

**KOROSI FATIK PADUAN AL 7075-T7 DALAM LINGKUNGAN KOROSI
AIR LAUT (3,5% NaCl)**

(Skripsi)

Oleh:

**HAMZAH YASIN
1615021047**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

KOROSI FATIK PADUAN AL 7075-T7 DALAM LINGKUNGAN KOROSI AIR LAUT (3,5% NaCl)

Oleh

HAMZAH YASIN

Penggunaan Al 7075-T7 banyak digunakan di bidang dirgantara dan transportasi. Aplikasi Al 7075 salah satunya pada rangka dan badan pesawat dikarenakan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Komponen pesawat yang dibawa kapal angkut laut menyebabkan kegagalan komponen karena beban gaya dan cipratan air laut. Penelitian ini bertujuan mengetahui kekuatan Fatik paduan AL 7075-T7 pada kondisi lingkungan korosi dan mempelajari mekanisme pada perubahan struktur mikro.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung pada bulan September – Desember 2021. Penelitian dimulai dengan pembuatan spesimen uji tiap pengujian dan larutan NaCl 3,5%. Pengujian korosi material dengan media korosi pada pengaruh putaran *stirer* 600rpm selama 1 minggu. Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum yang dipakai pada pengujian Fatik siklus tinggi dan retak Fatik. Pengujian Fatik menggunakan $R=-1$, $f=10\text{Hz}$, dan beban maksimum 60% UTS dengan perlakuan *raw* material dan peredaman korosi selama 1 hari dan 2 hari, dilakukan 3 kali pengulangan tiap variabel. Pengujian retak menggunakan $R=0,1$, $f=5\text{Hz}$, dan beban maksimum 40% UTS dengan perlakuan *raw* material dan peredaman korosi 60 jam.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan korosi berpengaruh terhadap umur Fatik aluminium. Aluminium yang mengalami perlakuan korosi mendapatkan umur Fatik lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perlakuan. Perlakuan korosi 1 hari dan 2 hari mendapatkan 2710 dan 2575 siklus dibandingkan 7262 siklus *raw* material. Perlakuan korosi berpengaruh pada presipitat di batas butir yang membuat korosi intergranular terjadi dan melemahkan material.

Kata kunci: Aluminium 7075-T7, Korosi, Korosi fatik, Perambatan retak fatik

ABSTRACT

CORROSION FATIGUE AL 7075-T7 ALLOY IN CORROSION ENVIRONMENT OF SEA WATER (3,5% NaCl)

By

HAMZAH YASIN

Application Al 7075-T7 many used in the aircraft and transfortasi vehicle. One of application on the frame and plane body because strength to weight ratio high. Aircraft componenet carried by ocean ship cause component failure duet o force and seawater splash. This researc aims to determine the fatigue strenght of Al 7075-T7 alloy in corrosion environment condition and study the mechanism of structure micro. This research was conducted at the Materials Laboratory of Department of Mechanical Engineering, University of Lampung in September-December 2021. The research began with preparing test specimens for each test and 3.5% NaCl solution. Material corrosion testing with corrosion media at the 600rpm stirrer rotation for 1 week. Tensile testing to obtain the maximum stress used in high-cycle fatigue and fatigue cracking test. Fatigue testing using $R=-1$, $f=10\text{Hz}$ and maximum load of 60%UTS. Crack testing using $R=0.1$, $f=5\text{Hz}$ and maximum load of 40%UTS. The results of research corrosion treatment affect the fatigue life of aluminum. Aluminium in corrosion treatment gets a smaller fatigue life compared to not treatment. 1 day and 2 day corrosion treatment obtained 2710 and 2575 cycle compared to 7262 cycle of raw material. Corrosion treatment affects the precipitation at the grain boundary which makes intergranular corrosion occur and weakens the material.

Key word: Aluminum 7075-T7, Corrosion, Corrosion fatigue, Fatigue crack propagation,

**KOROSI FATIK PADUAN AL 7075-T7 DALAM LINGKUNGAN KOROSI
AIR LAUT (NaCl 3,5%)**

Oleh

HAMZAH YASIN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : **KOROSI FATIK PADUAN AL 7075-T7 DALAM LINGKUNGAN AIR LAUT (NaCl 3,5%)**

Nama Mahasiswa : **Hamsah Yasin**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1615021047**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Komisi Pembimbing 1

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

Komisi Pembimbing 2

Harnowo Supriadi, S.T., M.T.
NIP. 19690909 199703 1 002

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 1 003

Kepala Program Studi S1
Teknik Mesin

Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP. 19701104 199703 2 001

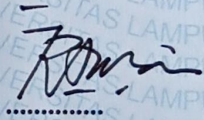
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

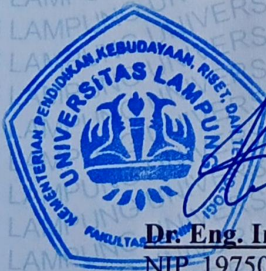
Ketua Penguji : **Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.**

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

Penguji Utama : **Dr. Irza Sukmana, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **13 JUNI 2023**

PERNYATAAN PENULIS

DENGAN INI PENULIS MENYATAKAN SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PENGATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN REKTOR NO.3187/H26/DT/2010.

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



HAMZAH YASIN

NPM. 1615021047

Handwritten signature of Hamzah Yasin

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di lahirkan di Tanjung Priok, Jakarta Utara pada tanggal 5 Desember 1997, sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara, dari bapak Muhammad Yasin dan Ibu Heryati.

Pendidikan Taman kanak-kanak (TK) Muslim Lagoa diselesaikan tahun 2002. Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SD Negeri 07 Lagoa, Jakarta Utara, pada tahun 2009. Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 114 Jakarta pada tahun 2012. Sekolah Menengah Akhir (SMA) di SMA Negeri 52 Jakarta pada tahun 2015.

Tahun 2016, penulis terdaftar sebagai mahasiswa jurusan teknik mesin FT Unila melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi anggota kominfo di Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Pada tahun 2019 penulis melakukan kerja praktik di Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) Pusat Teknologi Material (PTM) Tangerang Selatan dengan judul “Pembuatan Mikrogranul Biphasic Calcium Fosfat Metode Penetesan Dengan Jarak 6 Cm pada Larutan CaCl 0.1 M”.

MOTTO

“Semua Akan Baik-Baik Saja yang Ikhlas dan Sabar”

(Anggun novitasari)

“Hidup Memang Naik Turun, tapi Pada Akhirnya Semua akan Baik-Baik Saja”

(Tahi Lalat)

“Jalanin Saja Hidup karena Tidak Ada yang Pasti di Masa Depan”

(Anonim)

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan segenap puji serta syukur atas kehadiran Allah SWT.

Saya persembahkan Skripsi ini kepada :

Allah SWT yang selalu memberikan, melimpahkan dan mencurahkan berkah juga rahmat-Nya kepada peneliti sehingga dimudahkan dan dilancarkan dalam menyelesaikan penelitian skripsi dengan sangat amat baik.

Kedua Orang Tuaku

Ayah dan Mamah

Tulisan ini sebagai wujud tanda terima kasih dan kewajibanku sebagai seorang anak. Terimakasih atas doa, kasih sayang, kesabaran dan dukungan yang telah diberikan hingga saat ini.

Kedua Kakakku

Mpok Dian dan Kakak Fitri

Terimakasih atas segala dukungan dan motivasi serta masukan saran yang telah diberikan sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin, syukurku panjatkan atas kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Korosi Fatik Paduan AL 7075-T7 dalam Lingkungan Korosi Air Laut (NaCl 3,5%)”. Tujuan dari penulisan skripsi ini yaitu sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar S1 dan untuk melatih mahasiswa dalam berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih adanya beberapa kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dalam pembuatan skripsi ini.

Penulis

Hamzah Yasin

SANWACANA

Puji dan syukur peneliti panjatkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi yang berjudul “Korosi Fatik Paduan Al-7075 dalam Lingkungan Korosi Air Laut (3,5% NaCl)” Sholawat serta salam semoga tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat wajib perkuliahan jenjang Strata 1 Program Studi Teknik Mesin Universitas Lampung. Selama pelaksanaan penelitian berlangsung peneliti dibantu dan diberikan saran oleh berbagai pihak sehingga terealisasinya skripsi ini.

Dalam kesempatan ini peneliti ingin mengucapkan terima kasih kepada.

1. Kedua orang tua, Ayah Muhammad Yasin, S.Pd dan Mamah Heryati yang telah mendukung dan mendoakan peneliti sehingga dapat semangat dan lancar dalam menjalankan studi di Teknik Mesin Universitas Lampung.
2. Kedua kakak, Dian Heryani, S.Pd dan Eni Fitri Sintia, S.Kep yang telah memberikan dukungan dan motivasi serta masukan saran yang telah diberikan sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
4. Bapak Dr. Amrul S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Ibu Novri Tanti S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung sekaligus pembimbing akademik dari penulis.

6. Bapak Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 1 Tugas Akhir Skripsi yang telah membimbing dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 2 Tugas Akhir Skripsi yang telah membimbing dalam penyusunan skripsi.
8. Bapak Dr. Irza Sukmana, S.T., M.T., selaku Dosen penguji Tugas Akhir Skripsi yang telah memberi masukan dalam penyusunan skripsi.
9. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak pengetahuan kepada peneliti.
10. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
11. Tim Laboratorium Material Teknik.
12. Anggun Novitasari, S.Sos, selaku yang telah menemani peneliti dalam suka dan duka serta menjadi pihak 24/7 peneliti.
13. Teman-teman Angkatan 2016 yang telah bersama-sama studi dan berdiskusi serta memberikan motivasi, dan memberi dorongan dan semangat.
14. Semua pihak yang telah mendukung peneliti yang tidak dapat disebutkan satu persatu, peneliti ucapkan terima kasih semoga Allah SWT memberikan keberkahan.

