

**Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*)
Aluminium 6061–T6 Pada Temperatur 100°C, 200°C dan
300°C**

(Skripsi)

Oleh:

FADDEL RAKA PRATAMA



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH (*LOW CYCLE FATIGUE*) Al 6061-T6 PADA TEMPERATUR 100°C, 200°C dan 300°C

Oleh

FADDEL RAKA PRATAMA

ABSTRAK

Paduan aluminium 6061-T6 banyak diaplikasikan pada komponen otomotif dan pesawat terbang, yang umumnya selama bahan diaplikasikan sering mengalami deformasi plastis dan bahan mengalami kegagalan fatik dalam beberapa siklus pembebanan. Pengujian tarik (ASTM E8) fatik siklus rendah (ASTM E606) pada kondisi temperatur ruang dan pada kondisi temperatur 100°C, 200°C dan 300°C dengan amplitudo 0.004mm/mm-0.006mm/mm dan laju regangan konstan 0.005/s dilakukan. Data hasil pengujian tarik dan fatik pada setiap kondisi temperatur berbeda diperoleh dan dibandingkan untuk mengamati respon ketergantungan sifat mekanik dan fatik terhadap temperatur. Data-data hasil pengujian fatik dievaluasi menggunakan pendekatan Coffin-Manson-Basquin, yang dapat digunakan untuk memprediksi umur fatik paduan dalam kondisi pembebanan elastis (metode Basquin) dan plastis (metode Coffin-Manson) dalam kondisi temperatur yang bervariasi. Perilaku pelunakan dan pengerasan regangan yang dialami bahan dipelajari melalui kurva tegangan-jumlah siklus pada amplitudo regangan yang diamati. Pengamatan mikrostruktur melalui mikroskop optik menunjukkan bahwa perilaku paduan dapat dikaitkan dengan penuaan regangan dinamik (*dynamic strain aging/DSA*) yang dipengaruhi langsung oleh amplitudo dan temperatur pengujian.

Kata kunci: Al 6061-T6, fatik siklus rendah, Coffin-Manson-Basquin, pelunakan dan pengerasan, penuaan regangan dinamik

EVALUATION OF LOW CYCLE FATIGUE PROPERTIES Al 6061-T6 OF TEMPERATURE 100°C 200°C DAN 300°C

By
FADDEL RAKA PRATAMA

ABSTRACT

An aluminum 6061-T6 alloy is widely applied for an automotive and aircraft components, where the components of material generally suffers high loading cycles and leads to fatigue failure in few cycles. Tension tests according ASTM E8 were performed under displacement control at speed rate of 0.2 mm/mm and low cycle fatigue tests according to ASTM E606 were performed under strain control with various strain amplitude of 0.004-0.006 mm/mm at a constant strain rate of 0.005/s. Both testing were conditioned in room temperature and various temperature of 100°C, 200°C and 300°C. Data from tensile and fatigue test results at each different temperature are obtained and compared to investigate the alloy's response to the deterioration of mechanical properties and fatigue properties with the temperatures. The fatigue test data were evaluated using the Coffin-Manson-Basquin approach for predicting the fatigue life of alloy under the elastic loading region (Basquin method) and the plastic loading region (Coffin-Manson method) in varying temperatures. Cyclic softening and hardening behavior occurred by the alloy were studied through a stress response with a number of cycles on the strain amplitude observed. Microstructures observation by optical microscope shows that the behavior of alloys can be attributed to dynamic strain aging (DSA) effect, which is directly affected by strain amplitude and testing temperature.

Keywords: Al 6061-T6, *Low cycle fatigue properties*, Coffin-Manson-Basquin, *Strain hardening*, *Dynamic strain aging*.

**EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH (*LOW CYCLE FATIGUE*)
ALUMINIUM 6061-T6 PADA TEMPERATUR 100°C, 200°C DAN 300°C**

Oleh

FADDEL RAKA PRATAMA

Skripsi

**Sebagai satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2019

Judul Skripsi

: **EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH
(LOW CYCLE FATIGUE) ALUMINIUM
6061 - T6 PADA TEMPERATUR 100°C,
200°C DAN 300°C**

Nama Mahasiswa

: **Faddel Raka Pratama**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1415021042

Program Studi

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

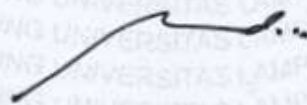


Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.
NIP 19721211 199803 1 002



Zulhanif, S.T., M.T.
NIP 19730402 200003 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin



Ahmad Suudi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.**



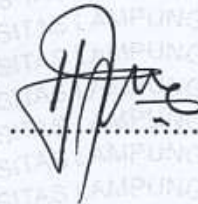
Anggota

: **Zulhanif, S.T., M.T.**



Penguji Utama

: **Harnowo S., S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.

NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **18 Februari 2019**

PERNYATAAN PENULIS

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN
REKTOR No. 3187/H26/DT/2010

YANG MEMBUAT PERNYATAAN




Faddel Raka Pratama
NPM. 1415021042

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 29 Maret 1996, sebagai anak keempat dari pasangan Bapak H. Alimin Syarif .alm dan Ibu Hj. Surtina Silvana. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Kartika II-5 Kecamatan Tanjung Karang Pusat Bandar Lampung pada tahun 2008, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 25 Bandar Lampung pada tahun 2011, pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA YP Unila Bandar Lampung pada Tahun 2014, dan pada tahun 2014 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung.

Selama menjadi mahasiswa teknik mesin, penulis aktif dalam keorganisasian kampus, yaitu sebagai anggota Dinas Dana dan Usaha Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas teknik (BEM-FT) tahun 2015/2016, sebagai Anggota Dinas Kesekretariatan Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM-FT) tahun 2016/2017, Sekertaris Bidang Dana dan Usaha Himpunan Jurusan Teknik Mesin (HIMATEM) tahun 2015/2016, sebagai Kepala Bidang Dana dan Usaha Himpunan Jurusan Teknik Mesin (HIMATEM) tahun 2016/2017. Penulis melaksanakan kerja praktek di PLTU PELABUHAN TARAHAHAN 2 × 8 MW PT. BUKIT ASAM (Persero) Tbk. BANDAR LAMPUNG pada tahun 2017. Melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Tematik di desa Merbau Kecamatan

Kelumbayan Barat Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung selama empat puluh hari pada tahun 2018. Kemudian pada tahun 2018 penulis melakukan penelitian tugas akhir yang dilakukan pada bidang material teknik dengan judul **“EVALUASI SIFAT FATIK SIKLUS RENDAH (*LOW CYCLE FATIGUE*) ALUMINIUM 6061-T6 PADA TEMPERATUR 100°C, 200°C DAN 300°C”** dibawah bimbingan langsung dari Bapak Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T. dan Bapak Zulhanif,S.T.,M.T.

MOTTO

“Dimana bumi dipijak, disitu langit dijunjung “
(urang minang)

“if you have started then you have to finish it ”
(Penulis)

“Be Yourself ”
(Penulis)

PERSEMBAHAN

Dengan Kerendahan Hati meraih Ridho Illahi Robbi Kupersembahkan karya

Kecilku ini untuk orang-orang yang aku sayangi

Ibu dan Bapak

Kedua orang tua, Bapak H. Alimin Syarif .Alm dan Ibu Hj Surtina Silvana atas segala pengorbanan yang tak terbalaskan, doa, kesabaran, keikhlasan, cinta dan kasih sayangnya yang tidak ada putusnya.

