

**STUDI EKSPERIMENTAL SIFAT LOW CYCLE FATIGUE
PADUAN ALUMINIUM 6061-T6**

(TESIS)

Oleh

HARIYANTO



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITSA LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

**STUDI EKSPERIMENTAL SIFAT LOW CYCLE FATIGUE
PADUAN ALUMINIUM 6061-T6**

Oleh

HARIYANTO

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
UNIVERSITSA LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

Abstrak

EXPERIMENTAL STUDY OF LOW CYCLE FATIGUE PROPERTIES ALUMINUM ALLOYS 6061-T6

By

Hariyanto

Aluminum alloy is now widely used as a construction material because it has outstanding properties that allow the Aluminum element has many uses for applications in various fields. It has a silvery-white appearance and high strength properties, low specific gravity, high casting, high wear resistance, low thermal expansion and high corrosion resistance makes Aluminum has wide application in different domains, such as transportation, home decoration and accessories, building and construction Even for the aircraft industry.

Aluminum alloys have replaced the role of cast iron for some of the major components of vehicle engines, such as cylinder heads, engine blocks and other components in the production of cheap cars in Indonesia, resulting in many aluminum alloys manufactured for components such as pistons, wheel wheel wheels, cylinder heads, gearboxes. The main problem that often occurs in the component is cracked over a certain period of time without being able to be identified early on. The purpose of this study was to determine the mechanical properties and properties of LCF Al-Si-Fe-Ti alloys. This study was conducted on three variations of strain rate on varying

strain amplitudes, at room temperature (± 25 ° C). The process of making specimen shapes and dimensions of tensile test specimen size is prepared according to ASTM E8 standard [ASTM E8, 2004] and for LCF test using ASTM E606 standard [ASTM E606, 2004]. Characterization of changes in material structure and the type of fault that occurs is done by testing OM, SEM and EDX.

The results of this study indicate that the highest fatigue life in this test was obtained at a strain rate of 0.005 / s with a stretching intensity of 0.005 mm / mm whereas the lowest fatigue life was at a strain rate of 0.005 mm / mm with strain amplitude, while resistance to aluminum alloy tensile stress Shows the higher the amplitude of the strain the faster the strain hardening occurs.

Keywords: Low Cycle Fatigue, Aluminum, Fatigue Life, cyclic, Strain Rate and Stretch Amplitude.

Abstrak

STUDI EKSPERIMENTAL SIFAT LOW CYCLE FATIGUE PADUAN ALUMINIUM 6061-T6

Oleh

Hariyanto

Paduan aluminium sekarang ini banyak sekali digunakan sebagai bahan konstruksi karena memiliki sifat yang luar biasa yang memungkinkan unsur Aluminium mempunyai banyak kegunaan untuk aplikasi dalam berbagai bidang. Memiliki penampilan berwarna putih keperakan dan sifat kekuatan tinggi, spesifik gravitasi rendah, mampu cor tinggi, ketahanan aus tinggi, termal ekspansi rendah dan ketahanan korosi tinggi membuat Aluminium memiliki aplikasi luas dalam domain yang berbeda, seperti transportasi, dekorasi rumah dan aksesoris, bangunan dan konstruksi bahkan untuk industri pesawat terbang.

Paduan Aluminium telah menggantikan peranan besi cor untuk beberapa komponen utama mesin kendaraan, seperti kepala silinder, blok mesin dan komponen lainnya pada produksi mobil murah di Indonesia, sehingga paduan aluminium banyak diproduksi untuk komponen seperti piston, velg roda kendaraan, kepala silinder, gearbox. Masalah utama yang sering terjadi pada komponen adalah retak selama periode waktu tertentu tanpa dapat diidentifikasi sejak dini. Tujuan penelitian ini adalah menentukan sifat mekanik dan sifat LCF paduan Al- Si- Fe-Ti. Penelitian ini

dilakukan pada tiga variasi laju regangan terhadap amplitudo regangan yang bervariasi, pada temperatur ruang (± 25 °C). Proses pembuatan spesimen bentuk dan dimensi ukuran spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar ASTM E8 [ASTM E8, 2004] dan untuk uji LCF menggunakan standar ASTM E606 [ASTM E606, 2004]. Karakterisasi perubahan struktur material dan jenis patahan yang terjadi dilakukan dengan melakukan pengujian OM, SEM serta EDX.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa , fatigue life yang tertinggi pada pengujian ini didapatkan pada laju regangan 0,005/s dengan amplitudo regangan 0,005 mm/mm sedangkan fatigue life terendah yaitu pada laju regangan 0,005 mm/mm dengan amplitudo regangan, sedangkan ketahanan terhadap tegangan tarik paduan aluminium menunjukkan semakin tinggi amplitudo regangan maka semakin cepat terjadi pengerasan regangan.

Kata kunci: Low Cycle Fatigue, Aluminium, Fatigue Life, siklik, Strain Rate dan Amplitudo Regangan.

**Judul Tesis : STUDI EKSPERIMENTAL SIFAT LOW CYCLE
FATIGUE PADUAN ALUMINIUM 6061-T6**

Nama Mahasiswa : HARIYANTO

Nomor Pokok Mahasiswa : 1425021004

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



Menyetujui

1. Komisi Pembimbing

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

Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.
NIP. 19700412 199703 1 006

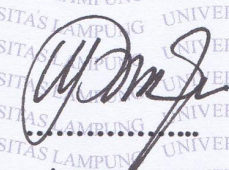
2. Ketua Program Pasca Sarjana

Dr. Amrizal, S.T., M.T.
NIP. 19700202 199803 1 004

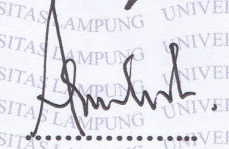
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

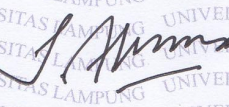
Pembimbing I : Dr. Moh. Badarudin, S.T., M.T.