Bandar Lampung, 13 Juni 2023

Hamzah Yasin

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan	3
C. Batasan Masalah	3
D. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
A. Logam Aluminium	5
B. Perilaku Korosi Paduan Aluminium Seri 7XXX	6
C. Mekanisme Korosi Fatik	7
D. Anodic Dissolution	8
E. Pengaruh Lubang pada Fatik Aluminium 7075	8
F. Pengujian Mekanik	9
1. Pengujian Tarik.....	9
2. Pengujian Fatik	10
G. Perambatan Retak (<i>Crack Propagation</i>)	15
1. Faktor Intensitas Tegangan.....	17
2. <i>Fracture Toughness</i>	18
3. <i>Fatigue Crack Growth</i>	19
H. Metode Perhitungan Perambatan Retak	20
III. METODOLOGI PENELITIAN	21
A. Tempat Penelitian	21
B. Bahan dan Peralatan	21

1. Bahan Penelitian	21
2. Peralatan Penelitian.....	23
C. Prosedur Pengujian	26
1. Persiapan Spesimen Uji	26
2. Pembuatan Spesimen Uji.....	26
3. Pengujian Korosi.....	27
4. Pengujian Tarik Statis	28
5. Pengujian Fatik Siklus Tinggi.....	29
6. Pengujian Retak	31
7. Pengamatan Fraktografi dan Struktur Mikro	32
D. Diagram Alir Penelitian	33
IV. PEMBAHASAN	34
A. Uji Korosi	34
B. Uji Tarik	38
C. Uji Fatik	39
D. Uji Retak	41
E. Fraktografi SEM	50
F. Struktur Mikro SEM	53
V. SIMPULAN DAN SARAN	56
A. Simpulan	56
B. Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Data hasil uji korosi.....	28
2. Data hasil uji tarik	29
3. Data hasil uji fatik siklus tinggi.....	30
4. Data pengujian retak.....	32
5. Data hasil uji korosi.....	35
6. Data hasil uji fatik	39
7. Data hasil uji retak aluminium 7075-T7 <i>raw</i> material	43
8. Data modifikasi uji retak aluminium 7075-T7 <i>raw</i> material.....	44
9. Data hasil uji retak aluminium 7075-T7 pengaruh korosi.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
1.	Logam aluminium murni (Packard, 2017).....	5
2.	Kurva tegangan regangan aluminium 7075 (Kadkhodayan & Maarefdoust 2014).....	9
3.	Simbol dalam siklus gaya siklik (Yung-li Lee, et. al., 2005).	11
4.	Data fatik bending (Yung-li Lee, et. al., 2005).....	12
5.	Kurva penambahan retak fatik (Barsom & Rolfe, 1999).	15
6.	Komponen tegangan.	17
7.	Nilai K1 untuk macam geometri retak (Barsom & Rolfe, 1999).	18
8.	Modus pergeseran permukaan retak (Barsom & Rolfe, 1999).	19
9.	Skematik laju pertumbuhan retak (Huang Lin, 2011).	19
10.	Beban fatik pada perambatan retak (Barsom & Rolfe, 1999).	20
11.	Aluminium 7075-T7.	21
12.	NaCl untuk laboratorium.	22
13.	Aquades.	22
14.	Etanol.	22
15.	Mesin MTS Landmark 100 kN.	23
16.	Mikroskop dinolite.	23
17.	Vernier calliper.	24
18.	Selang silikon dan penjepit.	24
19.	Timbangan digital.	24
20.	Gelas kimia.	25
21.	Ultrasonic cleaner.	25
22.	Stirer.	25
23.	Dimensi spesimen uji tarik standar ASTM E8.	26
24.	Dimensi spesimen uji fatik siklus tinggi.	26
25.	Dimensi spesimen uji retak standar ASTM E647.	26
26.	Dimensi spesimen uji korosi standar ASTM G31-72.	27
27.	Diagram alir penelitian.	33
28.	Spesimen uji korosi awal.	34
29.	Hasil uji korosi akhir.	35
30.	Hasil uji korosi.	36

31.	Stress-strain aluminium 7075-T7.	38
32.	Hasil patah uji tarik.....	39
33.	Pengaruh waktu peredaman korosi terhadap umur fatik aluminium 7075-T7.	40
34.	Hasil patah uji fatik: a. Fatik raw b. Fatik korosi.	41
35.	Pengujian spesimen retak fatik raw material.	42
36.	Hasil uji rambat retak fatik raw material : a. 0 siklus, b. 32339 siklus, c. 32806 siklus, d. 33081 siklus.....	42
37.	Hubungan panjang retak terhadap siklus <i>raw</i> material.	43
38.	Hubungan panjang retak terhadap siklus aluminium 7075-T7 <i>raw</i> material modifikasi.	45
39.	Hubungan ΔK dengan da/dN aluminum 7075-T7 raw material.....	46
40.	Hasil Patah Uji Retak Raw Material.....	47
41.	Hubungan panjang retak terhadap siklus aluminium 7075-T7 raw material modifikasi penelitian budyarti.	47
42.	Hubungan ΔK dengan da/dN aluminum 7075-T7 raw material penelitian Budyarti.	47
43.	Hasil uji retak fatik perlakuan korosi.....	48
44.	Hasil patah uji retak fatik perlakuan korosi.....	49
45.	Fraktografi SEM fatik raw material pembesaran 31X.....	50
46.	Fraktografi SEM fatik raw material pembesaran 2000X.....	51
47.	Fraktografi SEM fatik perlakuan korosi pembesaran 31X.	52
48.	Fraktografi SEM fatik perlakuan korosi pembesaran 1000X.	53
49.	Hasil struktur mikro Al 7075-T7 a. Raw material pembesaran 1000X b. Raw material pembesaran 5000X.	54
50.	Hasil struktur mikro Al 7075-T7 a. Perlakuan korosi pembesaran 1000X. b. Material korosi pembesaran 5000X.....	55

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kegagalan komponen logam terkait korosi menyebabkan kerugian sekitar US\$2,2 triliun atau 3% dari PDB dunia. Mengingat bahwa sebagian besar kegagalan komponen pesawat disebabkan oleh korosi dan kegagalan terkait kelelahan. Banyak komponen pesawat yang rentan terhadap korosi dan kelelahan, seperti badan pesawat, sayap, dan struktur pendukung yang terbuat dari paduan aluminium. Ada banyak alasan untuk memilih paduan aluminium, termasuk rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, biaya bahan baku yang rendah dan biaya pemrosesan yang rendah (Starke & Staley, 2010).

Material aluminium dipilih karena memiliki ketahanan korosi yang baik yang berguna meningkatkan sifat mekaniknya. Dalam praktiknya aluminium biasa dipadukan dengan logam Si, Fe, Cu, Mn, Mg, dan Zn. Si dan Mg berguna menambah ketahanan material terhadap korosi, sedangkan penambahan Fe digunakan untuk menghambat terjadinya penyusutan material kemudian, Cu digunakan untuk menambah guna kekuatan, lalu Mn ditambahkan untuk memperbaiki kemampuan dibentuk, terakhir Zn ditambahkan untuk menambahkan sifat kekerasan dan kekuatan paduan aluminium yang merupakan paduan utama aluminium seri 7XXX.

Secara khusus, paduan aluminium seri 7XXX mungkin merupakan paduan kekuatan tinggi yang paling banyak digunakan di dunia karena biayanya yang relatif rendah. Aplikasi umum untuk paduan aluminium seri 7XXX adalah untuk komponen stabilizer dan frame yang membutuhkan kekuatan tinggi digunakan pada pesawat tempur yang berada di kapal induk. Lingkungannya menyebabkan kegagalan komponen karena beban gaya selama terpapar

cipratan air laut korosif selain pengaruh korosi ada penyebab lain yang membuat kegagalan komponen pesawat.

Menurut Broek sebagian besar penyebab kerusakan selama konstruksi adalah karena beban berfluktuasi atau beban berulang. Perubahan tegangan ini terjadi berulang-ulang yang relatif cukup besar, Kegagalan struktur tersebut dapat terjadi meskipun tegangan yang terjadi di bagian struktur lebih kecil dari kekuatan maksimum material. Kegagalan ini disebut dengan *fatigue* atau kelelahan. Kelelahan sendiri merupakan proses retak yang terjadi dan merambat di bawah beban berulang (Broek & Benzley, 1976).

Selama beberapa dekade, penelitian ekstensif dan komprehensif telah dilakukan untuk memahami perilaku fatik paduan aluminium 7075 dalam kaitannya dengan mekanisme fatik yang terkait dengan inisiasi retakan dan perambatan retak, (Zhu et al., 2006) melakukan penelitian secara eksperimental perilaku kelelahan Al 7075-T6 di zona kelelahan siklus tinggi (HCF) di bawah beban uniaksial. Mereka menyatakan bahwa perubahan pola tegangan secara signifikan mempengaruhi model retak yang terbentuk, adapun model retak yang terbentuk adalah: retak geser, retak campuran, dan perilaku retak tarik yang bergantung pada besarnya beban. Beban dan regangan maksimum merupakan parameter kunci untuk mempelajari perilaku kegagalan.

Aluminium 7075 dengan paduan utama seng (Zn) dengan kekuatan lebih tinggi tetapi kemampuan bentuk lebih rendah. Kemampuan bentuk yang lebih rendah ini membatasi penggunaannya untuk komponen struktural dengan geometri yang lebih kompleks, seperti *deep drawing* dan *deep rolling*, terutama di industri kedirgantaraan dan transportasi (Song et al., 2011). Paduan Al 7075-T7 bahan yang lebih umum digunakan guna meringankan berat dari material sambil mempertahankan dari kekuatan materialnya.

Pada penelitian Tyler menggunakan tomografi sinar-X untuk mempelajari fatik di lingkungan korosif NaCl 3,5% dan menganalisis efek struktur mikro pada korosi lubang dan korosi fatik dengan fokus pada partikel inklusi dan endapan dimana NaCl mempengaruhi umur inisiasi retak paduan aluminium 7075 (Stannard, 2017). Pada penelitian ini penulis menggunakan cairan korosi NaCl

3,5% untuk menganalisis laju korosi. Setelah proses pengkorosian dilakukan, tahap berikutnya yakni melakukan proses pengujian yang berfungsi untuk menemukan anomali dari logam. Macam jenis dari pengujian yang akan dilakukan yaitu pengujian Tarik dan fatik. Pengujian Tarik pada bahan logam memiliki tujuan yang berguna untuk mengetahui *Ultimate Tensile Strength* (σ_u) *Yield Strength* (σ_y), pada suatu bahan logam. Kemudian pada pengujian selanjutnya, yakni pengujian fatik yang bertujuan guna mengetahui puncak retak (*crack*) pada suatu logam serta patahan (*fracture*). Berdasarkan penjelasan dan uraian dari beberapa literatur, pengaruh lingkungan korosi pada paduan aluminium 7075-T7 terhadap uji fatik siklus tinggi menjadi fokus peneliti dalam riset tugas akhir ini. Penelitian yang dilakukan peneliti tentang **“KOROSI FATIK PANDUAN AL 7075-T7 DALAM LINGKUNGAN KOROSI AIR LAUT (3,5% NaCl)”**.

