

TESIS

**ANALISA PERMUKAAN PATAH LELAH PADA
MATERIAL BAJA ASTM A – 36 MENGGUNAKAN
*SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)***



Oleh:

**ROLAN CHRISDIANTONO
03032682125008**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

TESIS

ANALISA PERMUKAAN PATAH LELAH PADA MATERIAL BAJA ASTM A – 36 MENGGUNAKAN *SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)*



OLEH:

ROLAN CHRISDIANTONO

03032682125008

Palembang, Januari 2024

**Mengetahui,
Dekan Teknik Universitas Sriwijaya**



**Prof. Dr. Ir.H. Joni Arliansyah, MT
NIP. 19670615 1995121002**

**Diperiksa dan disetujui oleh
Pembimbing Tesis**

**Dr. Ir. Hendri Chandra, MT.
NIP. 196004071990031003**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISA PERMUKAAN PATAH LELAH PADA MATERIAL BAJA ASTM A – 36 MENGGUNAKAN *SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)*

TESIS

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapatkan Gelar Magister Teknik
Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

OLEH:

ROLAN CHRISDIANTONO

03032682125008

Palembang, Mei 2024

**Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Teknik
Mesin**



**Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197901052003121002**

**Diperiksa dan disetujui oleh
Pembimbing Tesis**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hendri Chandra', followed by a horizontal line.

**Dr. Ir. Hendri Chandra, MT.
NIP. 196004071990031003**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**Agenda No. :
Diterima Tanggal :
Paraf :**

TESIS

**Judul Tesis : Analisa Permukaan Patah Lelah pada Material Baja
ASTM A – 36 Menggunakan *Scanning Electron
Microscope (SEM)***

Nama Mahasiswa : Rolan Chrisdiantono

NIM : 03032682125008

Program Studi : Teknik Mesin

Bidang Kajian Utama : Teknik Material dan Manufaktur

Fakultas : Teknik

Menyetujui :

**Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister
Teknik Mesin**



**Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197901052003121002**

**Diperiksa dan disetujui oleh
Pembimbing Tesis**

**Dr. Ir. Hendri Chandra, MT.
NIP. 196004071990031003**

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa tesis ini dengan judul “Analisa Permukaan Patah Lelah pada Material Baja ASTM A – 36 Menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*”, telah dipertahankan di hadapan Panitia sidang tesis berupa tesis Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada Tanggal Januari 2024, diperiksa serta disetujui sesuai dengan masukan Panitia Seminar Proposal berupa tesis Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Palembang, Januari 2024

Panitia sidang tesis

Anggota Penguji :

1. Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T
NIP. 195903211987031001
2. Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909272003121004

Mengetahui,

Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197901052003121002

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Nama : Rolan Chrisdiantono
NIM : 03032682125008
Judul Tesis : Analisa Permukaan Patah Lelah pada Material
Baja ASTM A – 36 Menggunakan *Scanning
Electron Microscope (SEM)*

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (*Corresponding author*).

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Mei 2024



Rolan Chrisdiantono
03032682125008

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Rolan Chrisdiantono

NIM 03032682125008

Judul : Analisa Permukaan Patah Lelah pada Material Baja
ASTM A – 36 Menggunakan *Scanning Electron
Microscope (SEM)*

Menyatakan bahwa Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi Pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Mei 2024



Rolan Chrisdiantono
03032682125008

RINGKASAN

ANALISA PERMUKAAN PATAH LELAH PADA MATERIAL BAJA ASTM A – 36 MENGUNAKAN SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 26 Mei 2024

Rolan Chrisdiantono; Dibimbing oleh Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T.