Kakakku

Kepada Kedua Kakakku Febriya Sukmasari, Feriya Yohade dan Feriya Yolanda. sebagai sumber inspirasi, semangat, keceriaan dan kebanggaan dalam hidupku

Dosen Teknik Mesin

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran serta pengalaman baik secara akademis maupun non akademis

Keponakan-Keponakanku

Kepada ketujuh Keponakanku R. Adhityo W., Dimas W., Najwa R. Muti, Naufal Rafli W., Aqsho Dafara I., Fathira dan Rayyania Dzikri Imami

Tim Lab. Material Teknik

*Yang selalu membantu, memberikan semangat, teman belajar menuju
keberhasilan*

Ulfa Hidayah, S.T

*Yang selalu memberikan dukungan semangat tak pernah henti dalam suka dan
duka.*

Sahabat Mesin '14

*Yang selalu memberi semangat dan berdiri tegap disampingku saat suka maupun
duka, berbagi nasihat dan keceriaan*

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbilalamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan mempersembahkan judul *“Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (Low Cycle Fatigue) Al 6061-T6 pada Temperatur 100 °C, 200 °C dan 300 °C”* dengan sebaik-baiknya.

Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan seluruh alam Nabi Muhammad SAW, sahabatnya, serta para pengikutnya yang selalu istiqomah diatas jalan agama islam hingga hari ajal menjemput.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepenuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibuku tercinta Hj. Surtina Silvana dan Bapakku H. Alimin Syarif .alm yang tak pernah henti-hentinya memberikan dukungan moril dan materilnya serta doa dan kasih sayangnya.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3. Bapak Harnowo Supriadi, S.T.,M.T selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Moh. Badaruddin, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing utama tugas akhir ini, yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi bagi penulis.
5. Bapak Zulhanif, S.T.,M.T. selaku pembimbing kedua tugas akhir ini, yang telah banyak memberikan waktu dan pemikiran bagi penulis.
6. Bapak Harnowo Supriyadi, S.T.,M.T. selaku dosen pembahas yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
8. Staf Akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Rekan-rekan Sahabat Danar's Kontrakan, Sri, Yandi, Warih, Irpan, Chandra, Bayu Damar, Ahmad Bos, Akbar, Bilco, Bayu Frans yang telah memberikan dukungan semangat dalam pelaksanaan tugas akhir
10. Rekan-rekan Lab. Material Teknik yang turut membantu dalam pelaksanaan tugas akhir. Cristian, Prahara Asmara, Rio Dicky Kurniawan, Aloji Tarigan, Riyansyah Putra Pratama dan Raden Sadewo, terimakasih atas waktu dan tenaga yang diberikan untuk pelaksanaan tugas akhir.
11. Seluruh rekan-rekan teknik mesin khususnya rekan seperjuangan angkatan 2014, Arisandi, Ahong, Aldino, Akbar, Carlos, Thessa, Ricky, Aga, Dicky, Ocir, Dwi, Bayu, Bilco, Andri, Eko, Defri, Okta, Didi, Bagus, Irfan, Dapok, Hadi, Frengki, Dhafin dll yang tidak dapat saya sebutkan semua, terimakasih

untuk kebersamaan yang telah dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dari angkatan 2014. “Salam Solidarity Forever”.

12. Dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu’alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 11 Februari 2019
Penulis,

Faddel Raka Pratama
NPM. 1415021042

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN PENULIS	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
HALAMAN MOTO	ix
HALAMAN PERSEMBAHAN	x
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan	3
C. Batasan Masalah	3
D. Sistematika Penulisan	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Paduan Aluminium	6
1. Paduan aluminium-tembaga (2xxx)	6
2. Paduan aluminium-mangan (3xxx)	7
3. Paduan aluminium-silikon (4xxx)	7
4. Paduan aluminium-magnesium (5xxx)	7

5. Paduan aluminium-silikon-magnesium (6xxx)	8
B. Paduan Aluminium Al 6061-T6	8
1. Kodefikasi dan Paduan Al 6061	8
2. Kodefikasi Perlakuan Panas Aluminium.....	9
C. Kekuatan Tarik Aluminium 6061-T6	10
1. Tegangan Luluh (Yield Strength)	11
2. Modulus Elastisitas	11
3. Tegangan Maksimal (Ultimate Strength)	11
4. Pengerasan Regangan (Strain Hardening)	11
5. Daerah Plastis	11
6. Daerah Elastis	12
7. Deformasi Plastis	12
D. Diagram fasa Al-Mg.....	14
E. <i>Fatigue</i>	16
1. Fatik Siklus Rendah (<i>Low Cycle Fatigue</i>)	17
2. Fatik Siklus Tinggi (<i>High Cycle Fatigue</i>)	17
F. Hubungan Siklik Regangan Pada Fatik	17
BAB III. METODE PENELITIAN	20
A. Tempat Penelitian	20
B. Bahan dan Peralatan Penelitian yang Digunakan	20
1. Bahan Penelitian.....	20
2. Peralatan Penelitian.....	20
a. Mesin MTS Landmark 100 kN	21
b. Mikroskop Optik	21
c. Jangka Sorong	21
C. Prosedur Pengujian	22
1. Persiapan Spesimen.....	22
2. Pembuatan Spesimen	22
3. Uji Tarik Statis	23
4. Uji Fatik Siklus Rendah	24
5. Observasi Mikrostruktur	26
D. Variabel Pengujian	26
E. Diagram Alir Penelitian.....	27
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	29
A. Hasil Pengujian Tarik	29
B. Hasil Pengujian Fatik	31
1. Pelunakan dan Pengerasan Regangan	33
2. Pendekatan Kelelahan Siklus Rendah Berbasis Coffin-Manson-Basquin	42
C. Pengamatan Mikrostruktur	46

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN	49
A. Simpulan	49
B. Saran	51

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kurva Tegangan Versus Regangan Aluminium 6061-T6 pada Temperatur 25°C, 100°C, 200°C dan 300°C	10
Gambar 2. Diagram Fasa Al-Mg	16
Gambar 3. Grafik S/N: (a) Siklus Tegangan Sempurna Bolak-Balik, (b) Siklus Tegangan Berulang dengan $\sigma_{maks} = \sigma_{min}$, dan (c) Siklus Tegangan Acak	17
Gambar 4. Hubungan Siklik Regangan	18
Gambar 5. Alumunium 6061-T6 Bentuk <i>Cylinder</i>	20
Gambar 6. Mesin MTS Landmark 100 kN	21
Gambar 7. Jangka Sorong	21
Gambar 8. Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8	22
Gambar 9. Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Fatik Siklus Rendah (ASTM E606)	22
Gambar 10. Diagram alir penelitian	27
Gambar 11. Kurva Tegangan Versus Regangan Al 6061-T6 pada Kondisi Temperatur Berbeda.	29
Gambar 12. Hubungan Tegangan Puncak Terhadap Jumlah Siklus Al 6061-T6 pada Temperatur Ruang Pengujian Fatik Siklus Rendah dengan Variasi Amplitudo Regangan	34
Gambar 13. Hubungan Tegangan Puncak Terhadap Jumlah Siklus Al 6061-T6 pada Temperatur 100°C Pengujian Fatik Siklus Rendah dengan Variasi Amplitudo Regangan	35
Gambar 14. Hubungan Tegangan Puncak Terhadap Jumlah Siklus Al 6061-T6 pada Temperatur 200°C Pengujian Fatik Siklus Rendah dengan Variasi Amplitudo Regangan	36