B. Tujuan

Adapun tujuan penelitian dari tugas akhir ini ialah sebagai berikut yaitu.

1. Mengetahui kekuatan Fatik paduan Al 7075-T7 pada kondisi lingkungan korosi air laut (3,5% NaCl).
2. Mempelajari mekanisme kegagalan fatik siklus tinggi pada perubahan struktur mikro.

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian yang dilakukan ialah sebagai berikut.

1. Spesimen pengujian menggunakan material Aluminium 7075-T7.
2. Salinitas larutan korosi NaCl stabil 3,5%.
3. Perubahan pH pada larutan konstan.
4. Mekanisme korosi pada pengaruh NaCl.
5. Pengujian fatik siklus tinggi pada beban aksial.
6. Analisis perambatan retak pada daerah Paris-Erdogan.

D. Sistematika Penulisan

Adapun penulisan tugas akhir disusun menjadi lima bab, sistematika penulisannya adalah sebagai berikut, yaitu:

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah dan sistematika pembuatan laporan tugas akhir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan literatur berisikan: logam aluminium, mekanisme korosi Fatik, pengujian mekanik dan perambatan retak.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian meliputi hal-hal yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian, seperti lokasi penelitian, data penelitian, peralatan, prosedur pengujian, dan diagram alir penelitian.

IV. PEMBAHASAN

Pembahasan berisi temuan penelitian yang dilakukan dan data yang diperoleh setelah melaksanakan pengujian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Setelah menguji dan membahas dapat ditarik simpulan dengan memberikan hasil akhir yang diperoleh dan saran untuk perbaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Referensi yang disertakan guna membantu penyusunan tugas akhir ini.

LAMPIRAN

Memuat hal-hal pendukung untuk menunjang penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Logam Aluminium

Pada tahun 1884 aluminium merupakan benda yang jarang ditemui karena langka dan berharga, ditahun tersebut aluminium yang memiliki berat 6 pon mempunyai bentuk setengah lingkaran yang diletakkan di sisi puncak *Monument of Washington* yang berada di negara Amerika dan sampai saat ini masih bertahan. Akan tetapi, 100 tahun kemudian hingga saat ini aluminium menjadi benda yang paling populer digunakan di segala penjuru dunia setelah besi. Pada saat ini, semua paduan aluminium masih tetap dilakukan penelitian oleh banyak industri di dunia dengan menggabungkan unsur-unsur lain seperti magnesium (Mg), tembaga (Cu), mangan (Mn), besi (Fe), dan lain-lainnya sehingga dapat membentuk paduan yang baru. Paduan baru yang tercipta tersebut memiliki karakteristik dan sifat yang tidak sama. Pada saat ini aluminium merupakan jenis logam kedua setelah besi yang sering digunakan diberbagai sektor industri yang ada dipenjuru dunia. Adapun contoh aluminium murni dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Logam aluminium murni (Packard, 2017).

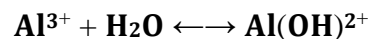
B. Perilaku Korosi Paduan Aluminium Seri 7XXX

Aluminium dengan cepat pasif pada suhu kamar dalam milidetik paparan lingkungan pengoksidasi seperti air atau udara untuk membentuk lapisan (*film*) oksida pelindung dengan tebal 2-4 nm, dengan ketebalan tergantung pada suhu (Reboul & Baroux, 2011). Paduan ini sangat rentan terhadap korosi dalam larutan yang mengandung klorida seperti air laut, karena ion klorida dalam larutan dapat dengan cepat memecah daerah yang lebih tipis dari lapisan pasif, menyebabkan korosi lubang di daerah lokal.

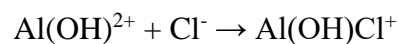
Mekanisme pemecah *film* adalah mekanisme utama inisiasi lubang korosi dalam larutan yang mengandung klorida pH hampir netral. Mekanisme pemecahan *film* menyatakan bahwa ion klorida menyerap dan melemahkan *film* pasif, diikuti oleh ion Cl^- dan H^+ bereaksi dengan substrat yang mendasarinya, pada akhirnya mengarah ke korosi lubang dan penurunan pH selanjutnya di dalam lubang karena konsentrasi aluminium yang tinggi dari produk sampingan korosi (McCafferty, 2003). Reaksi kimia yang dapat terjadi menyebabkan pembubaran logam aluminium dijelaskan di bawah ini. Konsentrasi ion klorida, aluminium bereaksi dengan air dalam larutan untuk membentuk H^+ dan Al_2O_3 .



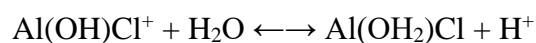
Untuk konsentrasi klorida pada atau di atas 1M,



Dalam hal ini, aluminium hidroksida kemudian akan bereaksi dengan klorida.



Selanjutnya, senyawa klorida akan bereaksi dengan air untuk menghasilkan keasaman local.



Struktur dan kimia presipitat mempengaruhi perilaku korosi dalam paduan 7XXX. Pengamatan tomografi berkas ion terfokus dalam endapan paduan 7075

menunjukkan bahwa endapan yang lebih besar terbentuk pada batas butir dan inklusi daripada dalam paduan bagian besar karena mereka adalah tempat heterogen dengan penurunan energi aktivasi untuk endapan nukleasi selama pengerasan perlakuan panas. Pertemuan batas butir dan inklusi dapat berfungsi untuk membentuk endapan yang jauh lebih besar dari bagian besar di sekitarnya, yang mengarah ke area potensial elektrokimia yang berbeda secara signifikan, zona bebas endapan yang lebih luas, dan lapisan pasif yang melemah di mana korosi dapat terjadi pada tingkat yang jauh lebih tinggi daripada butir di sekitarnya (Ralston et al., 2010).

C. Mekanisme Korosi Fatik

Paduan Al 7075 rentan terhadap kerusakan oleh korosi lubang yang dapat mengurangi ketahanan fatik. Interaksi lokal dari matriks dengan partikel inklusi Mg_2Si anodik atau inklusi katodik Al_7Fe_2Cu partikel di area *film* pasif yang melemah juga berfungsi untuk mempercepat korosi lokal, menyebabkan pembentukan lubang dan pengurangan umur fatik (Burns et al., 2010).

Sebagian besar penelitian tentang korosi fatik telah memeriksa menggunakan teknik pengukuran massal seperti extensometer untuk mengukur pertumbuhan retakan, diikuti oleh *fractography*. Mekanisme korosi fatik diyakini didominasi oleh adsorpsi hidrogen di ujung retakan selama pembebanan siklik menyebabkan pengeluaran dislokasi dan menaikkan pembelahan retak lokal. Inklusi dalam paduan aluminium memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perilaku fatik. Kemurnian paduan aluminium dapat memiliki efek signifikan pada kekuatan fatik dan ketangguhan patah.

Sebagian penelitian korosi lubang di Al 7075 menggunakan metode dua dimensi, seperti pengukuran luas lubang pada permukaan yang terkorosi kedalaman melalui pemeriksaan permukaan patah. Upaya untuk mengukur efek struktur lubang fatik, seperti SEM dari permukaan patah dan analisis *confocal microscopy* dari lubang korosi, telah menunjukkan bahwa bentuknya lubang korosi mempengaruhi umur inisiasi retak fatik (Huang et al., 2014).

D. *Anodic Dissolution*

Anodic dissolution adalah mekanisme korosi paduan dalam larutan yang terjadi oleh perpindahan ionik antara elemen konduktif dari potensi korosi yang berbeda di paduan terendam. *Anodic dissolution* adalah sangat mungkin dalam larutan NaCl karena ion Cl⁻ diyakini dapat melemahkan atau mengganggu *film* aluminium oksida dan memungkinkan reaksi matriks dengan ion agresif dalam larutan melalui mekanisme *Anodic dissolution*. Ketika gaya diterapkan, *Anodic slip dissolution* dapat terjadi karena tegangan menyebabkan *slip*, yang memecahkan *film* pasif di ujung retak dan lebih lanjut menyediakan akses ion korosif ke permukaan logam (Newman & Healey, 2007).

E. Pengaruh Lubang pada Fatik Aluminium 7075

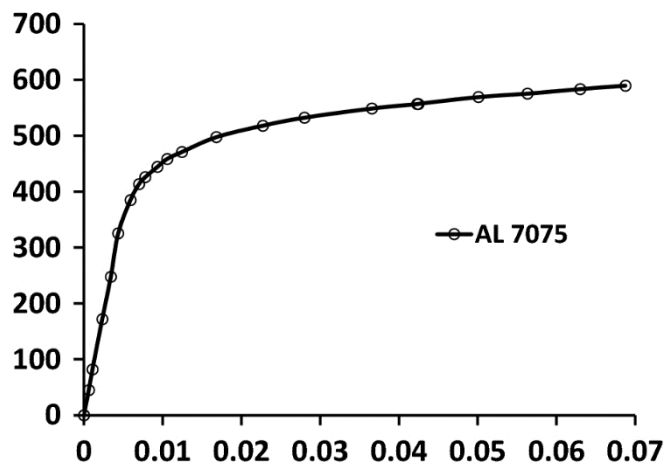
Paduan 7XXX rentan terhadap kerusakan oleh korosi lubang yang dapat mengurangi umur fatik bahan. Sebagian besar penelitian tentang efek korosi lubang pada pertumbuhan retak di Al 7075 telah menggunakan metode dua dimensi seperti pengukuran optik, *confocal microscopy*, dan *scanning electron microscopy* untuk mempelajari kerusakan. Hal untuk mengukur efek struktur lubang pada fatik, seperti pasca-mortem *scanning electron microscopy* (SEM) dari permukaan patah dan analisis mikroskop *confocal* kerusakan (Co & Burns, 2017), telah menyatakan bahwa bentuk kerusakan korosi mempengaruhi umur inisiasi retak fatik lebih dalam dari kerusakan korosi. Analisa lubang *cross-sectional* dan fraktografi dari inisiasi korosi fatik dari paduan aluminium terkorosi telah menyatakan bahwa tonjolan di daerah lubang yang terlokalisir dapat menyebabkan daerah dengan tekanan yang cukup untuk menciptakan plastisitas lokal di ujung lubang dengan demikian memulai retakan dalam siklus yang lebih sedikit. Tonjolan lokal ini dapat dikaitkan dengan bentuk produk korosi. Beberapa tempat inisiasi retak fatik telah diamati dari fraktografi paduan aluminium korosi lubang, yang berarti adanya beberapa lubang dapat menyebabkan aktivitas sinergis antara lubang di inisiasi retak. Kerusakan korosi adalah tempat inisiasi retak fatik disebabkan konsentrasi tegangan oleh morfologi kerusakan korosi (Crawford et al., 2014).