Pembimbing II : Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.



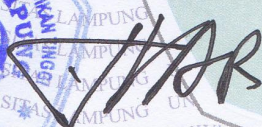
Penguji (Bukan Pembimbing) : Dr. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D
NIP. 19620717 198703 1 002

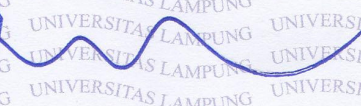


3. Direktur Program Pasca Sarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Sudjarwo, M.S.
NIP. 19530528 198103 1 002

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 02 Juni 2017





KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI RI
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
Jalan prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No.1, Gedong Meneng – Bandar Lampung 35145

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul “ Studi Eksperimental Sifat Low Cycle Fatigue Paduan Aluminium 6061 – T6 ” adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiatisme.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila ndikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya, saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 02 Juni 2017

Yang Membuat



Hariyanto
NPM. 1425021004

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kampung Fajar Asri Kabupaten Lampung Tengah Propinsi Lampung pada tanggal 02 Februari 1980 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, dari Bapak Gisruh dan Mujini.

Pendidikan sekolah dasar di SD N 1 Fajar Asri diselesaikan pada tahun 1993, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP N 2 Terbanggi Besar selesai pada tahun 1996, Sekolah Menengah Atas di SMK Negeri 2 selesai tahun 1999 serta Pendidikan S-1 di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin di Universitas Bandar Lampung selesai di tahun 2005. Tahun 2014, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Pasca Sarjana Universitas Lampung pada Program Magister Teknik Jurusan Magister Teknik Mesin. Penulis bekerja sebagai Guru di SMK Negeri 1 Seputih Agung Kabupaten Lampung Tengah.

Motto

**Sebaik-baiknya manusia diantaramu adalah yang paling
banyak manfaat bagi orang lain.**

(Muhammad Rasullulah Shallallahu 'alaihi wasallam)

**Allah akan meninggikan derajat orang-orang yang beriman
diantara kamu dan orang-orang yang memiliki ilmu
pengetahuan.**

(Al-Mujadillah:11)

**Barang Siapa menginginkan kebahagiaan didunia dan
diakhirat maka haruslah memiliki banyak ilmu.**

(HR.Ibnu Asakir)

PERSEMBAHAN

Dengan puji syukur kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala, Penulis persembahkan karya ini untuk :

- Bapak Gisruh, ibu Mujini, Bpk. Parso, ibu Suhartati.
- Istri ku, Eli Setiowati, A.Md ., terima kasih yang selalu memberikan motivasi dan semangat.
- Anak, Bilqis Azwa Safrina semoga bisa menjadi kebanggaan orang tua dan agama melebihi pencapaian kedua orang tua mu.
- Paino A.Md, Ahmat Aris Triono, Ebit Sutoto, Erik Suprpto dan Enggal Bagus Suseno
- Dosen-dosen Magister Teknik Mesin, terima kasih bimbingan dan ilmu yang disampaikan semoga menjadi Ilmu yang bermanfaat
- Seluruh warga SMK Negeri 1 Seputih Agung Lampung Tengah
- Rekan-rekan Magister Teknik Mesin Angkatan I, semoga silaturahmi kita selalu terjaga.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala, atas segala karunia dan ridho-NYA, sehingga tesis dengan judul “Study Eksperimental Sifat Low Cycle Fatigue Paduan Aluminium 6061-T6” ini dapat diselesaikan. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik dalam bidang keahlian Teknik Mesin Universitas Lampung.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya, kepada :

1. Bapak Ahmad Su'udi, ST.,MT., selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
2. Dr. Amrizal, selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin
3. Dr. M. Badarrudin, selaku Dosen pembimbing utama atas bimbingan, arahan dan waktu yang telah diluangkan kepada penulis untuk berdiskusi dalam proses penyelesaian Tesis ini.
4. Dr. Asnawi Lubis, selaku Dosen Pembimbing kedua atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran, dan masukan dalam proses penyelesaian Tesis ini
5. Dr. Jamiatul Akmal, selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.

6. Orang Tua, Istri dan anak tercinta serta saudara-saudara tercinta yang telah memberikan dukungan dan motivasinya.
7. Kawan-kawan seperjuangan Angkatan 1 Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.