Gambar 15. Hubungan Tegangan Puncak Terhadap Jumlah Siklus Al 6061-T6 pada Temperatur 300°C Pengujian Fatik Siklus Rendah dengan Variasi Amplitudo Regangan	37
Gambar 16. Evolusi Perubahan Tegangan-Regangan pada Setiap Siklus yang Berbeda dan Kondisi Amplitudo Regangan 0.004 mm/mm.....	39
Gambar 17. Evolusi Perubahan Tegangan-Regangan pada Setiap Siklus yang Berbeda dan Kondisi Amplitudo Regangan 0.005 mm/mm.....	40
Gambar 18. Evolusi Perubahan Tegangan-Regangan pada Setiap Siklus yang Berbeda dan Kondisi Amplitudo Regangan 0.006 mm/mm	41
Gambar 19. Kurva <i>Strain Versus Reversal to Failure</i> pada Temperatur Ruang	43
Gambar 20. Kurva <i>Strain Versus Reversal to Failure</i> pada Temperatur 100°C	43
Gambar 21. Kurva <i>Strain Versus Reversal to Failure</i> pada Temperatur 200°C	44
Gambar 22. Kurva <i>Strain Versus Reversal to Failure</i> pada Temperatur 300°C	44
Gambar 23. Mikrostruktur Uji Tarik Al 6061-T6 Perbesaran 300X. (a). Temperatur Ruang (b). Temperatur 100°C (c). Temperatur 300°C.....	46
Gambar 24. Mikrostruktur LCF Aluminium 6061-T6 pada Temperatur 200°C	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kodefikasi Perlakuan Panas Aluminium.....	9
Tabel 2. Parameter Pengujian Fatik Siklus Rendah	25
Tabel 3. Variabel Pengujian	26
Tabel 4. Hasil Pengujian Tarik Al 6061-T6	31
Tabel 5. Data Hasil Pengujian Fatik Siklus Rendah Al 6061-T6.....	32
Tabel 6. Nilai Parameter Dihitung dengan Model Prediksi Umur Kelelahan Coffin-Mansion-Basquin.	45

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

1. Perhitungan data hasil pengujian *reversal to failure* menggunakan persamaan Coffin-Manson-Basquin pada temperatur 200°C

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Aluminium 6061-T6 (Al 6061) dengan komposisi kimia; 1.49% Mg, 0.626% Si, 0.0796% Cr dan 0.245% Cu (Hariyanto, 2017) yang diproduksi dalam kondisi T6. Kondisi T6 umumnya diberikan pada paduan ini melalui kombinasi; *solution-heat treated* dan penuaan buatan (*artificial aging*), untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan. Oleh karena itu, paduan Al 6061-T6 banyak diaplikasikan pada komponen otomotif dan pesawat terbang. Pada umumnya komponen-komponen tersebut dapat mengalami deformasi plastis yang besar selama dalam kondisi kerja. Kegagalan fatik yang terjadi karena deformasi plastis melalui mekanisme pembebanan siklik dalam kondisi tarik-tekan, yang biasa dikenal dengan nama kegagalan fatik siklus rendah (*low cycle fatigue/LCF*). Fatik siklus rendah pada logam umumnya terjadi dalam beberapa siklus fatik atau kurang dari ~100000 siklus. Sedangkan kegagalan fatik dengan kisaran 10^3 sampai 10^7 siklus dikenal sebagai kegagalan fatik tinggi (*high cycle fatigue/HCF*), dimana bahan mengalami kegagalan fatik dalam kondisi di bawah kekuatan luluh bahan (kondisi regangan elastis lebih dominan).

Beberapa penelitian sebelumnya tentang aluminium seperti yang dilakukan oleh Wang dkk, (2017), paduan Al 6061-T6 diuji fatik siklus rendah dengan kondisi amplitudo regangan dan temperatur berbeda (280°C, 350°C dan 425°C). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa pada amplitudo regangan meningkat maka umur fatik akan semakin menurun. Peningkatan temperatur dan amplitudo menghasilkan pelunakan pada bahan. Kemudian menurut penelitian Dorbane dkk, (2015) paduan Al 6061-T6 diberi pembebanan tarik statis pada temperatur 25°C, 100°C, 200°C dan 300°C dengan laju regangan 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , dan 10^{-1} s^{-1} . Hasil dari penelitian mereka menunjukkan bahwa tegangan luluh (*yield strength*) dan kekuatan tarik menurun seiring meningkatnya laju regangan dan kondisi temperatur pengujian.

Menurut penelitian Unigovski dkk. (2013), aluminium 6061-T6 dilapisi dengan nikel kemudian diuji fatik siklus rendah dengan amplitudo regangan 0.003mm/mm. Dari penelitian mereka menunjukkan bahwa ketebalan lapisan nikel pada regangan plastis maksimum 0.003mm/mm berpengaruh terhadap penurunan umur fatik. Ketebalan lapisan nikel yang dilapisi pada Al 6061-T6 dapat mempengaruhi sifat mekanik dan fatik siklus rendah. Kemudian menurut Siddiqui dkk. (2006), paduan aluminium 6063 yang direndam di dalam air laut selama 2 sampai 30 minggu. Aluminium 6063 dipanaskan pada temperatur 160°C dan 200°C selama 7 jam dan 9 jam. kemudian diuji fatik siklus rendah dalam kondisi regangan plastis maksimum bervariasi dari 0.003mm/mm hingga 0.010mm/mm.. Hasil dari penelitian mereka

menunjukkan bahwa pola fraktur rapuh cenderung terjadi seiring bertambahnya waktu selama pemanasan.

Berdasarkan dari beberapa penelitian sebelumnya, penulis tertarik melakukan penelitian mengenai **“Evaluasi Sifat Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) Al 6061-T6 Pada Temperatur 100°C, 200°C dan 300°C.**

B. Tujuan

Tujuan penelitian dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter sifat fatik siklus rendah paduan Al 6061-T6 pada temperatur 100°C, 200°C dan 300°C.
2. Mempelajari perilaku pelunakan dan pengerasan yang dialami paduan Al 6061-T6 pada temperatur yang berbeda melalui evolusi tegangan dan jumlah siklus dan kurva tegangan-regangan dari hasil pengujian fatik siklus rendah.
3. Mempelajari mekanisme kegagalan fatik siklus rendah terhadap perubahan struktur mikro.

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengujian fatik siklus rendah hanya dilakukan pada amplitudo regangan 0.004-0.006 mm/mm.
2. Temperatur spesimen dikondisikan sekitar 100°C, 200°C dan 300°C secara merata pada daerah *gage length* di dalam ruangan furnace MTS 653 dan dikontrol menggunakan termokopel type K (XCIB-K type),

D. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan tentang spesifikasi paduan aluminium 6061-T6, referensi pengujian fatik siklus rendah yang telah dilakukan, ketertarikan penelitian, tujuan penelitian, batasan masalah penelitian dan sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan tentang paduan aluminium 6061-T6 beserta jenis-jenis dan elemen-elemen pada aluminium 6061-T6, fungsi Al 6061-T6, kegagalan pada aluminium akibat beban dinamik, kemudian aturan kodefikasi pada aluminium dan kodefikasi tentang perlakuan panas yang terdapat pada aluminium. Lalu terdapat teori tentang kekuatan tarik logam dan *fatigue*.

III. METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisikan pembuatan spesimen dan tempat penelitian, bahan dan peralatan penelitian, prosedur serta parameter penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan tentang data hasil penelitian berupa hasil pengujian tarik, hasil pengujian fatik, pelunakan dan pengerasan regangan (*Softening and Strain Hardening*), pendekatan kelelahan siklus rendah berbasis Coffin-Manson-Basquin dan observasi mikrostruktur.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan simpulan dan saran dari pengujian fatik siklus rendah Al 6061-T6 pada kondisi temperatur berbeda dengan variasi amplitudo 0.004mm/mm, 0.005mm/mm dan 0.006mm/mm dan pada laju regangan konstan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Paduan Aluminium

Aluminium 6061 adalah paduan aluminium-magnesium (Mg) yang memiliki *persentase* unsur Mg lebih besar dibandingkan dengan yang unsur lainnya. Paduan aluminium 6061 juga mengandung beberapa unsur lain yaitu silikon (Si), mangan (Mn), nikel (Ni), besi (Fe), Kromium (Cr), tembaga (Cu) dalam *prosentase* kecil .