F. Pengujian Mekanik

Pengujian mekanik memiliki tujuan yang berguna untuk mengenal karakter yang terdapat dalam baja yang mampu dinyatakan dalam kekuatan fatik dan kekerasan, ketahanan aus, tarik-tekan untuk dapat menentukan bahwa baja bisa dipergunakan dalam pengaplikasian yang sesuai dan tepat. Dalam penelitian ini, pengujian mekanik yang dilakukan merupakan pengujian tarik dan pengujian fatik.

1. Pengujian Tarik

Pengujian tarik yang dilaksanakan berupaya agar dapat mengetahui dari kekuatan tarik bahan. Hal tersebut bisa ditentukan melalui cara menarik bahan hingga bahan tersebut putus disaat kondisi dari kecepatan penarikan yang tepat dan sesuai dengan standar pengujian (ASTM E8, 2014). Hasil dari pengujian tarik bisa digambarkan dalam bentuk grafik tegangan-regangan layaknya yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva tegangan regangan aluminium 7075 (Kadkhodayan & Maarefdoust 2014).

Kekuatan dari tarik bahan mampu diturunkan pada hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2, sebagai berikut.

a. Tegangan luluh (*yield strength*)

Tegangan luluh (σ_{ys}) merupakan kondisi perubahan pada bahan dari deformasi elastis sampai mulai mencapai deformasi plastis. Disaat mencapai titik ini, bahan yang diuji mulai mengalami deformasi plastis.

b. Tegangan maksimum (*ultimate strength*)

kekuatan tarik maksimum (σ_u) yang dihasilkan dari hasil membagi beban maksimum (P_{maks}) dengan memiliki luas penampang awal (A_0). Besarnya kekuatan dari tarik maksimum mampu ditetapkan melalui melihat dari kurva tegangan-regangan. Kekuatan tarik maksimum mampu didapatkan dari persamaan yang terdapat dibawah ini.

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

Dimana :

σ_u = Kekuatan tarik maksimum (MPa).

P_{maks} = Beban maksimum (N).

A_0 = Luas penampang awal (mm^2).

Sifat mekanik yang ada berikutnya yaitu merupakan kekuatan luluh (σ_y). Tegangan yang diperlukan demi menciptakan deformasi plastis yang diterapkan disebut dengan kekuatan luluh. Kekuatan luluh mampu didapatkan melalui cara membagi beban luluh (P_y) dengan luas penampang awal (A_0) seperti yang dituliskan dipersamaan yang terdapat di bawah ini.

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

Dimana :

σ_y = Kekuatan luluh (MPa).

P_y = Beban luluh (N).

A_0 = Luas penampang awal (mm^2).

2. Pengujian Fatik

Fatik merupakan suatu kerusakan pada bahan karena terdapat tegangan yang berubah dan fluktuatif dimana besarnya lebih kecil dari pada tegangan tarik maksimum serta tegangan luluh bahan yang diberikan

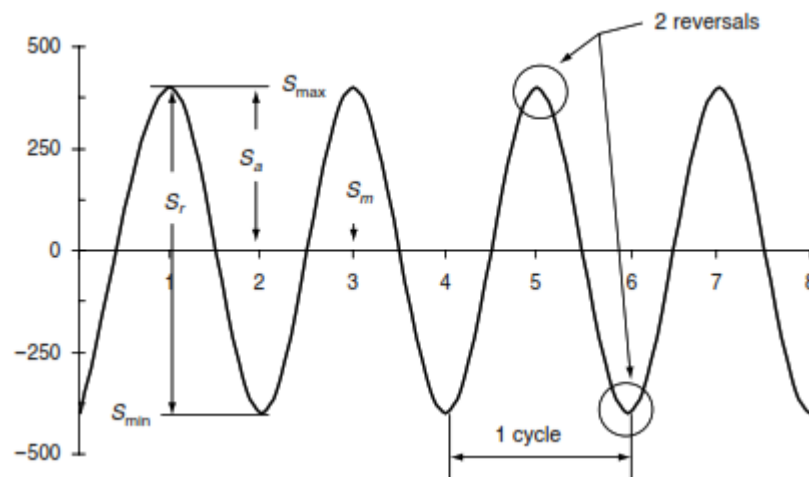
beban konstan. Selama pengujian fatik, benda uji dikenai beban berulang sampai patah. Beban yang diterapkan pada spesimen ditentukan oleh konstanta rentang tegangan (S_r) atau amplitudo tegangan konstan (S_a). Rentang tegangan didefinisikan sebagai perbedaan antara tegangan maksimum (S_{maks}) dan tegangan minimum (S_{min}) dalam satu siklus.

$$S_a = S_{maks} - S_{min} \dots \dots \dots (3)$$

Amplitudo tegangan sama dengan setengah dari rentang tegangan.

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{maks} - S_{min}}{2} \dots \dots \dots (4)$$

Pada analisa fatik untuk tegangan tarik bernilai positif dan tegangan tekan negatif. Jumlah siklus untuk kegagalan adalah umur fatik (N_f), dan setiap siklus sama dengan ($2N_f$). Simbol tegangan dan siklus yang disebutkan sebelumnya diilustrasikan dalam gambar 3.



Gambar 3. Simbol dalam siklus gaya siklik (Yung-li Lee, et. al., 2005).

Pengujian fatik S–N menunjukkan bahwa pembebanan rata-rata nol. Tegangan rata-rata (S_m) didefinisikan sebagai.

$$S_m = \frac{S_{maks} + S_{min}}{2} \dots \dots \dots (5)$$

Beberapa parameter, rasio tegangan (R) dan rasio amplitudo (A), sering digunakan sebagai representasi dari tegangan rata-rata yang diterapkan

pada suatu obyek. Rasio tegangan didefinisikan sebagai rasio tegangan minimum terhadap maksimum menyatakan.

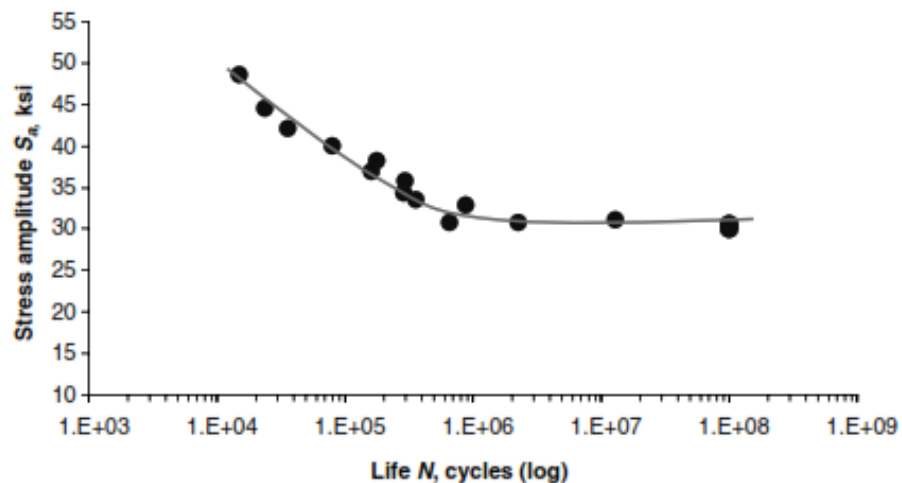
$$R = \frac{S_{min}}{S_{maks}} \dots \dots \dots (6)$$

Merupakan rasio amplitudo tegangan terhadap tegangan rata-rata.

$$A = \frac{S_a}{S_m} = \frac{1-R}{1+R} \dots \dots \dots (7)$$

Data uji fatik diplot pada semilog atau koordinat log-log. Gambar 4. menunjukkan data fatik Aluminium diplot pada koordinat semilog. Pada gambar ini, kurva tunggal yang mewakili data tersebut disebut kurva S–N atau kurva Wöhler. Ketika diplot pada log– log skala, kurva menjadi linier. Bagian dari kurva atau garis dengan kemiringan negatif disebut wilayah *finite life* dan garis horizontal adalah wilayah *infinite life*.

Titik kurva S–N ini di mana kurva berubah dari kemiringan ke garis horizontal disebut *knee* kurva S-N dan mewakili batas fatik atau batas daya tahan. Batas fatik adalah fenomena dimana nukleasi retak diikuti oleh yang batas butir pertama atau penghalang mikro struktur yang dominan. Hal ini bisa berlebihan dengan menerapkan beberapa kelebihan beban atau dalam lingkungan korosif.



Gambar 4. Data fatik *bending* (Yung-li Lee, et. al., 2005).

Saat membuat grafik log-log dari tegangan yang diterapkan versus umur fatik dari uji fatik S–N, koordinat y merupakan tegangan amplitudo atau rentang tegangan dan koordinat x merupakan jumlah siklus kegagalan. Umur fatik dihitung pada waktu yang dibutuhkan untuk tumbuh retakan kecil hingga panjang retakan menjadi terlihat. Persamaan 8 mewakili tipikal kurva S–N.

$$S_a = S_f'(2N_f)^b \dots\dots\dots (8)$$

Dimana b adalah eksponen kekuatan fatik, dan S_f' adalah koefisien kekuatan fatik. Persamaan ini dikembangkan dari grafik S-N dimana persamaan yang banyak digunakan (dikenal sebagai relasi Basquin).