Akhir kata, penulis menyadari akan kekurangan dan kelemahan dalam penyajian Tesis ini, oleh karena itu Penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak yang sifat membangun dan sangat demi perbaikan di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 03 Juni 2017
Penulis

Hariyanto

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
LEMBAR PENGESAHAN	vii
SURAT PERNYATAAN	viii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	ix
MOTTO	x
PERSEMBAHAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang dan Permasalahan.....	1
1.2. Tujuan Khusus.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Kelelahan pada Alumunium.....	4
2.2. Faktor Faktor Yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah.....	6
2.3. Kelelahan material (<i>fatigue</i>).....	7
2.4. Pendekatan Berbasis regangan	9
BAB III METODE PENELITIAN	11
3.1. Persiapan Spesimen dan Peralatan uji	11
3.1.1. Material dan Pembuatan Spesimen	11
3.1.2. Peralatan Pengujian	12
3.1.3. Metode pengujian.....	12
3.2. Pengujian low cycle fatigue.....	12
3.3. Observasi mikrostruktur and fraktografi	13
3.4. Pengujian terhadap ketahanan uji tarik	13
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	15
4.1. Hasil Pengujian.....	15
4.1.1. Hasil uji laju kelelahan siklus rendah.....	15
4.1.2. Struktur mikro dan Fenomena <i>Cracking</i>	23
4.1.3. Kurva beban monotonik dan siklik	27
4.1.4. Kelelahan siklus rendah (LCF) berbasis pendekatan coffin Manson 27	27
4.2. Pembahasan	29

4.2.1. Perilaku tegangan-regangan siklik terhadap jumlah siklus kegagalan ..	29
4.2.2. Struktur mikro	32
4.2.3. Fenomena Cracking	35
4.2.4. Ketahanan terhadap tegangan tarik	37
4.2.5. Kelelahan siklus rendah (LCF) berbasis pendekatan coffin mansion	38
BAB V SIMPULAN DAN REKOMENDASI	39
5.1. Simpulan.....	39
5.2. Rekomendasi	40
DAFTAR PUSTAKA	41

DAFTAR GAMBAR

<i>Gambar</i>	<i>Halaman</i>
1. Kurva tegangan vs. siklus	8
2. Dimensi uji tarik	11
3. Dimensi uji fatik	12
4. Kurva tegangan puncak vs. jumlah siklus pada laju regangan 0,003/s.....	17
5. Kurva tegangan puncak vs. jumlah siklus pada laju regangan 0,004/s.....	17
6. Kurva tegangan puncak vs. jumlah siklus pada laju regangan 0,004/s.....	18
7. Kurva tegangan vs. regangan strain rate 0.003/s pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm	18
8. Kurva tegangan vs regangan strain rate 0.003/s pada amplitudo regangan 0.011 mm/mm	19
9. Kurva tegangan vs regangan strain rate 0.004/s, pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm	19
10. Kurva tegangan vs regangan strain rate 0.004/s pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm	20
11. Kurva tegangan vs regangan strain rate 0.005/s pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm	20

12. Kurva tegangan vs regangan strain rate 0.005/s pada amplitudo regangan 0.011 mm/mm	21
13. Kurva siklik softening / hardening terhadap variasi amplitudo regangan dan variasi laju regangan	23
14. SEM analisis struktur mikro dan perambatan retak spesimen hasil uji LCF dengan amplitudo regangan 0,007 mm/mm (a dan b) pada strain rate 0.003/s, (c dan d) pada strain rate 0.004/s, dan (e dan f) pada strain rate 0.005/s	24
15. SEM fraktologi spesimen hasil uji LCF pada kondisi (a) $a = 0,005$ mm/mm, $\dot{\epsilon} = 0,003$ /s; (b) $a = 0,009$ mm/mm, $\dot{\epsilon} = 0,003$ /s; (c) $a = 0,009$ mm/mm, $\dot{\epsilon} = 0,004$ /s; (d) $a = 0,013$ mm/mm, $\dot{\epsilon} = 0,004$ /s; (e) $a = 0,009$ mm/mm, $\dot{\epsilon} = 0,005$ /s	25
16. Kurva tegangan vs regangan	27
17. Strain vs. residual to failure strain rate 0.003 /s	27
18. Strain vs. residual to failure strain rate 0.004 /s	28
19. Strain vs. residual to failure strain rate 0.005 /s	28

DAFTAR TABEL

<i>Tabel</i>	<i>Halaman</i>
1. Hasil uji low cycle fatigue paduan aluminium 6061-T6	16
2. Siklus softening dan hardening laju regangan 0.003/s	21
3. Siklus softening dan hardening laju regangan 0.004/s	22
4. Siklus softening dan hardening laju regangan 0.005/s	22
5. Tabel hasil EDS komponen elemen (Wt %)... ..	26
6. Tabel hasil EDS komponen elemen Atomik laju regangan 0.003/s (%)	26
7. Tabel hasil EDS komponen elemen Atomik laju regangan 0.004/s (%)	26
8. Tabel hasil EDS komponen elemen Atomik laju regangan 0.005/s (%)	26
9. Hasil koefisien dan eksponen fatigue life tiap material	29

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Permasalahan

Sekarang ini paduan aluminium 6061-T6 secara luas banyak digunakan pada industri otomotif, pesawat terbang dan militer karena paduan ini memiliki sejumlah keunggulan dibanding material lainnya, diantaranya adalah kekuatan tinggi, spesifik gravitasi rendah, mampu cor tinggi, ketahanan aus tinggi, termal ekspansi rendah dan ketahanan korosi tinggi [Ammar et al.,2008, Okayasu et al., 2012]. Paduan Al 6061-T6 adalah paduan aluminium-silikon-magnesium yang memiliki kekuatan yang baik dan sifat mampu bentuk yang sangat tinggi, hal ini membuat paduan aluminium 6061-T6 sangat memungkinkan untuk digunakan dalam bentuk plate, ekstrusi, foil, lembar, pipa, forging, bahkan bentuk struktural dalam ruang udara, konstruksi, dan industri transportasi dengan biaya yang relatif rendah adalah alasan untuk digunakan secara luas dan telah diproduksi dalam berbagai bentuk tertentu [Davis, 1993].