Sifat mekanik dan kekuatan aluminium dapat ditingkatkan dengan penambahan unsur-unsur tersebut tanpa mengurangi sedikit dari keuletan aluminium tersebut melalui proses T6. Aplikasi paduan aluminium ini banyak digunakan untuk komponen mesin, komponen pesawat terbang seperti sayap dari pesawat terbang. Aluminium paduan dapat dikelompokkan berdasarkan jumlah *prosentase* dari komposisi elemen yang lebih dominan dalam aluminium, yaitu:

1. Paduan aluminium-tembaga (2xxx)

Paduan aluminium-tembaga banyak diaplikasikan untuk komponen-komponen pada temperatur tinggi, misalnya seperti piston, kepala piston atau ruang bakar kendaraan bermotor. Aluminium seri 2xxx ini

mengandung sedikit magnesium, silikon dan besi sesuai dengan kebutuhan dan kegunaan dari aluminium seri ini.

2. Paduan aluminium-mangan (3xxx)

Paduan aluminium-mangan banyak diaplikasikan untuk pipa dan tangki minyak. Aluminium seri ini mengandung Mn sebesar 1.2% yang dibentuk dengan sifat tahan karat dan daya *weld-ability* yang sangat baik. Aluminium jenis ini tidak dapat dikeraskan dengan menggunakan *heat treatment*.

3. Paduan aluminium-silikon (4xxx)

Paduan aluminium jenis ini memiliki kandungan silikon yang cukup tinggi yaitu sebesar 12.5% Si. Keunggulan dari paduan aluminium silikon ini mudah ditempa dan memiliki koefisien muai panas yang sangat rendah. Dengan kemampuan muainya yang sangat baik aluminium jenis ini cukup mudah untuk dibentuk menjadi suatu produk. Aluminium jenis ini banyak digunakan untuk piston yang ditempa.

4. Paduan aluminium-magnesium (5xxx)

Tahan korosi yang cukup baik merupakan sifat dari aluminium seri ini. Contohnya aluminium seri 5052 banyak digunakan untuk tangki bahan bakar pesawat terbang dan ruang bakar dari pesawat agar tidak mudah berkarat. Ada juga contoh aluminium seri 5005 yang banyak digunakan

untuk batang profil ekstrusi dan seri 5050 yang banyak dipakai untuk pipa saluran minyak dan gas pada kendaraan.

5. Paduan aluminium-silikon-magnesium (6xxx)

Magnesium dan silikon memiliki *presentase* terbesar dari campuran aluminium seri (6xxx). Campuran dari kedua ion tadi dapat membentuk senyawa magnesium silikon (Mg_2Si). Campuran kedua jenis material tersebut memberikan kekuatan yang tinggi setelah proses pemanasan (*heat Treatment*). Aluminium magnesium silikon ini memiliki sifat tahan karat yang sangat kuat dibandingkan jenis aluminium yang lain. Banyak digunakan untuk *body* dan sayap pesawat terbang serta komponen lainnya yang membutuhkan tingkat pemanasan yang tinggi dan tahan terhadap korosi.

B. Paduan Aluminium 6061-T6

1. Kodifikasi dan Paduan Al 6061

Menurut asosiasi aluminium disebutkan bahwa aluminium dikelompokkan dalam dua kelompok, yaitu aluminium tempa dan aluminium cor. Dimana aluminium tempa diberikan penandaan dengan empat digit seperti (XXXX) sedangkan aluminium cor diberikan penandaan dengan tiga digit-plus tanda desimal seperti (XXX.X). Aluminium 6061-T6 termasuk kedalam jenis aluminium tempa karena memiliki empat digit dalam penamaannya tanpa desimal. Kodefikasi dari penamaan aluminium 6061-T6, yaitu digit pertama mengindikasikan pada

unsur pemadu utama yaitu magnesium dan silikon. Untuk digit kedua (0) berarti menandakan belum ada modifikasi yang dilakukan pada paduan khusus dengan kata lain paduan dari aluminium 6061 ini masih asli. Kemudian untuk digit ketiga dan keempat (61) mengindikasikan paduan khusus pada paduan dan T6 merupakan *solution heat treated* dan penuaan buatan (Caing, 2009).

2. Kodifikasi Perlakuan Panas Aluminium

Pada paduan aluminium mempunyai proses pemanasan yang berbeda tergantung pengaplikasian dari aluminium itu sendiri. Proses pemanasan yang berbeda-beda tersebut ditampilkan dalam Tabel 1 berikut.

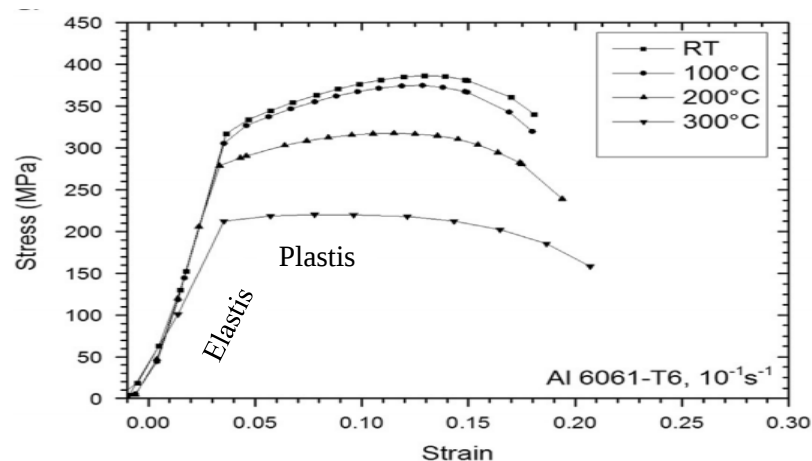
Tabel 1. Kodifikasi Perlakuan Panas Aluminium (Surya, 2008).

Kode	Arti
-T	Diperlakukan Panas
-T2	Anil Total (<i>Full Annealing</i>)
-T3	<i>Solution heat-treated</i> (didinginkan seketika dari temperatur leleh), lalu dilakukan pada pengerjaan dingin, lalu dibiarkan pada temperatur ruang (<i>natural aging</i>)
-T4	<i>solution heat-treated</i> , lalu <i>natural aging</i>
-T5	Didinginkan cepat dari pembentukan temperatur tinggi, kemudian di “ <i>aging/penuaan</i> ” secara buatan
-T6	<i>Solution heat-treated</i> lalu penuaan buatan, <i>artificial aging</i> (diatas suhu ruang)
-T7	<i>Solution heat-treated</i> lalu distabilisasi

-T8	<i>Solution heat-treated</i> , pengerasan pengerjaan, penuaan buatan
-T9	<i>Solution heat-treated</i> , penuaan buatan, pengerasan pengerjaan
-T10	setelah pengerjaan/pembentukan pada suhu tinggi, didinginkan cepat, pengerasan dengan pengerjaan, penuaan buatan

C. Kekuatan Tarik Aluminium 6061-T6

Material atau spesimen ditarik dengan pembebanan pada kedua ujungnya dengan satu arah atau dua arah dimana akan diberikan gaya tarik disebut pengujian kekuatan tarik. Terdapat beberapa tujuan pada pengujian tarik yaitu, untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum dan kekuatan luluh pada suatu material. Hasil dari pengujian tarik adalah kurva tegangan-regangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva Tegangan Versus Regangan Aluminium 6061-T6 pada Temperatur 25°C, 100°C, 200°C dan 300°C (Dorbane,2015).