Pendekatan *stress-life* mengacu pada penggunaan siklus tegangan nominal (S) versus umur fatik. Penentuan tegangan nominal tergantung pada pembebanan dan konfigurasi spesimen. mode pembebanan yang umum adalah bending (M), gaya aksial (P), atau torsi (T). Beban ini dapat dikaitkan dengan tegangan nominal dengan menggunakan rumus tegangan. Misalnya, persamaan yang sudah dikenal ini.

$$S = \frac{Mc}{I} \dots\dots\dots (9)$$

untuk bending (M).

$$S = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (10)$$

untuk beban aksial (P).

$$S = \frac{Tr}{J} \dots\dots\dots (11)$$

untuk torsi T.

Pada Kurva S–N spesimen material harus standar halus, untuk komponen struktural manufaktur individu atau untuk struktur lengkap. Spesimen standar halus bisa datar atau silindris dengan permukaan yang dipoles untuk meminimalkan efek kekasaran permukaan. Kurva S–N memberikan data fatik pada geometri tertentu, kondisi pembebanan, dan pemrosesan

material untuk digunakan dalam analisis umur fatik dan kekuatan berikutnya.

Data ini dapat disesuaikan untuk memperhitungkan kondisi komponen yang realistis seperti takik, ukuran, permukaan akhir, perawatan permukaan, suhu, dan berbagai jenis beban. Selain dari pengujian, tidak ada dasar rasional untuk menentukan faktor koreksi ini., keterbatasan metode S–N ialah tidak mampu memprediksi *local plasticity* serta efek dari tegangan rata-rata. Fatik sendiri memiliki tiga tahapan yakni dijelaskan dibawah ini (Kaharuddin Adam, 2011).

a. *Crack Initiation* (Awal Retak)

Mekanisme fatik diawali dari tahap *crack initiation* yang terjadi pada permukaan bahan yang tidak kuat atau pada tempat yang terjadi konsentrasi tegangan di permukaan seperti lubang, *notch* dan goresan.

b. *Crack Propagation* (Perambatan Retak)

Keseluruhan jumlah dari total siklus yang dapat membuat kegagalan *fracture* adalah penjumlahan mengenai jumlah siklus yang membuat retakan awal serta fase selanjutnya yakni perambatannya. *Initiation Crack* ini lalu berkembang menjadi *microcracks*. Perambatan ataupun kombinasi *microcracks* ini selanjutnya mampu membentuk *macrocracks* lalu berakhir pada *failure*.

c. *Fracture* (Patah)

Suatu proses akhir dari kerusakan yang terdapat distruktur saat mengalami pembebanan, sehingga struktur itu mengalami kegagalan adalah *fracture*. Pada saat terjadinya proses perambatan retak, penampang yang ada pada komponen atau bagian tersebut akan berkurang. Hingga disaat kondisi dimana penampang yang terdapat dibagian tersebut tidak bisa menahan beban. Pada saat, terjadinya proses tahap ini perambatan retak yang terjadi dengan waktu yang sangat singkat dan cepat sehingga struktur akan pecah terbagi menjadi dua perambatan yang cepat ini sering dikatakan dengan *fast fracture*. Perpatahan yang terjadi saat bahan sudah mengalami siklus tegangan dan regangan dengan menghasilkan kerusakan secara permanen.

G. Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak merupakan tahapan kedua dari ketiga tahapan proses kerusakan/kegagalan. Pada tahapan ini, retak tumbuh serta merambat sampai mencapai batas kritis (*critical size*). Dari data mengenai perambatan retak suatu perkiraan usia fatik (*fatigue life*) mampu dikembangkan.

Merujuk konsep *fracture mechanics*, laju dari pertumbuhan retak dijelaskan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat bahan, tegangan operasi dan panjang retak. Melalui persamaan Paris-Erdogan dapat diinterpretasikan bahwa laju perambatan retak sebagai berikut.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \dots\dots\dots (12)$$

Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan.

C = Konstanta Bahan.

m = Nilai Eksponensial.

Laju dari perambatan retak adalah kegunaan dari faktor pada intensitas tegangan. Retak mulanya berawal dari bidang sangat rapuh, selanjutnya berkembang bersamaan dengan berjalannya siklus pembebanan. Pada suatu percobaan lazimnya perambatan retak mampu diukur dengan visual menggunakan teleskop serta dapat diukur menggunakan alat ultrasonik. Pertumbuhan retak merupakan suatu perubahan panjang retak terhadap siklus. Jika, disaat panjang retak a di plot dengan siklus N , maka dapat ditunjukkan pada gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5. Kurva pertumbuhan retak fatik (Barsom & Rolfe, 1999).

Dengan asumsi bahwasanya panjang retak a pada suatu panjang konstan dan serta hanya tegangan yang bervariasi. Hal tersebut ditunjukkan untuk suatu kalibrasi K sederhana.

$$K = S\sqrt{a} \dots \dots \dots (13)$$

Dimana :

K = Faktor intensitas tegangan.

S = Tegangan (MPa).

a = Panjang retak (mm).

$$\Delta K = \Delta S\sqrt{a} \dots \dots \dots (14)$$

Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan.

ΔS = Selisih tegangan (MPa).

a = Panjang retak (mm).

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{A}\sqrt{a} \dots \dots \dots (15)$$

Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan.

ΔP = Range beban (MPa).

A = Penampang (mm^2).

a = Panjang retak (mm).

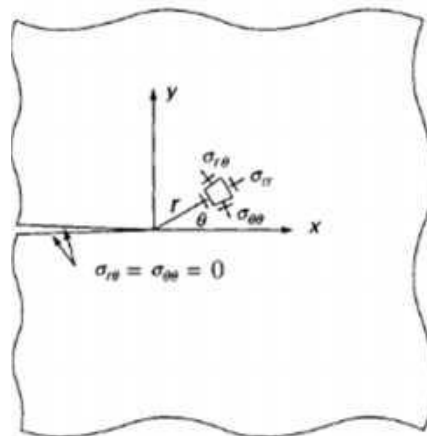
Guna memprediksi usia fatik dalam suatu bagian yang mempunyai cacat ataupun ketidak-sempurnaan maka didalam konsep rnekanika retakan (*fracture mechanics*) dikembangkan serta dipakai secara luas baik secara eksperimen, *numeric* dan analitis.

Pada saat melakukan evaluasi suatu struktur yang mempunyai ketidaksempurnaan atau cacat, yang menjadi salah satu dari pendekatannya dengan memperkirakan usia dari perambatan retak. Pada kasus fatik, bahwa digunakan metode *linear elastic fracture mechanics* (LEFM). Perihal seperti ini dikarenakan kasus fatik terjadi disaat keadaan elastis. Akan tetapi, konsep mekanika retakan dapat digunakan pada keadaan plastis dengan menggunakan metode *elastic plastic fracture mechanics* (EPFM).

1. Faktor Intensitas Tegangan

pada *Linear Elastic fracture mechanics* (LEFM), umur atau ketangguhan yang merupakan komponen dari pertumbuhan retak dispesifikan melalui suatu parameter yang dikatakan dengan *stress intensity factor*, KI. Nilai K mengemukakan suatu ukuran dari besaran medan konsentrasi tegangan diarea sekitar ujung retak.

Anggap jika suatu struktur yang mempunyai retak dikenai tegangan tarik yang tegak lurus didaerah retak. Seperti yang ada digambar 6. tegangan yang terjadi diujung retak ialah sebagai berikut.



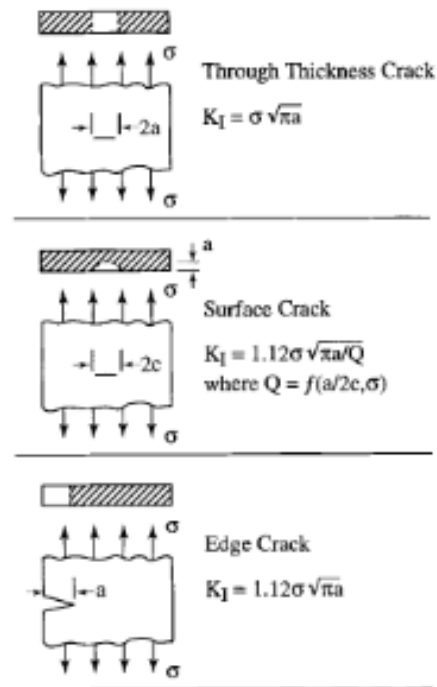
Gambar 6. Komponen tegangan.

$$sx = \frac{KI}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{q}{2} \left[1 - \sin \frac{q}{2} \sin \frac{3q}{2} \right] \dots\dots\dots(18)$$

$$sy = \frac{KI}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{q}{2} \left[1 + \sin \frac{q}{2} \sin \frac{3q}{2} \right] \dots\dots\dots(19)$$

$$tsy = \frac{KI}{\sqrt{2pr}} \sin \frac{q}{2} \cos \frac{q}{2} \cos \frac{3q}{2} \dots\dots\dots(20)$$

Faktor *stress intensity* adalah KI yang merupakan kegunaan dari panjang retak serta tegangan. Akan tetapi memiliki macam-macam variasi terhadap jenis-jenis retak serta beban pada seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.

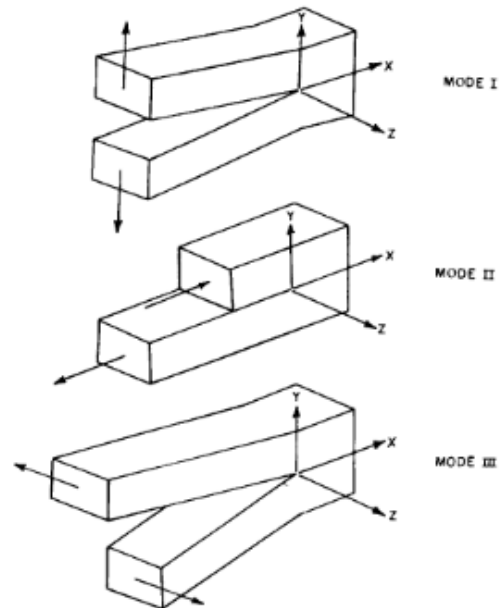


Gambar 7. Nilai K_I untuk macam geometri retak (Barsom & Rolfe, 1999).