Paduan Aluminium telah menggantikan peranan besi cor untuk beberapa komponen utama mesin kendaraan, seperti kepala silinder, blok mesin dan komponen lainya pada produksi mobil murah di Indonesia, sehingga paduan aluminium banyak diproduksi untuk komponen seperti piston, velg roda kendaraan, kepala silinder, gearbox [Dietrich and Radziejewska, 2011,

Okayasu et al., 2012, Fan et al., 2013]. Dalam aplikasinya, paduan aluminium untuk komponen kendaraan bermotor dan pesawat sering mengalami beban siklik dalam kondisi tertentu dan akhirnya bahan mengalami deformasi plastis [Fan et al., 2015]. Masalah utama yang sering muncul pada komponen adalah terbentuknya retak selama periode waktu tertentu tanpa dapat diidentifikasi sejak dini. *Low cycle fatigue* (LCF) merupakan penyebab utama terbentuknya retak awal, yang akhirnya retak berkembang memicu terjadinya kerusakan yang mengarah kepada kegagalan bagian komponen-komponen mesin lain. Dalam sudut pandang mikrostruktur, peranan elemen-elemen seperti: Mg, Si, Fe dan Ti yang masuk kedalam paduan aluminium mempunyai peranan penting dalam mempengaruhi sifat fatigue paduan aluminium [Zhu et al., 2006, De et al., 2009, Song et al., 2011, Dezecot and Brochu, 2015, Huter et al., 2016]. Oleh karena itu, sangat penting dilakukan studi ekperimental secara komprehensif sifat fatigue paduan Aluminium yang mengandung (Si), (Mg), (Fe) dan Titanium (Ti) untuk aplikasi otomotif dalam kondisi beban siklik (LCF) pada temperatur ruang.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari sifat *low cycle fatigue* (LCF) paduan Al 6061 T6 (Al- Mg- Si-Fe-Ti). Adapun tujuan khusus penelitian adalah menentukan sifat mekanik dan sifat LCF paduan Al- Si- Fe-Ti dalam kondisi laju regangan dan amplitudo regangan yang bervariasi pada temperatur ruang. Penelitian secara menyeluruh meliputi: (1) investigasi mekanisme kegagalan bahan dalam kondisi LCF terkait variasi amplitudo

regangan dan laju regangan yang berbeda diberikan pada spesimen uji pada temperatur ruang, dan (2) observasi mikrostruktur dan fractografi setelah uji LCF menggunakan Mikroskop Optik (OM), *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, dan *Electron Dispersive Spectroscopy (EDS)* akan dilakukan.

1.3. Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian terbatas pada

1. Material yang digunakan dalam penelitian adalah paduan Al 6061 T6
2. Laju regangan $3 \times 10^{-3}/s$ sampai $5 \times 10^{-3}/s$
3. Amplitudo regangan 0.3% sampai 1.3%
4. Rasio regangan $R = -1$
5. Kondisi pengujian tarik dan LCF pada temperatur ruang

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian mengenai karakteristik retak lelah pada paduan Aluminium Al 6061 T6 ini dapat diambil manfaat antara lain :

1. Sebagai data-data sifat kekuatan tarik dan sifat LCF paduan Al 6061 T6 bagi industri yang menggunakan paduan ini untuk komponen-komponen kendaraan.
2. Memberi masukan bagi ilmu pengetahuan tentang sifat LCF paduan Al 6061 T6 pada temperatur ruang.
3. Meningkatkan pengetahuan dan wawasan peneliti dalam mengevaluasi dan memprediksi kekuatan fatigue dan umur *fatigue* paduan Al 6061-T6

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kelelahan Pada Paduan Aluminium

Paduan aluminium banyak menarik minat para produsen sebagai bahan konstruksi ringan maupun komponen otomotif dan lainnya karena memiliki banyak kelebihan dibanding material lainnya. Namun, peningkatan penggunaan paduan Aluminium dalam aplikasi otomotif, seperti bodi mesin dan kepala silinder, membutuhkan pemahaman yang lebih baik dari respon paduan terhadap sifat *fatigue*. Sehingga menarik minat peneliti untuk melakukan kajian tentang kekuatan *fatigue* pada paduan aluminium. Peneliti sebelumnya telah banyak melakukan penelitian paduan aluminium pada kondisi control beban dalam zona *fatigue* siklus tinggi (*HCF*) seperti yang dilakukan [Ceschini et al., 2009; Le et al., 2016; Munoz et al., 2016].

Dalam penelitian evaluasi *HCF*, Ceschini et al., [2009] melaporkan bahwa kerusakan *fatigue* paduan Al-10Si-2Cu didominasi oleh tahap pembentukan retak awal dimana partikel intermetalik kaya Fe masuk ke dalam paduan. Pada kondisi ini mereka melaporkan bahwa keberadaan *fatigue time* bahan meningkat karena fasa Fe-intermetalik, karena fasa ini dapat menjadi penghalang retak merambat. Sedangkan Le et al., [2016], melaporkan bahwa perilaku paduan Al-Si coran dipengaruhi karakteristik mikrostruktur endapan partikel Si dalam paduan aluminium. Hal serupa juga dilaporkan