RINGKASAN

Perkembangan sektor konstruksi dalam dunia industri mengenai kebutuhan akan bahan – bahan teknis semakin meningkat pesat, hal ini terlihat dengan semakin meningkatnya kebutuhan akan bahan – bahan teknis yang tergolong mempunyai kualitas yang lebih tinggi, misalnya; dari segi kemampuan (sifat mekanik), harga lebih murah dan banyak dijual di pasaran. Dalam mengembangkan teknologi dan proses seperti; Bidang konstruksi, produksi atau manufaktur sangat erat kaitannya dengan sifat mekanik suatu material, khususnya dalam bidang material teknik yang semakin sulit dipenuhi dengan material yang ada. Secara umum, konstruksi, termasuk bangunan mesin, baik yang statis (diam) maupun dinamis (bergerak), dalam pengoperasiannya selalu mengalami pengalaman beban dinamis, beban dinamis dapat disebabkan oleh faktor yang sulit dihindari seperti hembusan angin, laut gelombang, permukaan tidak rata dan sebagainya. Penyebab terjadinya kelelahan adalah adanya retakan yang berasal dari daerah tempat terjadinya konsentrasi stres tinggi. Area tersebut antara lain: lekukan, lubang pada material, permukaan kasar, dan rongga baik di dalam maupun di permukaan material. Jadi, terjadinya kelelahan adalah retakan yang terus membesar panjang hingga komponen tidak lagi memiliki toleransi terhadap tegangan dan regangan yang lebih tinggi. Panjang retakan ini akan terus bertambah akibat adanya pembebanan dinamis yang terus menerus. Di dalam Pada penelitian ini dilakukan pengujian kelelahan dengan metode tekuk berulang, setelah dilakukan pengujian benda uji maka Permukaan rekahan dianalisis menggunakan pengamatan visual untuk melihat struktur makro dan pemindaian elektron Uji mikroskop dilakukan untuk melihat mikro strukturnya.

Kata Kunci: Analisis; Kelelahan; Baja; ASTM A – 36; SEM

SUMMARY

ANALYSIS SURFACE FATIGUE FRACTURE ON THE MATERIAL STEEL ASTM A – 36 USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)

Scientific paper in the form of a Thesis, May 26, 2024

Rolan Chrisdiantono; Supervised by Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T.

SUMMARY

The development of the construction sector in the industrial world regarding the need for technical materials is increasing rapidly, this can be seen by the increasing demand for technical materials which are classified as having higher quality, for example; in terms of capabilities (mechanical properties), the price is cheaper and widely sold on the market. In developing technology and processes such as; The fields of construction, production or manufacturing are closely related to the mechanical properties of a material, especially in the field of materials engineering, which is becoming increasingly difficult to meet with existing materials. In general, construction, including machine buildings, whether static (still) or dynamic (moving), in its operation always experiences dynamic loads, dynamic loads can be caused by factors that are difficult to avoid, such as gusts of wind, sea waves, uneven surfaces and so on. The cause of fatigue is the presence of cracks that originate in areas where the stress concentration is high. These areas include: indentations, holes in the material, rough surfaces, and cavities both inside and on the surface of the material. So, the occurrence of fatigue is a crack that continues to grow in length until the component no longer has the tolerance for higher stresses and strains. The length of this crack will continue to increase due to continuous dynamic loading. In this research, fatigue testing using the repeated bending method was carried out, after testing the specimen, the fracture surface was analyzed using visual observation to see the macro structure and a scanning electron microscope test was carried out to see the structure. the micro Key Word:

Analysis; Fatigue; Steel; ASTM A – 36; SEM

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan yang Maha Esa berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis yang berjudul “Analisa Permukaan Patah Lelah pada Material Baja ASTM A – 36 Menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*”, disusun untuk melengkapi salah satu syarat mendapatkan Gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih atas segala bimbingan dan bantuan yang telah diberikan dalam penyusunan proposal ini kepada:

1. Ayahanda Tawami dan Ibunda Mastura, kedua orang tua penulis yang telah memberikan doa dan dukungan.
2. Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T. Selaku dosen pembimbing dan pembimbing akademik.
3. Ketua jurusan, Ketua Program Studi, dosen-dosen, jajaran staf dan karyawan Jurusan Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam hal pembelajaran khususnya bagi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Palembang, Mei 2024

Rolan Chrisdiantono

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Kajian Teori.....	4
2.1.1 Definisi Fatik.....	4
2.1.2 Baja Karbon	5
2.1.3 Baja ASTM A – 36	6
2.1.4 Kegagalan <i>Fatigue</i>	8
2.2 Perhitungan Tegangan Bending (σ_b) pada Pengujian Fatik	10
2.3 Mekanisme Penjalaran Retak	12
2.4 Prediksi Umur Lelah Komponen	13
2.5 Karakteristik Makroskopis Perambatan Retak Fatik	13
2.6 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	14
2.7 Kurva S-N.....	16
2.8 Kajian Pustaka	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	20
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	20