Berikut merupakan data/nilai yang dapat dihasilkan oleh kurva tegangan-regangan yang ditampilkan oleh Gambar 1:

1. Tegangan luluh (*yield stress*)

Tegangan yang menunjukkan perubahan pada bahan uji dari kondisi elastis menjadi kondisi plastis. Pada titik ini juga menunjukkan suatu material atau bahan uji mulai terdeformasi plastis

2. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas memiliki pengertian singkat yaitu ukuran atau nilai kekakuan dari suatu material. Modulus elastisitas juga merupakan perbandingan antara regangan dan tegangan dalam deformasi yang elastis. Semakin besar nilai modulus elastisitas ini maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi atau semakin kaku.

3. Tegangan maksimal (*ultimate stress*)

Tegangan maksimal atau *ultimate stress* adalah tegangan maksimal yang dapat ditahan suatu bahan uji pada pengujian tarik, sebelum bahan uji tersebut patah.

4. Pengerasan regangan (*strain hardening*)

Pengerasan regangan adalah penguatan logam untuk deformasi plastis.

5. Daerah plastis

Daerah dimana kurva tegangan tidak sebanding lagi sama regangan.

6. Daerah elastis

Daerah dimana perbandingan tegangan dan regangan sama atau sebanding.

7. Deformasi plastis

Perubahan yang tetap apabila beban dihilangkan maka dimensi dan bentuk spesimen tidak dapat kembali ke bentuk semula.

kekuatan tarik maksimum (σ_u) merupakan sifat mekanik pertama yang dapat diketahui berdasarkan kurva pengujian tarik. Untuk menentukan nilai kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) dengan cara beban maksimum dibagi dengan luas penampang awal, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$\sigma_u = \frac{P_{maks}}{A_0} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

σ_u : Kekuatan tarik maksimum (MPa)

P_{maks} : Beban maksimum (kN)

A_0 : Luas penampang awal (mm²)

Kekuatan luluh (*yield strength*) merupakan sifat mekanis yang kedua yang bersimbol (σ_y). Tegangan yang menunjukkan batas elastis dan plastis dari suatu material adalah kekuatan luluh (*yield strength*). Nilai dari kekuatan atau

tegangan luluh (σ_y) didapat dengan cara beban luluh dibagi dengan luas penampang awal, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2 (Dieter, 1992).

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

σ_y : Kekuatan luluh (MPa)

P_y : Beban luluh (kN)

A_0 : Luas penampang awal (mm²)

Nilai regangan dapat ditentukan dari hasil penjumlahan panjang awal dikurang dengan panjang akhir dan dibagi dengan panjang awal. Jadi perubahan suatu perbandingan pada panjang batang $\Delta\ell/\ell_0$ dinamakan regangan seperti yang dituliskan Persamaan 3 (Souisa, 2011).

$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

ε : Regangan atau bilangan murni

ℓ : Panjang batang, (m)

$\Delta\ell$: Panjang semula, (m)

ℓ : Perubahan panjang, (m)

Kurva tegangan-regangan dapat dipergunakan untuk hampir semua bahan. Untuk jarak tertentu dari titik asal, nilai-nilai eksperimental dari tegangan-regangan pada dasarnya terletak pada satu garis lurus. Dalam hal ini berlaku untuk semua bahan yang dikenal sebagai hukum *Hooke*. Yang secara mudah menyatakan bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangan, dimana pada daerah tersebut adalah daerah linear atau *linear zone*. Dimana pada daerah ini, kurva tegangan-regangan mengikuti hukum *Hooke* yang dirumuskan pada Persamaan 4:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- E : Modulus elastis, (GPa)
- σ : tegangan (MPa)
- ε : regangan (mm/mm)

D. Diagram fasa Al-Mg

Sistem paduan biner Al-Mg terdiri dari kelarutan padat yang terbatas satu sama lain. Daerah kelarutan padat yang terbatas pada setiap akhir Al-Mg ditetapkan sebagai alpha, α dan beta, β fase. Mereka disebut terminal solusi padat karena mereka muncul di ujung diagram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Fase alfa adalah larutan padat yang kaya aluminium dan dapat melarutkan maksimum 14,9% berat Mg pada 451°C. Fase beta adalah larutan

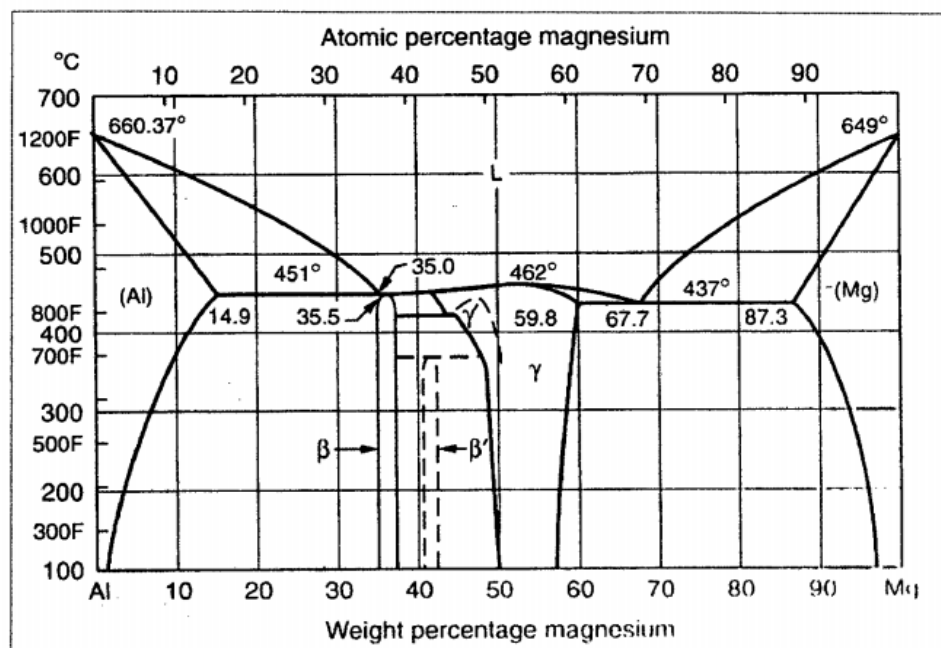
padat kaya magnesium dan dapat melarutkan kelarutan padat maksimum 87.3% berat Al pada 437°C

Ketika temperatur diturunkan di bawah 451°C, kelarutan padatan maksimum dari elemen terlarut menurun sehubungan dengan garis-garis *solvus* diagram fasa Al-Mg. Komposisi eutektik dari komposisi paduan membeku pada temperatur yang lebih rendah yang dikenal sebagai temperatur eutektik. Di sinilah fase cair bisa ada dalam pendinginan lambat. Dengan demikian, dalam sistem Al-Mg komposisi eutektik (67.7% Mg dan 32.3% Al) dan suhu eutektik (437°C) menentukan titik pada diagram fase yang disebut titik eutektik.

Jadi, ketika cairan komposisi eutektik perlahan didinginkan ke suhu eutektik, fase cair tunggal berubah secara bersamaan menjadi dua bentuk padat dan solusi padat. Secara umum, transformasi dikenal sebagai reaksi eutektik seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 5.