oleh Munoz et al., [2016], meskipun cacat akibat penyusutan alami pada permukaan paduan Al-Mg-Si yang menyebabkan peningkatan level tegangan. Namun, peningkatan umur *fatigue* yang diamati pada cacat internal adalah sebagai konsekuensi perlambatan pembentukan inisiasi retak yang memicu penundaan perambatan retak karena terbentuknya presipitasi fasa $AlMg_4Si_{11}$. Hanya beberapa peneliti yang telah melakukan studi LCF pada paduan Al-mg Sebagai contoh, penelitian awal oleh Ovono et al., [2008] mengungkapkan bahwa umur kelelahan dari paduan Al-Si-Cu dipengaruhi oleh pembentukan kepadatan senyawa fasa intermetalik dan fraksi volume pori-pori. Elhadari et al., [2011] menjelaskan efek menguntungkan dari elemen Zr/V pada umur *fatigue* paduan cor Al-Si-Cu dalam kondisi LCF. Selain itu, Song et al., [2011] mempelajari perilaku LCF Al-Si-Mg-Ti (A356) dari hasil pengecoran gravitasi (GC) menunjukkan bahwa umur kelelahan bahan langsung dipengaruhi oleh penambahan 0.1% Ti yang menghasilkan tegangan luluh yang rendah dan energi regangan plastis tinggi selama uji LCF, sehingga umur *fatigue* paduan meningkat. Fan et al., [2015] melakukan penelitian perilaku *fatigue* (LCF) paduan Al-9Si-3Cu (A333) hasil dari pengecoran gravitasi (GC) untuk kepala silinder pada temperatur 150 °C dan 250 °C dalam atmosfer udara. Mereka melaporkan umur kelelahan paduan A333 pada temperatur 150 °C lebih tinggi dibandingkan pada temperatur 250 °C pada kondisi amplitudo regangan total yang sama. Penurunan *fatigue life* bahan ini pada temperatur 250 °C dipengaruhi beberapa faktor, seperti plastisitas, kehadiran zona bebas presipitasi (PFZ) bersama-sama presipitasi fasa $AlMg_4Zn_{11}$, serta difusi

oksigen pada permukaan retak. Meskipun penelitian perilaku kegagalan akibat LCF telah dilakukan pada berbagai paduan Al-Si, namun data LCF untuk paduan Al-Mg-Si-Fe-Ti pada temperatur ruang dan temperatur tinggi belum tersedia banyak dalam beberapa literatur. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dalam rangka untuk mengeksplorasi secara komprehensif sifat LCF paduan Al-Mg yang mengandung sedikit elemen Fe, Si dan Ti dan mekanisme kegagalan LCF serta perubahan mikrostruktur dalam paduan dipelajari melalui SEM, EDS dan OM untuk memberikan informasi secara detail terhadap perilaku LCF.

2.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fatigue Life

Faktor-faktor yang mempengaruhi atau cenderung mengubah kondisi *fatigue* atau *fatigue life* yaitu tipe pembebanan, putaran, kelembaban lingkungan (korosi), konsentrasi tegangan, suhu, kelelahan bahan, komposisi kimia bahan, tegangan-tegangan sisa, dan tegangan kombinasi. Faktor-faktor yang cenderung mengubah kekuatan lelah pada pengujian ini adalah kelembaban lingkungan (korosi) dan tipe pembebanan sedangkan putaran, suhu, komposisi kimia dan tegangan sisa sebagai variable yang konstan selama pengujian sehingga tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan lelah.

2.3. Kelelahan Material (*fatigue*)

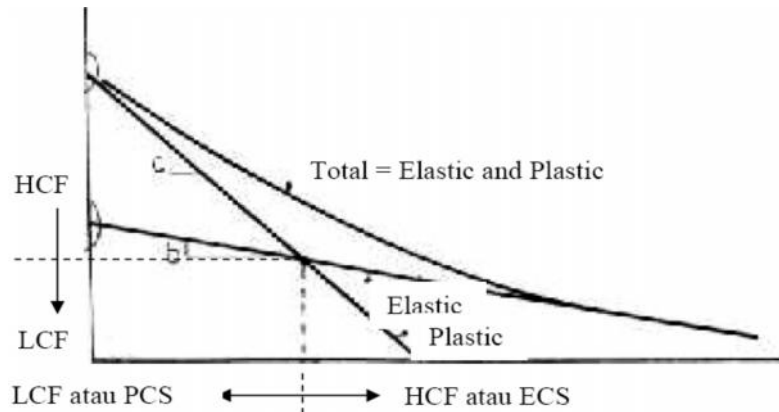
Fatigue atau kelelahan didefinisikan sebagai proses perubahan struktur permanen *progressive localized* pada kondisi yang menghasilkan fluktuasi regangan dan tegangan dibawah kekuatan tariknya pada satu titik atau

banyak titik yang dapat memuncak menjadi retak (*crack*) atau patahan (*fracture*) secara keseluruhan sesudah fluktuasi tertentu. *Progressive* mengandung pengertian proses *fatigue* terjadi selama jangka waktu tertentu atau selama pemakaian, sejak komponen atau struktur digunakan. *Fatigue localized* yang serius terjadi pada daerah yang mengalami tegangan dan regangan yang tinggi karena pengaruh beban luar, perubahan geometri, perbedaan temperatur, tegangan sisa dan tidak kesempurnaan diri. *Crack* merupakan awal terjadinya kegagalan *fatigue* dimana kemudian *crack* merambat karena adanya beban berulang. *Fracture* merupakan tahap akhir dari proses *fatigue* dimana bahan tidak dapat menahan tegangan dan regangan yang ada sehingga patah menjadi dua bagian atau lebih. *Fatigue* terjadi dalam 3 fase yaitu : permulaan retak, penyebaran retak dan *fracture*.