3.2	Studi Literatur	22
3.3	Persiapan Spesimen	22
3.4	Alat dan Bahan	22
3.5	Metode Pengujian	24
3.5.1	Pengujian <i>Fatigue</i> Metode <i>Repeated Bending</i>	24
3.5.2	Pengamatan Visual	25
3.5.3	Pemeriksaan Faktografi	25
3.6	Komposisi Kimia Baja SA-36	26
3.7	<i>Mechanical Properties</i> Baja SA-36.....	26
3.8	Penentuan Pembebanan pada Pengujian <i>Fatigue</i>	26
3.8.1	Momen Lentur	27
3.8.2	Tegangan Bending	27
3.9	Waktu dan Tempat.....	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		30
4.1	Data Hasil Pengujian Fatik.....	30
4.1.1	Perhitungan Siklus	30
4.1.2	Perhitungan Sudut	31
4.1.3	Momen Lentur.....	31
4.1.4	Perhitungan Tegangan Bending (σ_b).....	32
4.2	Data Hasil Perhitungan Pengujian <i>Fatigue</i>	34
4.3	Kurva S-N	35
4.4	Pengamatan Visual Permukaan Patah Pengujian <i>Fatigue</i>	36
4.5	Hasil <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	38
4.6	Analisis Data	40
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		42
5.1	Kesimpulan	42
5.2	Saran.....	42
DAFTAR RUJUKAN.....		43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Variasi Tegangan	5
Gambar 2.2 Struktur Mikro Baja Karbon rendah pembesaran 635x (Callister dan Rethwisch, 2008).....	8
Gambar 2.3. Dimensi sampel uji fatigue standar JIS Z 2273	9
Gambar 2. 4 Skema permukaan patah fatigue (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)	
Gambar 2.3 Mekanisme perambatan retak fatik (Broek, 1986)	11
Gambar 2.3. Permukaan patah lelah dari Baut	12
Gambar 2.7. Kurva S-N (William D. Callister, 2001).....	15
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3.3 Pelat Baja SA-36... ..	19
Gambar 3.4 Mesin uji impak Charpy Impact Testing Machine CI-30	20
Gambar 3.5 Mikroskop Optik PME 3 11 B.....	22

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Komposisi kimia material baja SA-36.....	23
Tabel 3.2. <i>Mechanical properties</i> baja SA-36.....	23
Tabel 3.3. Data pembebanan pengujian <i>fatigue</i> metode <i>repeated bending</i> pada baja ASTM A-36.....	25
Tabel 4.1 Data hasil pengujian <i>fatigue</i>	27
Tabel 4.2 Hasil pengujian <i>fatigue</i> baja ASTM A-36.....	30

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan bidang konstruksi dalam dunia industri terhadap kebutuhan material teknik semakin meningkat pesat, hal ini terlihat dengan meningkatnya permintaan terhadap bahan-bahan teknik yang tergolong memiliki kualitas yang lebih tinggi, misalnya; dalam hal kemampuan (sifat-sifat mekaniknya), harganya lebih murah dan banyak dijual di pasaran. Dalam pengembangan teknologi dan proses seperti; bidang konstruksi, produksi atau manufaktur sangat erat hubungannya dengan sifat-sifat mekanik yang dimiliki oleh suatu material, khususnya dalam bidang teknik material yang semakin hari semakin sulit dipenuhi oleh bahan - bahan yang ada selama ini. Umumnya konstruksi termasuk bangunan mesin baik yang bersifat statis (diam) maupun yang bersifat dinamis (bergerak) dalam operasinya selalu mengalami beban dinamis, beban dinamis dapat ditimbulkan oleh faktor yang sulit dihindari seperti tiupan angin, gelombang air laut, permukaan yang tidak rata dan sebagainya. Pembebanan dinamis ini menyebabkan kerusakan pada material. Kerusakan akibat beban dinamis ini lebih dipahami sebagai faktor kelelahan material karena tegangan yang ditimbulkan oleh beban dinamis lebih besar dari tegangan batas lelah (*endurance limit*) material. Untuk menghindari terjadinya kecelakaan yang tidak terdeteksi dan kerugian yang lebih besar, maka perlu diadakan konstruksi terhadap faktor kelelahan tersebut.

Retak merupakan salah satu faktor penyebab terjadinya kegagalan pada sebuah material. Sehingga merupakan kewajiban bagi industri untuk mengetahui mekanisme perambatan retak untuk menghindari kerugian. Ketahanan material terhadap beban tentu berbeda-beda, oleh karena itu industri perlu mengklasifikasi material yang digunakan, untuk meningkatkan umur pakai (*lifetime*) suatu material demi meningkatkan efektivitas penggunaan material tersebut. Retak disebabkan oleh dua jenis beban, yaitu beban statis dan dinamis.