2. Fracture Toughness

Nilai ketangguhan material merupakan sifat ketangguhan bahan didalam menahan laju retakan. Sifat material pada suatu keadaan statis yang dapat dinyatakan sebagai *ultimate strength* atau *yield strength*. Gambaran terpenting dalam memperkirakan laju retak yang memiliki kaitan untuk perkiraan usia fatik, nilai K_{IC} memiliki tujuan melakukan evaluasi dari ketahanan retak dengan menggunakan cara melakukan perbandingan nilai K_I serta nilai K_{IC} . Dimana nilai K_I berada jauh dari K_{IC} maka dapat dinyatakan bahwa suatu konstruksi masih dapat dikatakan aman. Namun, jika terjadi sebaliknya saat nilai K_I mendekati nilai K_{IC} maka dapat dinyatakan suatu konstruksi akan mengalami patah/gagal. Terdapat tiga

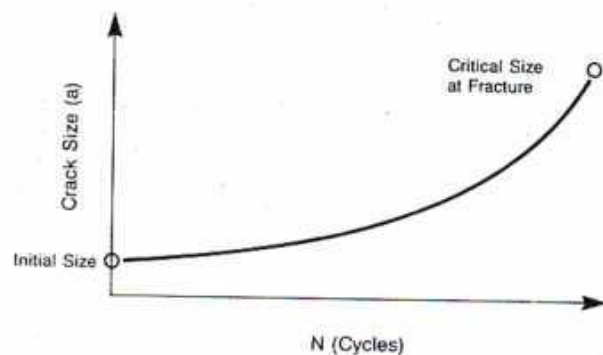
modus pergeseran permukaan patah yaitu modus I (tarikan), modus II (geseran) dan modus III sebagai robekan seperti ditampilkan pada Gambar 8 sebagai berikut.



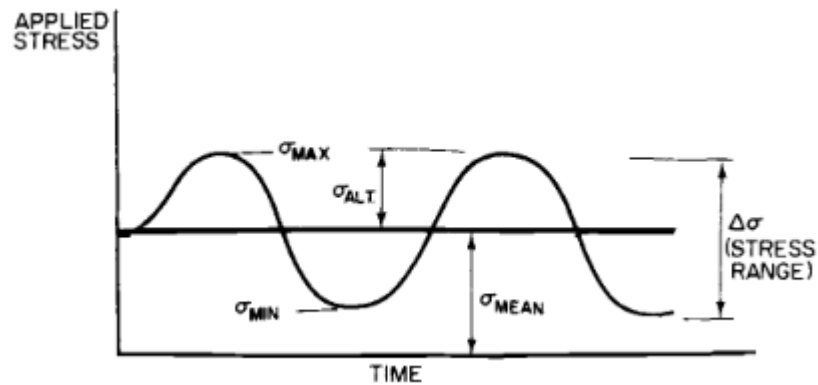
Gambar 8. Modus pergeseran permukaan retak (Barsom & Rolfe, 1999).

3. *Fatigue Crack Growth*

Untuk bisa memprediksi laju pertumbuhan retak maka dibutuhkan data laju pertumbuhan retak dari bahan yang diuji secara fatik, seperti yang ditampilkan pada Gambar 9 dan 10 sebagai berikut.



Gambar 9. Skematik laju pertumbuhan retak (Huang Lin, 2011).



Gambar 10. Beban fatik pada perambatan retak (Barsom & Rolfe, 1999).

Patah terjadi disaat panjang retak yang kritis dimana bahan tidak mampu dan tidak dapat lagi menahan beban yang didapatkan. Patah dapat terjadi saat nilai ketangguhan retak (*fracture toughness*) K_{Ic} material tercapai. berarti nilai $K_I = K_{Ic}$,

H. Metode Perhitungan Perambatan Retak

Metode yang akan digunakan pada penelitian ini ialah *Incremental Polynomial Method*. Metode ini dipakai guna menghitung da/dN dengan pendekatan polinomial. Perhitungan perambatan retak yaitu pada retak sisi tunggal spesimen uji fatik yang berada pada tepi takik. Untuk menghitung intensitas tegangan yang sesuai dengan tingkat pertumbuhan retak sisi tunggal menghitung ΔK sebagai berikut.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} (0,866 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \dots(16)$$

Dimana :

ΔK = Faktor intensitas tegangan.

ΔP = Perubahan beban (kN).

B = Tebal (mm).

w = Lebar (mm).

α = ar/W .

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat Penelitian

Spesimen tarik dan fatik diproduksi di Pusat Pendidikan dan Pelatihan Teknik (VEDC) di Malang, Jawa Timur. Sedangkan spesimen retak diproduksi di PT. Teknik Perkasa Abadi Tangerang Selatan. Kemudian uji korosi, uji tarik statis, uji retak, dan uji fatik siklus tinggi dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

B. Bahan dan Peralatan

Adapun bahan dan peralatan penelitian yang dipakai adalah sebagai berikut.

1. Bahan Penelitian

Adapun bahan dan dimensi spesimen uji yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah.

a. Aluminium 7075-T7

Material yang digunakan yaitu Aluminium 7075-T7 berbentuk silinder yang memiliki dimensi berdiameter 20 mm dan panjangnya 1000 mm. Spesimen uji seperti yang ditampilkan pada gambar 11.



Gambar 11. Aluminium 7075-T7.

b. NaCl PA

Natrium klorida, juga dikenal sebagai garam meja, adalah senyawa kimia dengan rumus molekul NaCl, yang mewakili rasio 1:1 ion natrium dan klorida, seperti yang ditampilkan pada gambar 12.



Gambar 12. NaCl untuk laboratorium.

c. Aquades

Air suling murni digunakan sebagai pelarut cairan dan membersihkan spesimen, seperti yang ditampilkan pada gambar 13.



Gambar 13. Aquades.

d. Etanol

Etanol digunakan untuk membersihkan spesimen, seperti yang ditampilkan pada gambar 14.



Gambar 14. Etanol.

2. Peralatan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

a. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Mesin ini adalah alat yang dipakai dalam pengujian tarik statis serta fatik. Mesin yang dipakai mampu menampung beban hingga 100 kN. Mesin ini dapat digunakan di Laboratorium Teknik Material Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Seperti yang ditampilkan pada gambar 15.



Gambar 15. Mesin MTS *Landmark* 100 kN.

b. Mikroskop Optik

Mikroskop optik dipakai untuk melihat dan mengamati bentuk morfologi perambatan retak pada spesimen uji retak, seperti yang ditampilkan pada gambar 16.



Gambar 16. Mikroskop dinolite.

c. *Vernier Calliper*

Ini adalah *Vernier Calliper* dengan presisi 0.1mm yang digunakan untuk mengukur diameter dan tebal spesimen uji, seperti yang ditampilkan pada gambar 17.



Gambar 17. *Vernier calliper*.

d. Selang Silikon dan penjepit selang

Adapun digunakan untuk membungkus spesimen dari cairan korosi, seperti yang ditampilkan pada gambar 18.



Gambar 18. Selang silikon dan penjepit.

e. Timbangan Digital

Adapun digunakan untuk mengukur pengujian korosi, seperti yang ditampilkan pada gambar 19.



Gambar 19. Timbangan digital.

f. Gelas Kimia

Adapun digunakan untuk wadah pengujian korosi, seperti yang ditampilkan pada gambar 20.



Gambar 20. Gelas kimia.

g. *Ultrasonic Cleaner*

Adapun digunakan untuk membersihkan spesimen dengan getaran, seperti yang ditampilkan pada gambar 21.



Gambar 21. *Ultrasonic cleaner.*

h. *Stirer*

Adapun digunakan untuk memutar larutan sebesar 600rpm atau setara 10Hz, seperti yang ditampilkan pada gambar 22.



Gambar 22. *Stirer.*

C. Prosedur Pengujian

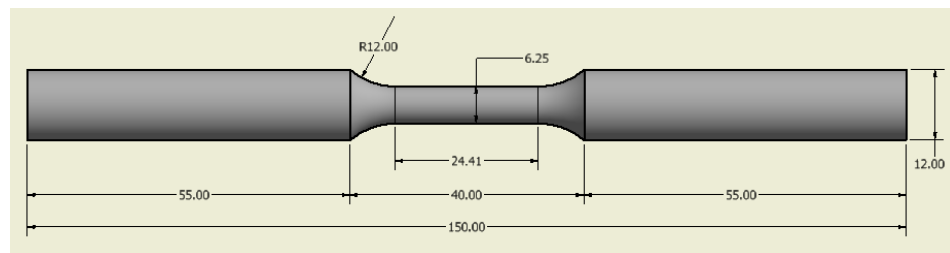
Adapun prosedur penelitian tugas akhir ini, yaitu sebagai berikut.

1. Persiapan Spesimen Uji

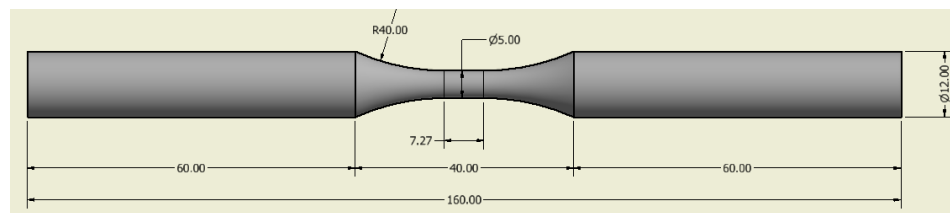
Material yang digunakan untuk tugas akhir ini adalah aluminium 7075-T7 berbentuk silinder.