1. Mekanisme dari permulaan retak umumnya dimulai dari *crack initiation* yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan di permukaan (seperti goresan, notch, lubang - pits dll) akibat adanya pembebanan berulang.
2. Penyebaran retak ini berkembang menjadi *microcracks*. Perambatan atau perpaduan *microcracks* ini kemudian membentuk *macrocracks* yang akan berujung pada *failure*. Maka setelah itu, material akan mengalami apa yang dinamakan perpatahan.
3. Perpatahan terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen.

Konsep tegangan terhadap siklus (S-N) merupakan pendekatan pertama untuk memahami fenomena kelelahan logam. Konsep ini secara luas dipergunakan

dalam aplikasi perancangan material dimana tegangan yang terjadi dalam daerah elastis dengan *fatigue life* yang panjang (HCF). Metode S-N ini tidak dapat diterapkan dalam kondisi sebaliknya tegangan pada daerah plastis dengan *fatigue life* yang *relative* pendek (LCF), hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Gambar kurva tegangan vs siklus

HCS = high cycles stress/strain *LCS = low cycles stress/strain*

HCF = high cycles fatigue *LCF = low cycles fatigue*

PCS = plastic cycles strain *ECS = elastic cycles strain*

Kurva tersebut didapat dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan pada specimen uji. Pada kurva ini siklus menggunakan skala logaritma. Batas ketahanan *fatigue* (*endurance limit*) baja ditentukan pada jumlah siklus $N > 10^7$. Kelelahan siklus tinggi (HCF) = Regangan hampir seluruhnya elastis, sedangkan pada kelelahan siklus rendah regangan hampir seluruhnya bersifat plastis [Angeloni, 2012].

2.4. Pendekatan Berbasis Regangan

Pemodelan pendekatan berbasis regangan sering digunakan dalam aplikasi *Low Cycle Fatigue* di mana secara akurat dapat dilihat sifat plastisitas yang menghindarkan kerusakan keausan dalam daerah ini. Pendekatan berbasis regangan bekerja menggunakan uji siklus penuh, yang merupakan penjumlahan regangan elastis dan regangan plastis, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2. Ketika regangan plastis terjadi, maka kemampuan material dalam sebuah konstruksi atau rangkaian akan menurun, tidak lebih dari 10000 siklus, pada kelelahan siklus rendah. Pada penelitian penerbangan tentang kelelahan siklus rendah dilakukan untuk regangan komponen mesin yang terkena panas karena gesekan (tegangan termal). Kelelahan siklus rendah biasanya ditunjukkan dalam bentuk logaritma regangan plastic terhadap logaritma jumlah siklus kegagalan N.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \quad (2)$$

Luas tegangan, $\Delta\sigma/2$, dapat dinyatakan sebagai fungsi dari jumlah pembalikan secara empiris dengan persamaan Basquin

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3)$$

Dimana σ'_f adalah koefisien kekuatan *fatigue* dan b adalah eksponen kekuatan *fatigue*. Karena luas regangan elastis, $\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma/2E$, dimana E adalah modulus elastisitas, persamaan (3) dapat diubah untuk mengetahui kelelahan pada daerah plastis (LCF) elastis sebagai

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (4)$$

Di sisi lain, untuk mengetahui luas kelelahan siklus tinggi (*HCF*) diwakili oleh persamaan Coffin-Manson

$$\frac{\Delta \epsilon \epsilon}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (5)$$

Dimana ϵ'_f adalah koefisien daktilitas/kelenturan *fatigue*, dan c adalah eksponen daktilitas *fatigue*. Gabungan Pers. (3) dan (4), kita memperoleh luas regangan total sebagai fungsi dari jumlah siklus kegagalan.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

Serupa dengan kurva tegangan-regangan monoton yang telah digunakan untuk menentukan parameter desain untuk struktur teknik dan komponen, kurva tegangan-regangan siklik dapat digunakan untuk menilai daya tahan struktur yang cenderung sama dengan komponen yang mengalami beban siklik. Analog dengan deformasi monoton dalam regangan, perilaku tegangan-regangan siklik dapat diwakili oleh

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta \epsilon p}{2} \right)^{n'} \quad (7)$$

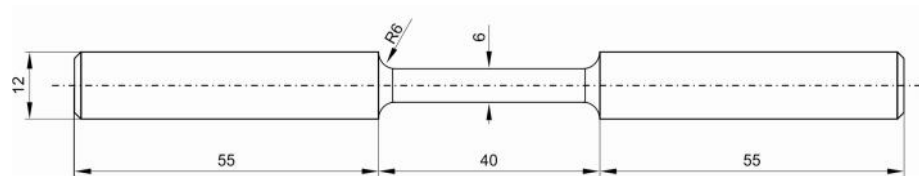
Dimana K' adalah koefisien kekuatan siklik dan n' adalah eksponen pengerasan tekanan siklik [Brammer et al., 2013].