Kegagalan biasanya terjadi saat level tegangan dibawah yield strength material. Semakin besar amplitudo pembebanan maka semakin cepat retak merambat.

Ada tiga fase di dalam kerusakan yang diakibatkan oleh fatik, yaitu: pengintian retak (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*), dan patah statik (*fracture*). Fenomena fatik ini biasanya terjadi karena adanya beban dinamis dan adanya takikan pada material. Fatik sangat bergantung dengan faktor takikan karena semakin sempurna geometri permukaan suatu struktur maka umur fatiknya juga akan semakin tinggi. Kerusakan akibat fatik banyak terjadi di dunia teknik. Biasanya kerusakan ini terjadi karena disebabkan dengan adanya cacat atau retakan dan juga adanya pembebanan pada saat beroperasi (Hasan, 2007).

Retak yang terjadi akan semakin bertambah panjang dan retakan ini akan berpengaruh terhadap kekuatan struktur suatu material. Kegagalan material terjadi disebabkan adanya cacat atau retakan dan juga adanya pembebanan. Retak yang terjadi akan semakin bertambah panjang dan retakan ini akan berpengaruh terhadap kekuatan struktur suatu material. Salah satu faktor yang perlu diketahui dalam perencanaan adalah faktor toleransi kerusakan yaitu karakteristik perambatan retak (*crack propagation*) dari material dasar maka dapat diketahui umur operasi yang aman untuk sebuah konstruksi.

Dari penelitian sebelumnya perambatan retak perlu dipahami untuk menganalisis perilaku perambatan di daerah garis-garis pantai pada permukaan patahan logam (*beach mark*). Mekanisme penutupan retak juga dipengaruhi efek rasio beban perambatan retak fatik di dekat wilayah ambang batas. Penutupan retak menentukan nilai ketangguhan bahan (K_{max}) akibat kerusakan retak fatik (Martelo, 2015).

Berdasarkan uraian pada paragraf sebelumnya, penulis tertarik untuk melakukan penelitian tentang perambatan retak fatik dengan menggunakan metode Eksperimen. Dalam penelitian ini material yang digunakan adalah baja ASTM A-36 yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi dan komponen-komponen teknik.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagaimana patah lelah dinamis yang dialami material Baja ASTM A – 36 dan karakteristik permukaan patahan pada Baja ASTM A – 36. Sudut pembebanan yang akan dilakukan pada specimen uji *Fatigue* bending yaitu 1° , 2° , dan 3° pada saat pengujian *Fatigue* metode *Repeated* bending.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah perlu diterapkan supaya topik yang dibahas dapat terperinci. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengujian ketahanan lelah yang dilakukan adalah pengujian fatik dengan metode *fatigue bending*.
2. Material yang digunakan adalah plat baja karbon ASTM A-36.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mampu memecahkan nilai ketahanan lelah pada Baja ASTM A-36.
2. Menginvestigasi dan menganalisis karakteristik permukaan patahan pada Baja ASTM A-36.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang dihasilkan dalam penelitian antara lain sebagai berikut.

1. Sebagai kontribusi untuk ilmu pengetahuan di bidang Teknik Mesin.
2. Sebagai referensi ilmiah terhadap karakteristik permukaan patah pada material baja ASTM A-36.
3. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Teori