Liquid (67.7 % Mg) 437°C cooling-4 α (12.7 % Al) + β (87.3 % Mg)..... (5)

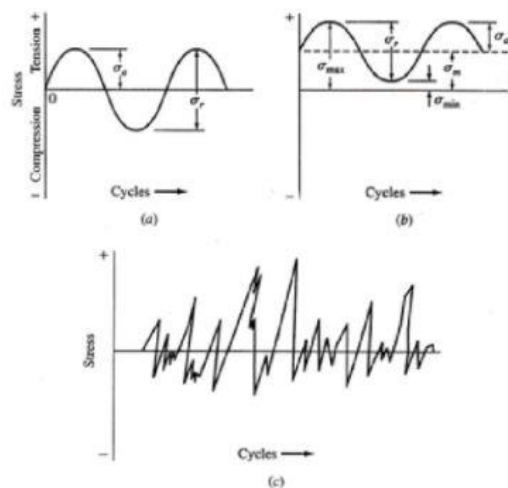
Selama berlangsungnya reaksi eutektik fase cair berada dalam kesetimbangan dengan dua solusi padat α dan β , sehingga dalam keadaan ini tiga fase hidup berdampingan dan berada dalam kesetimbangan. Magnesium dapat larut dengan mudah karena peningkatan suhu daripada elemen paduan lainnya dalam paduan aluminium seri 5xxx.



Gambar 2. Diagram Fasa Al-Mg (diambil dari Octavia, 2007).

E. *Fatigue*

Tegangan dinamis terjadi mulai dari tegangan rata-rata nol dengan amplitudo yang konstan (tetap), tegangan dinamis dimulai diatas garis rata-rata nol dengan amplitudo konstan dan yang ketiga tegangan dinamis yang acak atau random merupakan tiga siklus umum yang dapat menunjukkan suatu siklus tegangan *fatigue*.



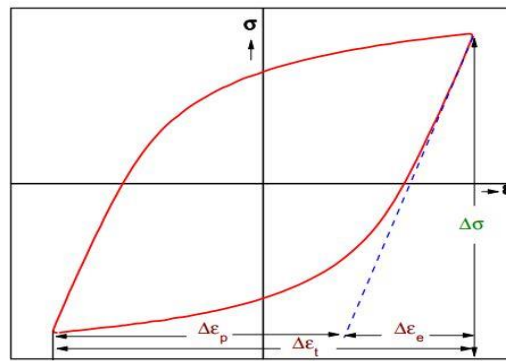
Gambar 3. Grafik S/N: (a) Siklus Tegangan Sempurna Bolak-Balik, (b) Siklus Tegangan Berulang dengan $\sigma_{maks} = \sigma_{min}$, dan (c) Siklus Tegangan Acak (diambil dalam Hadi, 2016).

Terdapat dua jenis siklus fatigue antara lain:

1. **Fatig Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*)** terjadi dengan jumlah siklus dibawah $\leq 10^5 = 100000$ pada kondisi plastis. *Low cycle fatigue* biasanya dirancang dengan mengabaikan keseluruhan efek *fatigue* atau dengan mengurangi level tegangan yang diizinkan.
2. **Fatig Siklus Tinggi (*High Cycle Fatigue*)** terjadi dengan jumlah antara 10^3 sampai 10^7 dan di luar kondisi elastis.

F. Hubungan Siklik Regangan pada Fatik

Untuk mengevaluasi dan melihat karakteristik dari sifat fatik diperlukan hubungan antara $\Delta\epsilon_p/2$ dan $2N_f$ agar dapat meningkatkan kinerja fatik suatu bahan (Sarkar, 2015).



Gambar 4. Hubungan Siklik Regangan (Sarkar, 2015).

dapat dijelaskan dengan Persamaan 6. Coffin-Manson:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (6)$$

Dimana;

ε'_f : koefisien daktilitas fatik

c : eksponen daktilitas fatik

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \dots\dots\dots (7)$$

Gambar 4. Komponen regangan elastis dapat ditentukan dengan pendekatan Persamaan Basquin, Pers. 7.

Amplitudo regangan plastis dan amplitudo regangan elastis jika dijumlahkan maka akan menghasilkan amplitudo regangan total (pendekatan teori Coffin-Manson-Basquin) (Persamaan 8). Berikut merupakan hubungan antara amplitudo regangan total dan jumlah

pembalikan regangan terhadap kegagalan dinyatakan dengan persamaan

8:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

E : modulus Young (GPa) (kondisi siklik)

N_f : jumlah siklus kegagalan (siklus)

$\frac{\Delta \varepsilon_g}{2}$: total amplitudo regangan (mm/mm)

σ'_f : koefisien kekuatan fatik (MPa)

b : kekuatan exponent fatik

ε'_f : koefisien daktilitas fatik

c : exponent daktilitas fatik

Persamaan 8 menunjukkan korelasi data hasil uji fatik siklus rendah terhadap komponen regangan plastis dan elastis yang diambil pada kondisi 0.5 siklus (0.5Nf) untuk menentukan parameter fatik siklus rendah melalui model matematika empirik.

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat Penelitian

Pembuatan spesimen tarik dan fatik siklus rendah dilakukan di Pusat Pendidikan dan Pelatihan Keteknikan (VEDC)-Malang Jawa Timur. Pengujian tarik statis dan fatik siklus rendah dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

B. Bahan dan Peralatan Penelitian yang Digunakan

1. Bahan Penelitian

Paduan Al 6061 yang dibeli dipasaran dalam bentuk silinder dan kondisi T6 digunakan dalam penelitian, seperti ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Aluminium 6061-T6 yang Tersedia di Pasaran

2. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Mesin MTS *landmark* digunakan untuk pengujian tarik statis dan fatik ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

b. Mikroskop Optik

Mikroskop optik digunakan untuk mengamati dan memfoto morfologi bentuk perambatan retak spesimen uji merek Olympus.

c. Jangka sorong

Gambar 7 merupakan jangka sorong merek Mitutoyo dengan ketelitian 0.01mm/mm yang digunakan untuk mengukur diameter material uji tarik dan uji fatik



Gambar 7. Jangka Sorong

C. Prosedur Pengujian

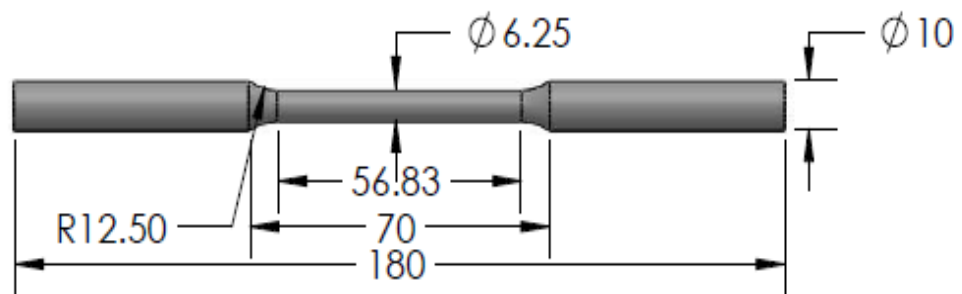
Prosedur penelitian tugas akhir ini dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu:

1. Persiapan Spesimen

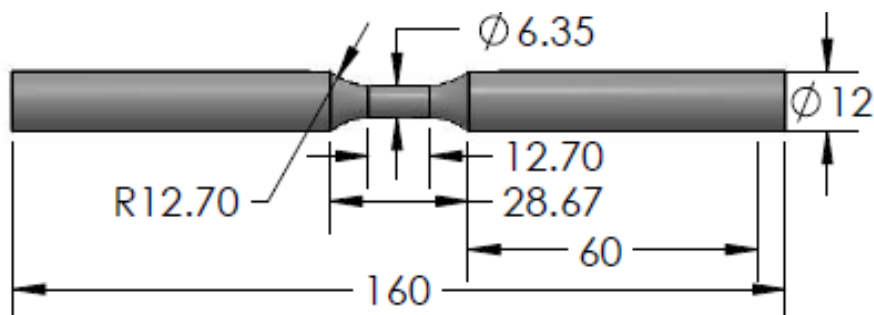
Material yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini yaitu aluminium 6061-T6 dalam bentuk silinder.