III. METODE PENELITIAN

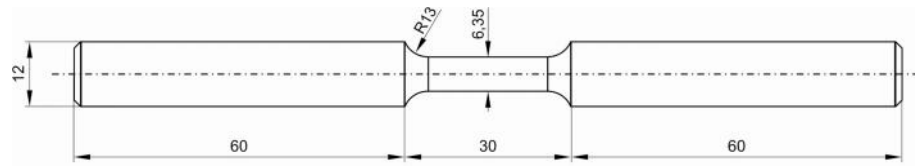
3.1. Persiapan Spesimen dan Peralatan uji

3.1.1. Material dan Pembuatan Spesimen

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium AL 6061 T6 dengan komposisi dasar Si ~ 0,626%; Cu ~ 0,245%; Fe ~ 0,456%; Zn ~ 0,107%; Mg 1,49%; Ni ~ 0,0073%; Mn ~ 0,0853%; Cr ~ 0,0796%; Ti~ 0,182%; Cu ~ 0,254% dan Al~ 96,8%. Bentuk dan dimensi ukuran spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar [ASTM E8, 2004], sedangkan untuk uji LCF menggunakan standar [ASTM E606, 2004]. Proses pemesinan pembuatan spesimen menggunakan CNC EMCO Tronic TM 02 buatan Austria, dikerjakan di P2TK/VEDC Malang-Jawa Timur. Diameter grip spesimen adalah 12 mm untuk uji tarik dan LCF. Total 5 spesimen uji dibuat untuk uji tarik sedangkan spesimen uji LCF dibuat 38 spesimen.



Gambar 2. Dimensi uji tarik ASTM E8



Gambar 3. Dimensi uji fatigue ASTM E606-92

3.1.2. Peralatan Pengujian

Untuk pengujian tarik dan LCF, semua specimen uji yang sudah dibuat sesuai standar, diuji menggunakan mesin MTS Landmark 100 KN (statik dan dinamik)

3.1.3. Metode Pengujian

Pada penelitian ini, untuk menentukan sifat mekanik paduan Al-Si-Fe-Mg-Ti pengujian dilakukan dalam dua jenis pengujian yaitu: pengujian tarik dan pengujian LCF pada kondisi temperatur ruang.

3.2. Pengujian *Low Cycle Fatigue*

Spesimen bentuk silinder panjang total 150 mm dengan diameter reduksi 6,5 mm dan gage length 13 mm, sebanyak 38 spesimen digunakan untuk uji LCF pada temperatur ruang (± 25 °C). Masing-masing pengujian dilakukan setiap satu parameter uji sebanyak lima spesimen. *Extensometer* model 632.13F-20 dengan *gage length* 10 mm dan mempunyai kemampuan mengontrol regangan $\pm 15\%$ siklik dipasangkan pada daerah *gage length* spesimen. Pengujian *low cycle fatigue* dilakukan menggunakan MTS Landmark 100 KN dengan kondisi rasio regangan $R = -1$, laju regangan $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ dan $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, dengan variasi amplitudo regangan 0.5%, 0.7%, 0.9%, 1.1% dan 1.3%. Kurva hysteresis loops (vs.) dan kurva beban vs. jumlah siklus secara otomatis direkam selama pengujian

menggunakan program *MTS Testsuite* sebagai data-data kuantitatif untuk menentukan sifat fatigue paduan Al-Si-Mg-Ti. Semua data yang diperoleh dari hasil uji LCF dianalisis menggunakan software *MTS Fatigue Analyzer* (berlisensi).

3.3. Observasi *mikrostruktur* and *fraktografi*

Observasi *mikrostruktur* dan *fraktografi* dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro karena pembentukan presipitasi elemen Si, Mg dan Ti menggunakan *optical microscopy (OM)* and *scanning electron microscopy (SEM)*. Begitu juga karakterisasi menggunakan EDS dilakukan untuk mempelajari perubahan fasa dari material setelah dilakukan pengujian LCF. Semua data kuantitatif dan kualitatif dari hasil OM, SEM dan EDS digunakan untuk mempelajari perilaku LCF paduan aluminium selama proses pengujian.

3.4. Pengujian Terhadap Ketahanan Uji Tarik

Pengujian tarik pada temperatur ruang dilakukan paling sebanyak tiga spesimen. Selama pengujian tarik, kontrol pergerakan aktuator secara aksial pertama menggunakan laju regangan konstan 0,3% /min untuk menentukan modulus elastisitas dan tegangan luluh (0,2% *offset*). Setelah spesimen mencapai regangan 0,3%, kontrol aktuator secara otomatis dipindah ke kontrol perpindahan dengan laju 0,15 mm/min [ASTM E8, 2004]. Pengujian dilakukan sampai spesimen patah sehingga diperoleh data tegangan luluh, modulus elastisitas, *yield* dan tegangan maksimum. Nilai regangan plastis

yang diperoleh dari kurva tegangan vs. regangan digunakan sebagai nilai referensi untuk parameter pengujian LCF.

V. SIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1. Simpulan

Dalam pengujian ini, rasio regangan dikendalikan untuk uji secara sistematis diamati pada berbagai tingkat laju regangan (0,003/s; 0,004/s dan 0,005/s). Untuk setiap laju regangan diberikan amplitudo regangan 0,005 mm/mm, 0,007 mm/mm; 0,009 mm/mm; 0,011 mm/mm dan 0,013 mm/mm, dengan $R = -1$ di dapatkan hasil yaitu:

1. Perilaku tegangan dan regangan siklik terhadap jumlah siklus kegagalan yang erat hubungannya dengan *fatigue life* didapatkan stabilitas yang kontinyu untuk siklus kegagalan hingga terjadinya kegagalan pada spesimen, *fatigue life* yang tertinggi pada pengujian ini didapatkan pada laju regangan 0,005/s dengan amplitudo regangan 0,005 mm/mm sedangkan *fatigue life* terendah yaitu pada laju regangan 0,005 mm/mm dengan amplitudo regangan 0,013 mm/mm.
2. Paduan aluminium setelah mengalami pengujian LCF pada daerah fracture dan sekitarnya menunjukkan patahan elastis berupa tear ridges dan dimples dan hanya terjadi pada pori, fase α -Fe dan bagian partikel silikon pada laju regangan 0,003/s, sedangkan pada laju regangan 0,004/s dan 0,005/s, menunjukkan kelelahan striations bersama.

