*. West Conshohocken. ASTM International.
- ASM E606/E606M. 2012. *Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, E606/E606M - 12. American Society for Testing and Materials, 01(Reapproved)*, 16.
- Badaruddin, M., Wardono, H., Wang, C. J., and Rivai, A. K. 2019. *Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment. International Journal of Fatigue*, 125, 406-417.
- Begum, S., Chen, D. L., Xu, S., and Luo, A. A. 2009. *Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy. International Journal of Fatigue*, 31(4), 726-735.
- Chen, G., Gao, J., Cui, Y., Gao, H., Guo, X., and 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., and 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., and Scheu, C. 2017. *Microstructure and properties of engineering materials. Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science: From fundamentals to applications*, 1-20.
- De Oliveira, L.A.; Silva, R.M.P.; Rodas, A.C.D.; Souto, R.M.; Antunes, R.A. Surface chemistry, film morphology, local electrochemical behavior and cytotoxic response of anodized AZ31B magnesium alloy. *J. Mater. Res. Technol.* 2020, 9, 14754–14770
- 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., and 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 and 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., and Francis, W. 2013. *Low cycle fatigue behavior of extruded AZ31B magnesium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(6), 1589-1594.

- Gray, J.E. and B. Luan. 2002. *Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review*. Journal of Alloys and Compounds 336 (2002) 88–113.
- Gzyl, M., Pesci, R., Rosochowski, A., Boczkal, S., and 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., S. Nimphius, T. Rantalainen, A. Ireland, A. Siafarikas, R.U. Newton. 2017. *Mechanical basis of bone strength: influence of bone material, bone structure and muscle action*. Australia. J Musculoskelet Neuronal Interact 17(3). Hal. 114-139/
- Hasegawa, S., Tsuchida, Y., Yano, H., and Matsui, M. 2007. *Evaluation of low cyclefatigue 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., and Kontsos, A. 2015. *Microstructure-sensitive investigation of magnesium alloyfatigue*. International Journal of Plasticity, 68, 55-76.
- Hong, SG., Park, S.H. & Lee, C.S. 2010. *Enhancing the fatigue property of rolled AZ31 magnesium alloy by controlling {10-12} twinning-detwinning characteristics*. Journal of Materials Research 25, 784–792 (2010).
- 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., M. Sedighi, H. Jahed, C. Sommitsch. 2020. *Low cycle fatigue behavior of AZ31B extrusion at elevated temperatures*. International Journal of Fatigue.
- Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Chairman, C. A., and Balasundaram, R. 2020. *Mechanical properties and applications of Magnesium alloy–Review*. Materials Today: Proceedings, 27, 909-913.

- Li, P. X., Zhang, B. P., Chen, J. Y., and 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.
- Lv, F.; Yang, F.; Duan, Q.Q.; Yang, Y.S.; Wu, S.D.; Li, S.X.; Zhang, Z.F. Fatigue properties of rolled magnesium alloy (AZ31) sheet: Influence of specimen orientation. *Int. J. Fatigue* 2011, 33, 672–682. [CrossRef]
- Matweb, Material Property Data. Magnesium AZ31B-F, Extruded Solid Shapes. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=5a005487e02e4e18b894b7867c3772f4&ckck=1>. Diakses pada 5 September 2022.
- Mordike, B. L., and Ebert, T. 2001. *Magnesium: properties applications potential*. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45.
- Morita, S., Ohno, N., Tamai, F., and Kawakami, Y. 2010. *Fatigue properties of rolled AZ31B magnesium alloy plate*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, s523-s526.
- Mousa, H. M., Chan hee Park, & Hem Raj Pant. 2015. *Surface modification of biodegradable AZ31B magnesium alloy using anodization for biomedical application*. Conference: The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications. Jeju ,korea.
- Ochi, Y.; Masaki, K.; Hirasawa, T.; Wu, X.; Matsumura, T.; Takigawa, Y.; Higashi, K. High cycle fatigue property and micro crack propagation behavior in extruded AZ31 magnesium alloys. *Mater. Trans.* 2006, 47, 989–994. [CrossRef]
- Pan, S., Xiaohua Tu, Jianxing Yu, Yang Zhang, Chengping Miao, Yaling Xu, Rui Fu and Jiayou Li. 2022. *Optimization of AZ31B Magnesium Alloy Anodizing Process in NaOH-Na₂SiO₃-Na₂B₄O₇ Environmental-Friendly Electrolyte*. *MDPI Coatings* 2022 12 578.