2. Pembuatan Spesimen

Paduan aluminium 6061-T6 dengan diameter 20 mm dipotong sepanjang 230 mm untuk dibuat spesimen. Spesimen uji tarik adalah sesuai standar ASTM E8 (Gambar 8). Dimensi dan ukuran spesimen uji fatik siklus rendah dibuat sesuai standar ASTM E606 (Gambar 9)



Gambar. 8. Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8.



Gambar 9. Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Fatik Siklus Rendah (ASTM E606).

3. Uji Tarik Statis

Pengujian tarik statis harus dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan luluh (σ_y) dan modulus elastisitas (E). Prosedur pengujiannya sebagai berikut :

- a) Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E8.
- b) Membuka program *Controller 793B* setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* keposisi nol (*zero*).
- c) Pasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- d) Lalu *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
- e) Klik *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
- f) Mengatur letak *furnace* MTS 653 agar berada diposisi tengah daripada spesimen. Mengatur letak *furnace* MTS 653 hanya untuk pengujian tarik temperatur tinggi.
- g) Kemudian klik *auto offset* untuk *force*. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- h) Pasang *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 fatik siklus rendah dilakukan dengan tahapan berikut:

- a. Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E606
- b. Membuka program *Controller 793B* setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Pasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- d. Lalu *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam *grip* bawah dengan kedalaman 3 cm.
- e. Mengatur letak *furnace* MTS 653 agar berada diposisi tengah dari spesimen. Mengatur letak *furnace* MTS 653 hanya untuk pengujian tarik temperatur tinggi.
- 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. Membuka *Software MTS Test Suite* (MPE), pilih *template* untuk *low cycle fatigue testing*.
- i. *Extensometer model 632.13F-20* dengan *gage length* 10 mm dan mempunyai kemampuan mengontrol regangan $\pm 15\%$ (tarik-tekan) dipasangkan pada daerah *gage length* spesimen (Gambar 9). Pengujian *low cycle fatigue* dilakukan menggunakan MTS *Landmark* 100 kN dengan kondisi rasio regangan $R=-1$, laju regangan 0.005/s dan variasi

amplitudo regangan 0.004–0.006mm/mm. Kurva *hysteresis loops* (σ vs ϵ) dan kurva *Force* vs jumlah siklus secara otomatis direkam selama pengujian menggunakan program *MTS Test suite* sebagai data-data kuantitatif untuk menentukan sifat fatik paduan aluminium 6061-T6. Model matematika akan diformulasikan dengan membandingkan hasil uji fatik siklus rendah pada level regangan amplitudo bervariasi dengan menggunakan pendekatan persamaan *Coffin-Manson* (**Persamaan 1 dan 2**), untuk menentukan kekuatan dan umur LCF bahan secara *empiric* dengan memasukkan variable regangan elastis, regangan plastis terhadap jumlah siklus patah. Plot kurva *hysteresis* σ vs ϵ setiap jumlah siklus tertentu (siklus pertama, $\frac{1}{2}$ jumlah siklus, siklus terakhir) dilakukan untuk mempelajari perilaku LCF. Semua data yang diperoleh dari hasil uji LCF dianalisis menggunakan *software MTS Fatigue Analyzer* dan parameter pengujian fatik siklus rendah pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Pengujian Fatik Siklus Rendah

Nama	Nilai	Satuan
Penentuan siklus stabil	100	Count
Perubahan siklus stabil (beban)	5.00	%
Perubahan beban saat retak inisiasi	10.00	%
Penghentian pengujian	50.000	%
Perubahan level beban puncak	5.00	%
Siklus terakhir	20	Count
Perubahan beban disimpan	1.000	kN
PV Nth siklus penyimpanan	1	Count
Awal siklus	20	Count
Waktu siklus per log <i>decade</i>	10	Count
Deviasi perubahan regangan	0.050	%

5. Observasi Mikrostruktur

Mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro menggunakan *Optical Microscopy* (OM) dan untuk mempelajari perubahan fasa-fasa. Semua data kuantitatif dan kualitatif dari hasil OM, digunakan untuk mempelajari perilaku LCF melalui perubahan mikrostruktur.

D. Variabel Pengujian

Matriks variabel pengujian fatik siklus rendah ditampilkan pada Tabel 3.

Perhitungan frekuensi menggunakan Persamaan 9:

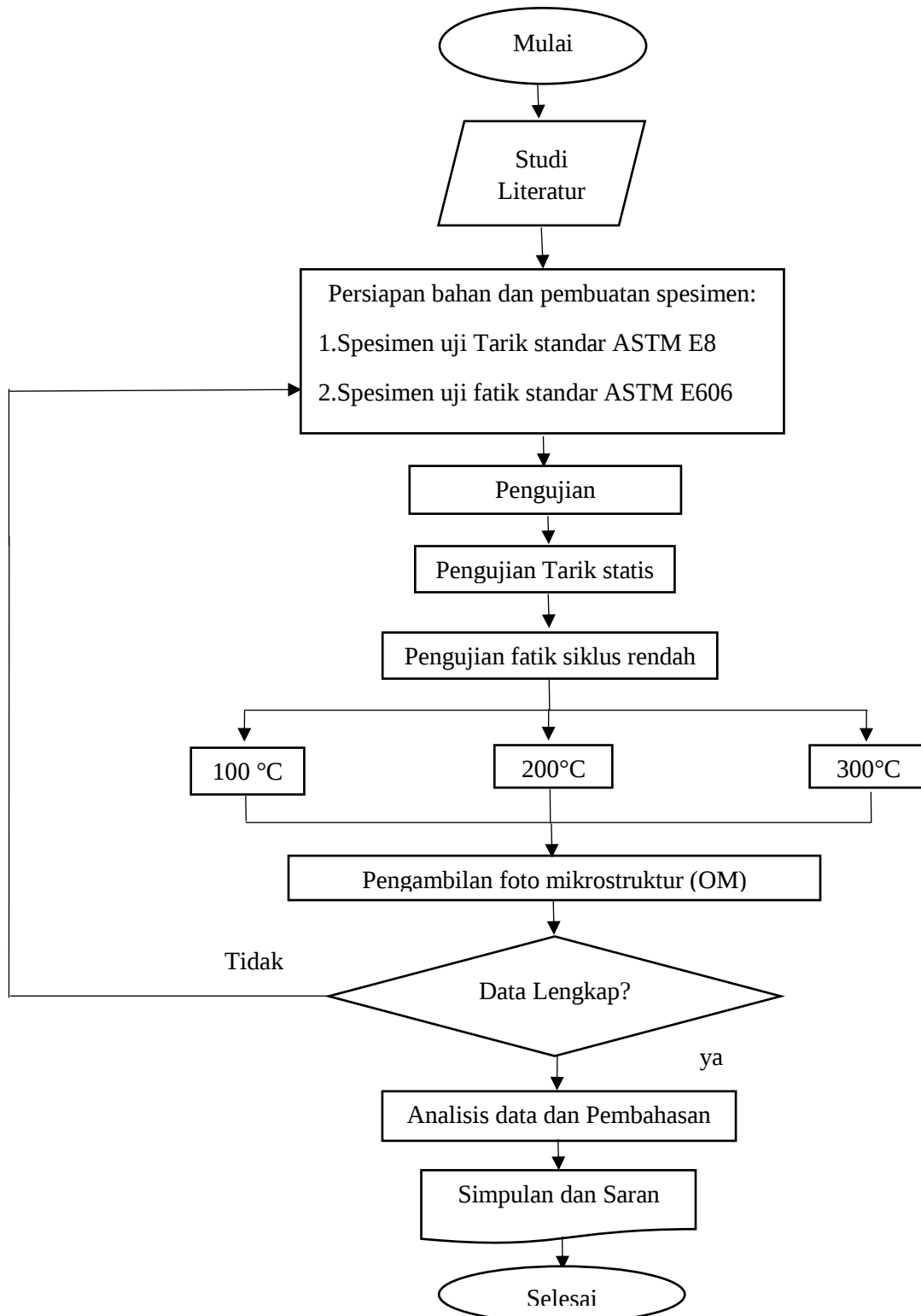
$$f = \frac{\dot{\epsilon}}{4\left(\frac{\Delta\epsilon_{at}}{2}\right)} \dots\dots\dots (9)$$