2. Pembuatan Spesimen Uji

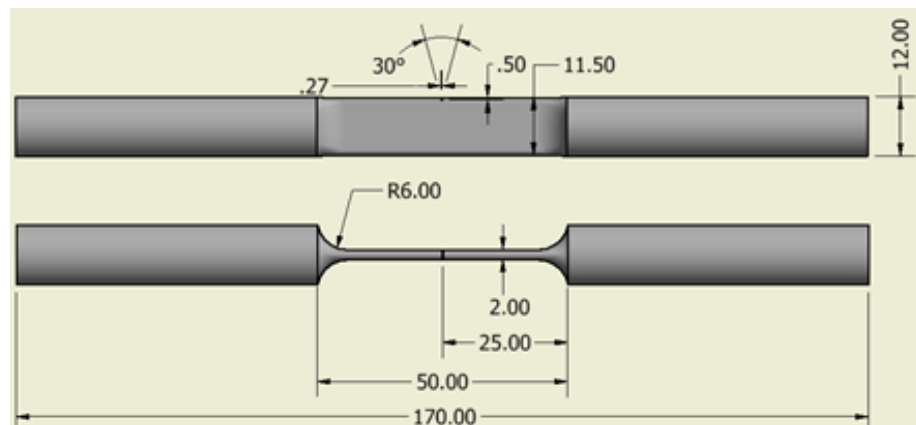
Paduan aluminium 7075-T7 berdiameter 20 mm untuk dibuat spesimen uji tarik, uji fatik, uji retak dan uji korosi. Seperti yang ditampilkan pada gambar 23,24,25 dan 26 sebagai berikut ini.



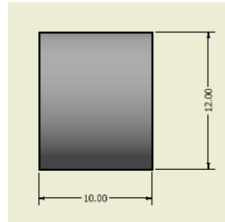
Gambar 23. Dimensi spesimen uji tarik standar ASTM E8.



Gambar 24. Dimensi spesimen uji fatik siklus tinggi standar ASTM E466.



Gambar 25. Dimensi spesimen uji retak standar ASTM E647.



Gambar 26. Dimensi spesimen uji korosi standar ASTM G31-72.

3. Pengujian Korosi

Prosedur pengujian korosi larutan air laut (NaCl 3,5%) dengan tahapan-tahapan berikut ini.

- a. Spesimen pengujian korosi disiapkan.
- b. Larutan pengujian korosi disiapkan.

Pada penelitian ini, langkah-langkah yang diperlukan untuk menyiapkan larutan uji berupa NaCl 3,5% adalah sebagai berikut:

- 1) 200 ml aquades dimasukkan ke dalam gelas kimia.
- 2) NaCl seberat 7,0354 gr ditimbang.
- 3) NaCl seberat 7,0354 gr dimasukkan ke dalam gelas beker dengan *stirer* yang berputar.
- 4) Larutan NaCl diputar dengan *stirer* selama 5 menit.
- c. Sebanyak 5 spesimen Aluminium ditimbang massa awalnya menggunakan timbangan digital.
- d. Spesimen diikat dengan tali nilon supaya melayang di larutan.
- e. Spesimen dimasukan larutan NaCl yang telah disediakan dalam waktu hampir bersamaan.
- f. Putaran *stirer* diatur ke 600 rpm atau setara dengan 10 Hz.
- g. Kemudian spesimen diambil dalam jangka waktu kurang dari 168 jam (1 minggu).
- h. Spesimen dibersihkan menggunakan *ultrasonic cleaner* dengan cairan aquades dan juga alkohol.
- i. Spesimen dibersihkan dengan tisu hingga tidak basah.

- j. Selanjutnya spesimen dikeringkan dengan menggunakan *hair dryer* sampai tidak ada cairan.
- k. Setelah itu spesimen ditimbang kembali dan perubahan berat dicatat.

Dari uji korosi yang dilaksanakan didapatkan hasil berupa data yang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Data hasil uji korosi

No	Nama	Satuan
1	Luas Penampang (A)	cm ²
2	Berat Awal (W ₀)	gr
3	Berat Akhir (W ₁)	gr
4	Waktu (T)	Jam
5	Laju Korosi (CR)	mpy

4. Pengujian Tarik Statis

Pengujian ini dilakukan sebanyak 1 kali untuk mendapatkan data nilai tegangan maksimum (σ_{uts}) aluminium 7075-T7. Uji tarik ini dilaksanakan dengan menggunakan mesin MTS Landmark 100 kN. Prosedur uji tarik yang dilaksanakan adalah sebagai berikut.

- a. Spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar ASTM E-8.
- b. Program *Controller 793B* dibuka selanjutnya, klik *manual command*, lalu pilih *displacement mode*, kemudian naikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Spesimen dipasangkan pada *crosshead grip* atas yang kemudian spesimen dicekam.
- d. *Crosshead* diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
- e. *Manual command* dipilih dan klik *control mood* ke *force*.
- f. *Auto offset* dipilih untuk *force*. kemudian grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.

- g. *Software MTS Test Suite* (MPE) dibuka, kemudian pilih *template* untuk uji tarik statis.
- h. Data Panjang spesimen dimasukkan.
- i. *Initial speed* serta *secondary speed* dimasukkan.
- j. Semua data dimasukkan lalu menekan tombol *RUN*.
- k. Mesin akan berhenti secara otomatis.

Data yang diperoleh dari pengujian tarik yang dilaksanakan dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data hasil uji tarik

No	Nama	Satuan
1	Tensile Strength	Mpa
2	Yield Strength	Mpa

5. Pengujian Fatik Siklus Tinggi

Pengujian ini dilaksanakan tiga kali pengulangan pada setiap parameter ujinya. Hal ini bertujuan untuk mengukur kekuatan fatik aluminium 7075-T7. Prosedur pengujian yang dilaksanakan adalah sebagai berikut.

- a. Spesimen uji fatik disiapkan sesuai dengan standar ASTM E466.
- b. Selang silikon dan penjepit disiapkan juga larutan NaCl 3,5%.
- c. Memasang selang dan penjepit ke spesimen bagian bawah dengan jarak 5 mm dari bagian grip bawah.
- d. Larutan NaCl dimasukkan ke sepanjang selang.
- e. Tiga spesimen 24 jam, dan Tiga spesimen 48 jam ditunggu sebelum spesimen diuji fatik.
- f. Program *Controller 793B* dibuka selanjutnya, memilih *manual command*, kemudian pilih *displacement mode*, setelah itu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- g. Spesimen dipasang pada *cross head grip* atas spesimen yang dicekam.

- h. Kemudian *cross head* diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk kedalam grip bawah.
- i. *Manual command* dipilih setelah itu, klik *control mood* ke *force*.
- j. Selanjutnya klik *auto offset* untuk *force*. Kemudian *grip* bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- k. *Software MTS Test Suite* (MPE) dibuka, lalu pilih *template* untuk *high cycle fatigue testing*.
- l. Data P_{\max} dan P_{\min} dimasukkan dengan kondisi rasio regangan $R=-1$, frekuensi 10 Hz serta beban maksimum $60\% \sigma_{\text{uts}}$.
- m. *Initial speed* dan *secondary speed* (mm/s) dimasukkan, kemudian pilih *RUN*.
- n. Pengujian diulangi dengan parameter yang berbeda dilakukan seperti langkah sebelumnya.

Dari pengujian fatik siklus tinggi yang dilaksanakan didapatkan data hasil uji fatik yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data hasil uji fatik siklus tinggi

No	Nama	F_{\max}	F_{\min}	NF
1	TK1	kN	kN	Siklus
2	TK2	kN	kN	Siklus
3	TK3	kN	kN	Siklus
4	K1	kN	kN	Siklus
5	K3	kN	kN	Siklus
6	K6	kN	kN	Siklus
7	K2	kN	kN	Siklus
8	K4	kN	kN	Siklus
9	K5	kN	kN	Siklus

6. Pengujian Retak

Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung. Pengujian ini memiliki tujuan untuk mengukur perambatan retak pada aluminium 7075-T7 dan pengaruh korosi pada laju retak. Prosedur dalam pengujiannya adalah sebagai berikut.

- a. Spesimen uji retak disiapkan sesuai standar ASTM E-647.
- b. Mikroskop digital dikalibrasi dengan penggaris yang tersedia.
- c. Inisiasi retak tiap spesimen diukur menggunakan mikroskop digital.
- d. Selang silikon dan penjepit disiapkan juga larutan NaCl 3,5%.
- e. Selang dan penjepit dipasang ke spesimen bagian bawah dengan jarak 5 mm dari bagian grip bawah.
- f. Larutan NaCl dimasukkan ke sepanjang selang.
- g. Selama 60 jam ditunggu sebelum spesimen diuji retak.
- h. Program *Controller 793B* dibuka kemudian pilih *manual command*, selanjutnya pilih *displacement mode*, dan naikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- i. Spesimen dipasang pada *crosshead grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- j. *Crosshead* diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
- k. *Manual command* dipilih dan langkah selanjutnya pilih *control mood* ke *force*.
- l. *Auto offset* dipilih untuk *force*. Selanjutnya grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- m. *Software* MTS Test Suite (MPE) dibuka, lalu pilih *template* untuk *high cycle fatigue testing*.
- n. Data P_{maks} dan P_{min} , siklus total, *incremental cycles* dimasukkan untuk mengatur *stop* mesin secara otomatis pada setiap jumlah siklus tertentu dengan tujuan agar retak dapat diamati/diukur dengan menggunakan mikroskop digital *portable*.

- o. *Initial speed* serta *secondary speed*(mm/s) dimasukkan, lalu klik *RUN*.
- p. Mesin akan terhenti secara otomatis.
- q. Mengulangi langkah sebelumnya untuk pengujian *raw material*.