- Radha, R., end D. Sreekanth. 2017. *Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications*. Journal of Magnesium and Alloys.
- Sezer, N., Evis, Z., Kayhan, S. M., Tahmasebifar, A., and Koç, M. 2018. Review of magnesium-based biomaterials and their applications. *Journal of magnesium and alloys*, 6(1), 23-43.
- Shi, Zhiming, Guangling Song and Andrej Atrens. 2006. *Influence of anodising current on the corrosion resistance of anodised AZ91D magnesium alloy*. Corrosion Science 48 1939–1959.
- Shu, Y., Xi-yan Zhang, Jiang-ping Yu, Li Tan, Rui-Sen Yin, Qing Liu. 2018. *Tensile behaviors of fatigued AZ31 magnesium alloy*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China Vol 28 (5). Pages 896-901.
- SNI 07-0734-1989. 1989. Lapisan anodisasi aluminium ekstrusi untuk arsitektur. Jakarta. Badan Standarisasi Nasional.
- Springer, Verlag Berlin Heidelberg. 1998. *Metal Forming Handbook/ Schuler (c)*. Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme. Berlin.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., and Dias, G. 2006. *Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review*. *Biomaterials*, 27(9), 1728-1734.
- Sukmana, I., Ibrahim, F., Badaruddin, M., & Nur, H. 2022. Low cycle fatigue properties of extruded magnesium AZ31B. *FME Transactions*, 50(3), 422–432.
- Sukmana, Irza. 2017. Ilmu dan Teknologi Biomaterial. Teknosain, Yogyakarta. 139 hlm.
- Sukmana, Irza. 2017. *Pengembangan biomaterial berbasis paduan magnesium dengan aplikasi sistem pengecoran squeeze casting untuk pembuatan baut tulang (bonescrew)*. Hal. 9-10.

- Tokaji, K.; Kamakura, M.; Ishiizumi, Y.; Hasegawa, N. Fatigue behaviour and fracture mechanism of a rolled AZ31 magnesium alloy. *Int. J. Fatigue* 2004, 26, 1217–1224. [CrossRef]
- Wang, Hao and Zhiming Shi. 2011. *In vitro biodegradation behavior of magnesium and magnesium alloy*. Wiley Periodicals, Inc.
- Wicaksono, Mahruri Arif. 2018. *Pengaruh Kosentrasi Larutan Elektrolit Naoh Terhadap Kekerasan Dan Ketebalan Coating Hasil Proses Anodizing Magnesium AZ31 Sebagai Implan Tulang Biodegradable*. Laporan Praktik Kerja Lapangan. PTM – BPPT-Jurusan Teknik Mesin UNILA: Bandar Lampung.
- Witte, F., Hort, N., Vogt, C., Cohen, S., Kainer, K. U., Willumeit, R., and 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., and 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.
- Xu, D.K.; Liu, L.; Xu, Y.B.; Han, E.H. The crack initiation mechanism of the forged Mg-Zn-Y-Zr alloy in the super-long fatigue life regime. *Scr. Mater.* 2007, 56, 1–4. [CrossRef]
- Yang, Y.; Liu, Y.B. High cycle fatigue characterization of two die-cast magnesium alloys. *Mater. Charact.* 2008, 59, 567–570. [CrossRef]
- Yibin, R., Huang Jingjing, Zhang Bingchun, & Yang Ke. 2007. *Preliminary study of biodegradation of AZ31B magnesium alloy*. Higher Education Press and Springer-Verlag. 1(4): 401–404.

Zhang, L. C., Xu, M., Hu, Y. D., Gao, F., Gong, T., Liu, T. and Pan, C. J. 2018. *Biofunctionization 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., and 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.