Tabel 3. Variabel Pengujian

No	Amplitudo total ($\Delta\epsilon_{at}$) (mm/mm)	Laju regangan ($\dot{\epsilon}$) (s^{-1})	Frekuensi, f (Hz)
1	± 0.004		0.5
2	± 0.005	0.005	0.3571
3	± 0.006		0.2777

E. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian pada ini ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. SIMPULAN

Simpulan dari pengujian fatik siklus rendah paduan Al 6061-T6 pada kondisi temperatur berbeda dengan variasi amplitudo 0.004-0.006mm/mm pada laju regangan konstan 0.005/s, adalah

1. Pada temperatur ruang ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) kekuatan luluh dan kekuatan tarik masing-masing adalah sebesar 298.049 MPa dan 320.193 MPa. Pada temperatur 100°C kekuatan luluh dan kekuatan tarik menurun 7.3% dan 4.8%, masing-masing. Pada temperatur 200°C kekuatan luluh dan kekuatan tarik Al 6061-T6 meningkat dibandingkan dengan pada temperatur 100°C , masing-masing sebesar 5.02% dan 1.85%. Kemudian pada temperatur 300°C nilai kekuatan tarik tidak signifikan meningkat namun pada kekuatan luluh mengalami penurunan dibandingkan dengan temperature 200°C sebesar 3.5%. Semakin meningkat temperatur kekuatan mekanik menurun namun deformasi plastis (elongasi) semakin meningkat karena bahan melunak.
2. Persamaan empiris yang diperoleh dapat digunakan untuk memprediksi umur fatik paduan Al 6061-T6 melalui pendekatan persamaan Basquin (kondisi elastis) dan Coffin-Manson (kondisi platis), sebagai berikut:

Temp.	Coffin-Manson	Basquin
RT	$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0.9693(2N_f)^{-1.0591}$	$\sigma_a = 445.47(2N_f)^{-0.0585}$
T 100	$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 9.7139(2N_f)^{-1.2736}$	$\sigma_a = 738.05(2N_f)^{-0.1329}$
T 200	$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0.3679(2N_f)^{-0.8998}$	$\sigma_a = 442.32(2N_f)^{-0.0763}$
T 300	$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 217.49(2N_f)^{-1.7376}$	$\sigma_a = 887.53(2N_f)^{-0.1692}$

3. Pada amplitudo regangan 0.004mm/mm paduan cenderung mengalami pengerasan dan peningkatan amplitudo regangan paduan cenderung menunjukkan perilaku pelunakan.
4. Pada temperatur 300°C paduan mengalami perubahan butir yang memanjang searah beban tarik, yang mungkin disebabkan bahan mengalami *dynamic recovery* dan juga mulai mengalami rekristalisasi butir. Pada temperatur 100°C dan 200°C selama pengujian fatik siklus rendah efek pengersan yang dialami paduan dapat dikaitkan dengan penuaan regangan dinamik (*dynamic strain aging*). Penuaan regangan dinamik pada temperatur pengujian 200°C menyebabkan jumlah siklus lebih tinggi pada rengan amplitudo 0.004 mm/mm.

B. SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat disampaikan adalah:

1. Pada penelitian selanjutnya diharapkan menyertakan pengujian SEM (Scan Electron Microstruktur) pada patahan permukaan sampel uji supaya dapat mengetahui awal retak permulaan dan arah patahan.
2. Perlu dilakukan penelitian sifat fatik siklus rendah pada Al 6061-T6 dengan laju regangan berbeda, amplitudo regangan konstan dan kondisi temperatur tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- A.O. Adesola, A.G. Odeshi, U.D. Lanke. 2013. *The effects of aging treatment and strain rates on damage evolution in AA 6061*. Materials and Design 45, pp 212-221.
- ASTM E8, 2004, Standar Tes Methods for Tension Testing of Metallic Material, West Conshohocken, United States. ASTM E606, *Standard Practice for Strain*.
- Caing. 2009. *Pengaruh Lapisan Titanium Terhadap Aluminium*. Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam Universitas Indonesia, Hal. 11-47.
- Dieter, George E. 1992. *Metalurgi Mekanik, jilid 1, edisi 3*, ahli bahasa oleh Sriati Djafrie, Jakarta: Erlangga.
- Dorbane ,A. 2015. *Observations of the mechanical response and evolution of damage of AA 6061-T6 under different strain rates and temperatures*. Materials science and engineering A 624, pp. 239-249.
- Hadi, Syamsul. 2016. *Teknologi Bahan*. Yogyakarta. Andi.
- Hariyanto. 2017. Studi eksperimental sifat low cycle fatigue paduan alumunium 6061-T6. Hal. 1-11.
- Peter, Octavia. 2007. Characterization of Intermetallic particles in aluminum alloy AA5083 series after recrystallization heat treatment. Faculty of Mechanical Engineering Universiti Malaysia Pahang.

Sarkar, A., Kumawat, B.K., Chakravartty, J.K., 2015. *Low cycle fatigue behavior of a ferritic reactor pressure vessel steel*. Journal of Nuclear Materials 462, pp. 273–279.

Salindeho, 2013. *Pemodelan Pengujian Tarik Untuk Menganalisis Sifat Mekanik Material*. Sulawesi Utara: Jurusan Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi.

Siddiqui, dkk. 2006. *Effect of aging time and aging temperature on fatigue and fracture behavior of 6063 aluminium alloy under seawater influence*. Materials and Design, Vol. 29, pp. 70–79.

Souisa, dan Matheus, 2011. *Analisis Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Bahan dengan Uji Tarik*. Ambon: Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Pattimura.

Surya, Rudy. 2008. *Paduan aluminium*. Material teknik. Hal. 8.1-8.8.

Szusta, J dan A. Seweryn, 2017. *Experimental study of the low-cycle fatigue life under multiaxial loading of aluminum alloy EN AW-2024-T3 at elevated temperatures*. Faculty of Mechanical Engineering, Bialystok University of Technology, Vol 96, pp. 28-42.

Unigovski, B., dkk. 2013. *Low-cycle fatigue of a multi-layered aluminum sheet alloy*. Surface and coatings technology, Vol. 232, pp. 695-702.

Wang, A., dkk. 2017. *Low-cycle fatigue properties and life prediction of Al-Si piston alloy at elevated temperature*. Materials science and engineering A 704, pp. 480-492.