Dari pengujian retak yang dilaksanakan variabel data yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Data pengujian retak

No.	Rasio Beban (R)	P_{maks}	Frekuensi (Hz)	Korosi	NF	Panjang Retak
1	0,1		5	Korosi	Siklus	mm
2	0,1	40%	5	Korosi	Siklus	mm
3	0,1	σ_{uts}	5	Korosi	Siklus	mm
4	0,1		5	tanpa	Siklus	mm

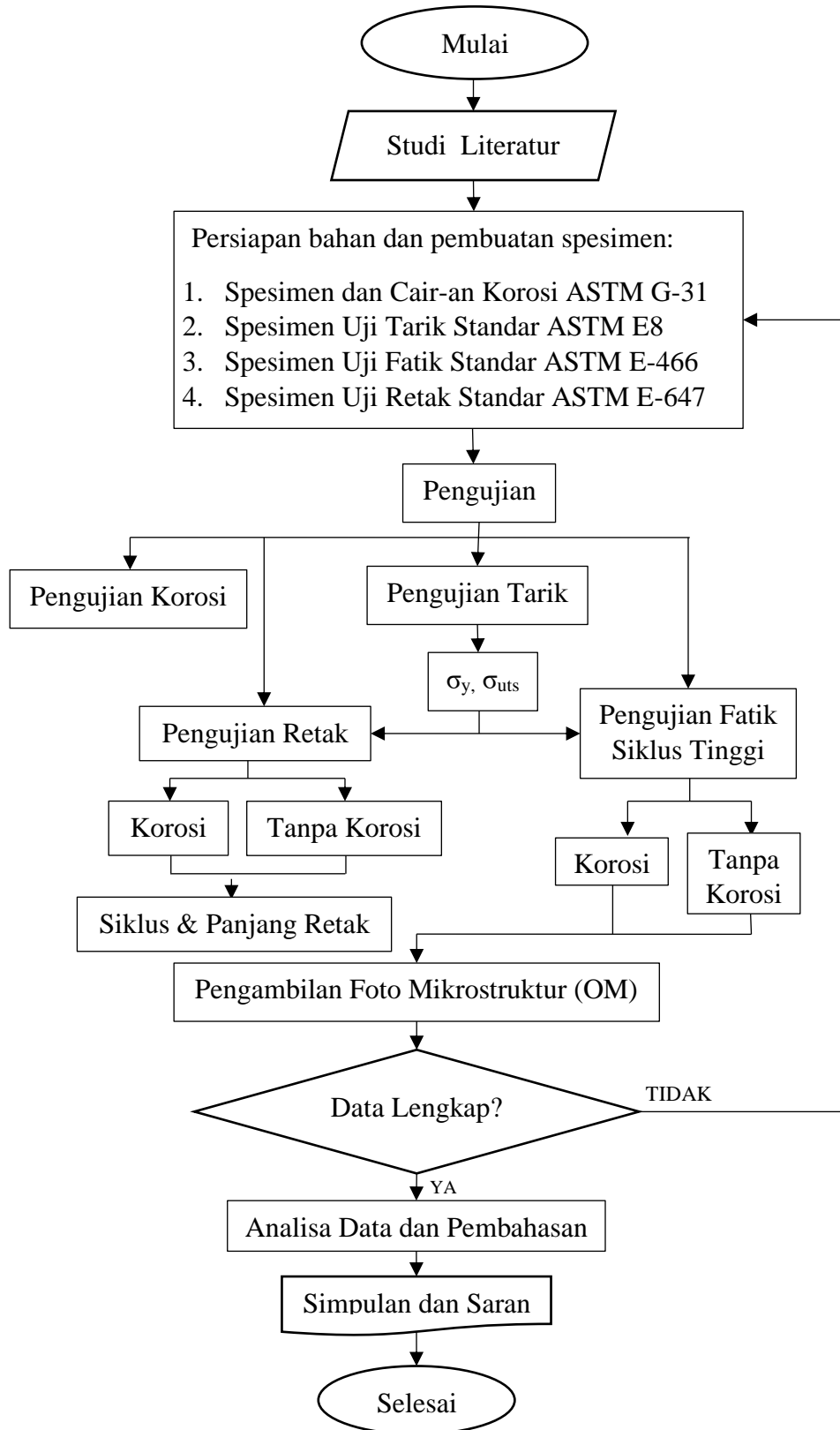
7. Pengamatan Fraktografi dan Struktur Mikro

Menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), fraktografi dan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui hasil patahan dan bentuk struktur mikro. Adapun Prosedur dalam pengujian adalah sebagai berikut.

- a. Spesimen fraktografi disiapkan dengan memotong hasil patahan sepanjang 10 mm. Kemudian diamati dengan mikroskop lalu memilih pembesaran setelahnya menyimpan hasil pembesaran.
- b. Spesimen struktur mikro disiapkan dengan memotong hasil patahan sepanjang 10 mm.
- c. Spesimen diletakkan pada cetakan lalu dituangkan resin.
- d. Spesimen diampas dari ukuran kasar sampai halus.
- e. Setelah spesimen halus dicelupkan ke dalam larutan etsa.
- f. Terakhir spesimen diamati dengan mikroskop lalu memilih pembesaran setelahnya menyimpan hasil pembesaran.

D. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 27.



Gambar 27. Diagram alir penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Adapun simpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Hasil pengujian fatik aluminium menunjukkan bahwa perlakuan korosi NaCl berpengaruh terhadap umur Fatik aluminium, yang mana aluminium yang mengalami perlakuan korosi NaCl mendapatkan umur Fatik yang lebih kecil daripada tanpa perlakuan korosi. Dari hasil pengujian aluminium tanpa perlakuan menghasilkan 7282 siklus dan yang mengalami perlakuan korosi NaCl 24 jam mengalami penurunan sebanyak 62,78% menghasilkan 2710 siklus, 48 jam mengalami penurunan sebanyak 64,63% menghasilkan 2575 siklus, jadi semakin lama waktu pengkorosian umur fatik semakin kecil.
2. Perlakuan korosi NaCl berpengaruh pada fasa $MgZn_2$ di batas butir, karena $MgZn_2$ bersifat anodik ke matrik yang berdekatan yang membuat korosi intergranular terjadi dan bertindak sebagai jalur korosi yang semakin lama melemahkan kekuatan material.

B. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pada saat penelitian, penulis menggunakan spesimen yang terbatas sehingga untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan lebih banyak pengulangan pada setiap pengujian untuk hasil yang lebih akurat.
2. Pada saat penelitian, penulis menggunakan material aluminium seri 7xxx dengan cairan korosi NaCl sehingga pada penelitian selanjutnya bisa menggunakan material dan korosi yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, K. (2011). Faktor Perpatahan dan Kelelahan pada Kekuatan Bahan Material, ILTEK, Volume 6, Nomor 12.
- ASTM E647 (2004). “*Metal Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of STM Standard*”, Sec. 3, Vol. 03.01, pg.615-657, Bar Harbor Drive West Conshocken.
- ASTM E8. (2014). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material*. West Conshohocken, United States.
- Budiayarti, Priyani., Ilman, M. N. (2018). Studi Experimental Fatik Korosi Aluminium Paduan 7075-T6 pada Lingkungan 3,5% NaCl dengan Inhibitor Na₂CrO₄. Jurnal Imiah Teknik Mesin POROS, Vol. 16, No. 1. <https://doi.org/10.24912/poros.v16i1.6294>
- Broek, D., & Benzley, S. E. (1976). Book Reviews: Elementary Engineering Fracture Mechanics. In *The Shock and Vibration Digest* (Vol. 8, Issue 2, pp. 100–100). <https://doi.org/10.1177/058310247600800213>
- Burns, J. T., Kim, S., & Gangloff, R. P. (2010). Effect of corrosion severity on fatigue evolution in Al-Zn-Mg-Cu. *Corrosion Science*, 52(2), 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.10.006>
- Callister, W., & Rethwisch. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. doi:10.1016/0025-5416(87)90343-0.
- Co, N. E. C., & Burns, J. T. (2017). Effects of macro-scale corrosion damage feature on fatigue crack initiation and fatigue behavior. *International Journal of Fatigue*, 103, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.028>

- Crawford, B. R., Loader, C., Liu, Q., Harrison, T. J., & Sharp, P. K. (2014). Can pitting corrosion change the location of fatigue failures in aircraft? *International Journal of Fatigue*, *61*, 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.10.017>
- D.A. Vermilyea, Concerning the Critical Pitting Potential, *118* (1970) 529–531. doi:10.1149/1.2408104.
- Fujiyama, K. (2016). “Reference Module in Materials Science and Materials Engineering”.
- Huang, Y., Wei, C., Chen, L., & Li, P. (2014). Quantitative correlation between geometric parameters and stress concentration of corrosion pits. *Engineering Failure Analysis*, *44*, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.020>
- Kadkhodayan M, Maarefdoust M (2014) Elastic/plastic buckling of isotropic thin plates subjected to uniform and linearly varying in-plane loading using incremental and deformation theories. *Aerosp Sci Technol* 32(1):66–83
- Lee, Yung-li., Pan, Jwo., Hataway, Richard., Barkey, Mark. (2005). “*Fatigue Testing and Analysis*”. USA : Butterworth-Heinemann
- Liu, X., Li, Y., Lei, L., & Wang, X. (2021). The effect of nitrate on the corrosion behavior of 7075-T651 aluminum alloy in the acidic NaCl solution. *Materials and Corrosion*, *72*(9), 1478–1487. doi:10.1002/maco.202112280
- McCafferty, E. (2003). Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions. *Corrosion Science*, *45*(7), 1421–1438. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00231-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00231-7)
- Newman, R. C., & Healey, C. (2007). Stability, validity, and sensitivity to input parameters of the slip-dissolution model for stress-corrosion cracking. *Corrosion Science*, *49*(10), 4040–4050. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.001>
- Packard, L.P., (2017). Aluminum. United States : Journal of the America

Chemical Society 5 (5), pp 276–282

- Ralston, K. D., Birbilis, N., Cavanaugh, M. K., Weyland, M., Muddle, B. C., & Marceau, R. K. W. (2010). Role of nanostructure in pitting of Al-Cu-Mg alloys. *Electrochimica Acta*, 55(27), 7834–7842. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.02.001>
- Reboul, M. C., & Baroux, B. (2011). Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys. *Materials and Corrosion*, 62(3), 215–233. <https://doi.org/10.1002/maco.201005650>
- Rosen, M. (1985). *design and characteristics of eddy current probes for specific practical applications are discussed . Finally , in a series of papers , eddy current flaw imaging using the holographic inversion of eddy current data is deal with . In Chapter 3 the theoreti.* 266–267.
- Schnatterer, C., & Zander, D. (2016). Influence of heat treatments on the stress corrosion cracking susceptibility of 7075 aluminum wires in NaCl solutions. *Materials and Corrosion*, 67(11), 1164–1172. doi:10.1002/maco.201608978
- Song, M. S., Kong, Y. Y., Ran, M. W., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.07.004>
- Stannard, T. (2017). Corrosion and Corrosion-Fatigue Behavior of 7075-T7 Aluminum Alloys Studied. *PHD Thesis, December.*
- Starke, E. A., & Staley, J. T. (2010). Application of modern aluminium alloys to aircraft. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, 32(95), 747–783. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.747>
- Zhu, X., Shyam, A., Jones, J. W., Mayer, H., Lasecki, J. V., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.04.016>