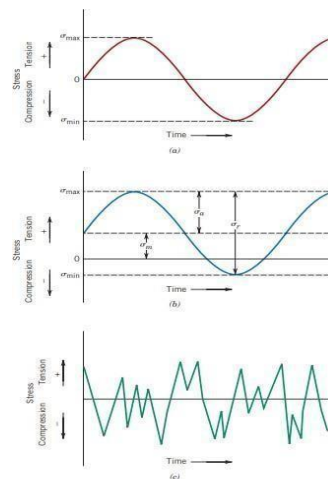
2.1.1 Definisi Fatik

Pembebanan pada suatu konstruksi umumnya berupa beban statis atau beban dinamis. Beban statis adalah sistem pembebanan pada suatu komponen dengan beban konstan, sedangkan beban suatu komponen dengan beban berubah-ubah dari beban maksimum ke beban minimum secara terus-menerus. Beban yang berubah-ubah ini sering disebut beban berfluktuasi. Pada kondisi tegangan yang sama, komponen struktur yang mengalami pembebanan dinamis akan mempunyai batas umur pakai lebih pendek dibandingkan dengan batas umur pakai komponen yang mengalami pembebanan statis, karena komponen seolah-olah mendapat beban kejutan secara tiba-tiba. Setelah sekian siklus pembebanan dinamis, komponen akan mengalami kegagalan (patah). Patah yang terjadi akibat beban berulang inilah yang disebut fatik atau patah lelah (Diharjo K, 1996). Penyebab terjadinya fatik adalah adanya retak yang berawal pada daerah yang konsentrasi tegangannya tinggi. Daerah ini antara lain: lekukan, lubang pada material, permukaan yang kasar, dan rongga baik di dalam maupun di permukaan material.

Jadi, terjadinya fatik adalah retak yang terus bertambah panjang hingga komponen tidak lagi mempunyai toleransi terhadap tegangan dan regangan yang lebih tinggi, dan akhirnya terjadi patah statis secara tiba-tiba. Panjang retak ini akan terus bertambah karena pembebanan dinamis yang terus-menerus. Semakin besar amplitudo pembebanan dinamis semakin cepat retak merambat (Diharjo K, 1996). Kerusakan akibat beban berulang ini disebut patah lelah (*fatigue failures*) karena umumnya perpatahan tersebut terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama. Fatik atau kelelahan menurut (Sugiarto dkk, 2013), didefinisikan sebagai proses perubahan struktur permanen *progressive localized* pada kondisi yang menghasilkan fluktuasi regangan dan tegangan dibawah kekuatan tariknya dan pada satu titik atau banyak titik yang dapat memuncak menjadi retak (*crack*) atau patahan (*fracture*) secara keseluruhan sesudah fluktuasi

tertentu *progressive* mengandung pengertian proses fatik terjadi selama jangka waktu tertentu atau selama pemakaian, sejak komponen atau struktur digunakan. *Localized* berarti proses fatik beroperasi pada luasan lokal yang mempunyai tegangan dan regangan yang tinggi karena, pengaruh beban luar, perubahan geometri, perbedaan temperatur, tegangan sisa dan tidak kesempurnaan diri.

Menurut (William D. Callister and Rethwisch, 2007) Tegangan yang diberikan dapat berupa aksial (uji tarik dan tekan), Lentur, atau torsional. Secara umum, tiga macam tegangan waktu yang beerflukuasi berbeda dimungkinkan. Direpresentasikan secara skematik oleh ketergantungan waktu reguler dan sinusoidal pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Variasi Tegangan (Callister dan Rethwisch, 2008)

2.1.2 Baja Karbon

Baja karbon merupakan baja paduan yang memiliki unsur karbon dengan sedikit penambahan unsur-unsur paduan. Penambahan unsur paduan tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekuatan baja tanpa mengurangi tingkat keuletannya. Baja karbon mengandung unsur karbon antara 0,1% – 1,7%. (Yuspian dkk, 2017).

Berdasarkan kadar karbon yang dikandungnya, baja karbon diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Baja Karbon Rendah, yaitu baja yang mengandung karbon kurang dari 0,3%. Pada industri, baja karbon rendah digunakan untuk dibuat pelat, pipa, pekerjaan mesin, dan lain-lain.

2. Baja Karbon Sedang, yaitu baja yang mengandung karbon antara 0,3% – 0,6%. Baja karbon sedang biasanya digunakan sebagai alat-alat perkakas, roda gigi, poros engkol, dan lain-lain.
3. Baja Karbon Tinggi, yaitu baja yang mengandung karbon antara 0,6% – 1,5%. Baja ini biasanya digunakan untuk keperluan alat-alat konstruksi yang berhubungan dengan temperatur yang tinggi, seperti landasan, bor, bantalan peluru, dan sebagainya.