3. material menunjukkan pengerasan terus menerus sejak siklus pertama gagal. Fenomena *loop hysteresis* yang diamati menunjukkan tren yang baik dalam deformasi siklik yaitu laju pengerasan atau stabilitas .
4. Pengujian ketahanan terhadap tegangan tarik paduan aluminium menunjukkan semakin tinggi amplitudo regangan maka semakin cepat terjadi pengerasan regangan.

5.2. Rekomendasi

Dari penelitian yang telah dilakukan, rekomendasi yang dapat diberikan adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang sistem kelelahan siklus rendah (LCF) dari Al 6061-T6 dengan menggunakan laju regangan lebih bervariasi.
2. Untuk pemilihan amplitudo regangan diupayakan di bawah 0.015mm/mm.

DAFTAR PUSTAKA

- Angeloni M., 2013, Fatigue life evaluation of A356 aluminum alloy used for engine cylinder head.
- Ammar H.R., Samuel A.M. dan Samuel F.H., Controlled Fatigue Testing, West Conshohocken, United States. 2008, Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum–silicon casting alloys, *International Journal of Fatigue*, 30: 1024-1035.
- ASTM E8, 2004, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, West Conshohocken, United States. ASTM E606, 2004, Standard Practice for Strain.
- Brammer A.T., 2013, Experiments and modeling of the effects of heat exposure on fatigue of 6061 and 7075 aluminium alloys,
- Ceschini L., Boromei I., dan Morri A.I., Seifeddine S. dan Svensson I.L., 2009, Microstructure, tensile and fatigue properties of the Al–10%Si–2%Cu alloy with different Fe and Mn content cast under controlled conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15–16): 5669-5679.
- Davis J.R., 1993, ASM Komite Handbook Internasional, ASM Handbook khusus: Aluminium dan Aluminium Paduan, Bahan Park: ASM International.
- De P.S., Mishra R.S. dan Smith C.B., 2009, Effect of microstructure on fatigue life and fracture morphology in an aluminum alloy, *Scripta Materialia*, 60(7): 500-503.
- Dezecot S., dan Brochu M., 2015, Microstructural characterization and high cycle fatigue behavior of investment cast A357 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, 77: 154-159.
- Dietrich L. dan Radziejewska J., 2011, The fatigue damage development in a cast Al–Si–Cu alloy, *Materials & Design*, 32(1): 322-329.
- Elhadari H.A., Patel H.A., Chena D.L. dan Kasprzak W., 2011, Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions, *Materials Science and Engineering: A*, 528(28): 8128-8138.

- Fan K.L., He G.Q., Liu X.S., Liu B., She M., Yuan Y.L., Yang Y. dan Lu Q., 2013, Tensile and fatigue properties of gravity casting aluminum alloys for engine cylinder heads, *Materials Science and Engineering: A*, 586: 78-85.
- Fan K.L., Liu K.S., He G.Q. dan Chen H., 2015, Elevated temperature low cycle fatigue of a gravity casting Al–Si–Cu alloy used for engine cylinder heads, *Materials Science and Engineering: A*, 632:127-136.
- Huter P., Renhart P., Oberfrank S., Schwab M., Grun F. dan Stauder B., 2016, High- and low-cycle fatigue influence of silicon, copper, strontium and iron on hypo-eutectic Al–Si–Cu and Al–Si– Mg cast alloys used in cylinder heads, *International Journal of Fatigue*, 82(3): 588-601.
- Le V.D., Morel F., Bellett D., Saintier N. dan Osmond P., 2016, Multiaxial high cycle fatigue damage mechanisms associated with the different microstructural heterogeneities of cast aluminium alloys, *Materials Science & Engineering: A*, 649: 426-440.
- Munoz I.S., Buffiere J.Y., Verdu C., Gaillard Y., Mu P. dan Nadot Y., 2016, Influence of surface and internal casting defects on the fatigue behaviour of A357-T6 cast aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, 82(3): 361-370.
- Okayasu M., Ohkura Y., Takeuchi S., Takasu S., Ohfuji H. dan Shiraishi T., 2012, A study of the mechanical properties of an Al–Si–Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes, *Materials Science and Engineering: A*, 543: 185–192.
- Ovono O.D., Guillot I. dan Massinon D., 2008, Study on low-cycle fatigue behaviours of the aluminium cast alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 452(2): 425–431.
- Song M.S., Kong Y.Y., Ran M.W. dan She Y.C., 2011, Cyclic stress–strain behavior and low cycle fatigue life of cast A356 alloys, *International Journal of Fatigue*, 33(12): 1600-1607.
- Zhu X., Shyam A., Jones J.W., Mayer H., Laseckic J.V. dan Allison J.E., 2006, Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles, *International Journal of Fatigue*, 28(11): 1566-1571.