Menurut (Bambang Pratowo dkk, 2019), pengaruh unsur-unsur paduan terhadap sifat-sifat baja karbon adalah sebagai berikut:

1. Unsur Karbon (C): meningkatkan ketahanan pengaruh panas, ketangguhan, kekerasan, dan gesekan.
2. Unsur Silikon (Si): meningkatkan ketahanan pengaruh panas dan memperbaiki sifat elastisitas.
3. Unsur Fosfor (P): dapat memperbaiki sifat ketahanan gesek.
4. Unsur Sulfur (S): dapat memperbaiki sifat ketahanan goresan.
5. Unsur Chrom (Cr): dapat menambah kekuatan tarik, plastis, keausan, dan memperbaiki ketahanan pengaruh panas dan kekerasan.
6. Unsur Mangan (Mn): memperbaiki sifat-sifat terhadap keausan, menambah kekerasan, kekuatan, dan keuletan.
7. Unsur Molibden (Mo): meningkatkan sifat-sifat ketahanan pengaruh panas dan kekerasan.
8. Unsur Wolfram (W): membentuk karbid yang keras, tahan suhu tinggi, banyak digunakan dalam baja perkakas dan baja potong cepat.
9. Unsur Kobalt (Co): meningkatkan sifat-sifat terhadap keausan dan kekerasan.

2.1.2 Baja ASTM A-36

Baja ASTM A-36 merupakan baja karbon yang termasuk ke dalam baja karbon rendah. Baja karbon jenis ini sering digunakan pada aplikasi struktural seperti konstruksi, kapal, bejana tekan, dsb. Baja ASTM A-36 umumnya juga disebut sebagai plat *mild steel*. Adapun syarat komposisi baja ASTM A-36 dan *mechanical properties* ditunjukkan pada tabel 2.1 dan 2.2.

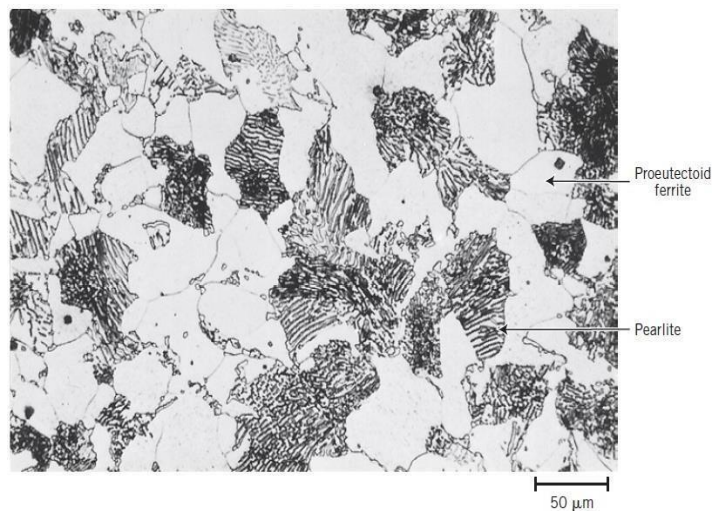
Tabel 2.1. Syarat Komposisi Kimia Baja ASTM SA-36 (ASTM A-36)

Komposisi (%)	Tebal Plat (mm)				
	≤ 20	20-40	40-65	65-100	>100
Karbon (C), Max	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29
Mangan (Mn),			0.18-1.20	0.08-1.20	0.08-1.20
Fosfor (P), Max	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur (S), Max	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon (Si), Max	0.40	0.40 max	0.15-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40
Tembaga (Cu), Jika ditentukan	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Tabel 2.2. Syarat *Mechanical Properties* ASTM A-36 (ASTM A-36, 2004)

Sifat Mekanik	Nilai
<i>Ultimate Strength (Mpa)</i>	400-500
<i>Yield Strength (Mpa)</i>	250
<i>Elongation, min (%)</i>	23

Callister dan Rethwisch (2008) menyatakan struktur mikro pada baja karbon rendah ASTM A-36 termasuk ke dalam fasa ferrite dan pearlite. Pada pengamatan tersebut diperoleh fasa ferrite lebih dominan daripada pearlite. Bagian yang terang merupakan fasa ferrite sedangkan bagian yang gelap merupakan fasa pearlite. Semakin sedikit jumlah pearlite menunjukkan kandungan karbon yang semakin rendah pada baja tersebut. Begitu juga dengan nilai kekerasan material yang semakin kecil. Fasa ferrite dan pearlite pada baja karbon rendah ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur Mikro Baja Karbon rendah pembesaran 635x
(Callister dan Rethwisch, 2008)

2.1.3 Kegagalan *Fatigue*

Kerusakan material akibat pembebanan atau tegangan yang berulang disebut dengan patah lelah atau *fatigue* yang terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama. *Fatigue* didefinisikan sebagai kerusakan pada material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) maupun tegangan luluh (*yield strength*) pada material yang diberikan beban konstan (Pratowo dkk., 2019).

Chandra (2019) menjelaskan tahap-tahap terjadinya patah pada material adalah sebagai berikut:

1. Awal retak

Fatigue pada umumnya diawali dengan munculnya retakan pada permukaan benda lunak atau area di mana terdapat pengurangan tegangan pada benda tersebut seperti takik atau lubang akibat kompresi.

2. Rambatan retak

Jika telah terjadi awal retakan kecil akan terjadi konsentrasi tegangan yang mengakibatkan terjadinya rambatan retakan di sekitar awal retakan.

3. Patahan akhir

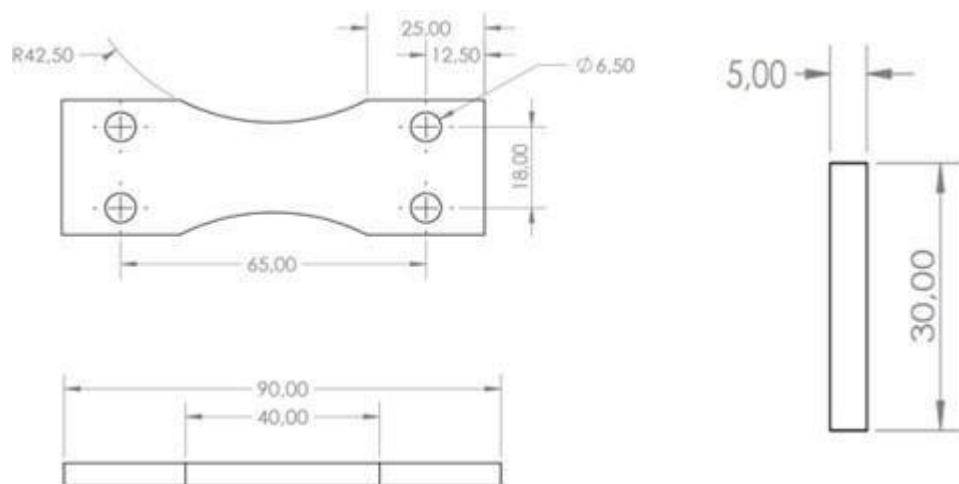
Kerusakan yang akan terjadi jika telah terjadinya rambatan retak yang menyebar dan sampel material akan mengalami kelelahan setelah itu akan patah secara permanen.

Pengujian fatigue dilakukan dengan memberikan pembebanan atau tegangan tertentu sehingga spesimen mengalami kerusakan pada siklus tertentu. Karakteristik permukaan patah akibat fatigue ditunjukkan dengan adanya garis-garis halus yang tersebar pada permukaan yang disebut striasi. Jarak antara striasi menunjukkan satu siklus pembebanan fatigue (Chandra, 2012).

Prediksi umur fatigue dapat dilakukan melalui tiga pendekatan yaitu pendekatan tegangan (stress approach), pendekatan regangan (strain approach), dan pendekatan mekanika patahan (fracture mechanics). Pendekatan tegangan biasanya menggunakan metode kurva S-N (Mardhi dan Himawan, 2011).

Faktor yang dapat mempengaruhi umur ketahanan lelah (fatigue life) beberapa di antaranya yaitu tingkat tegangan rata-rata, desain geometris, efek permukaan, dan variabel metalurgi serta lingkungan (Callister dan Rethwisch, 2008).

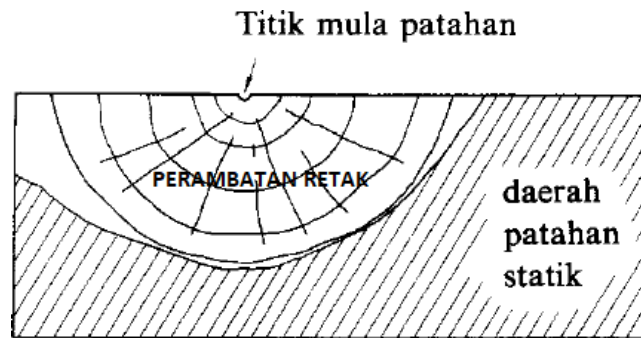
Pengujian ketahanan lelah pada baja ASTM A-36 menggunakan dimensi sampel standar pengujian Repetead Torsion and Bending Fatigue Machine dengan standar JIS Z 2273 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



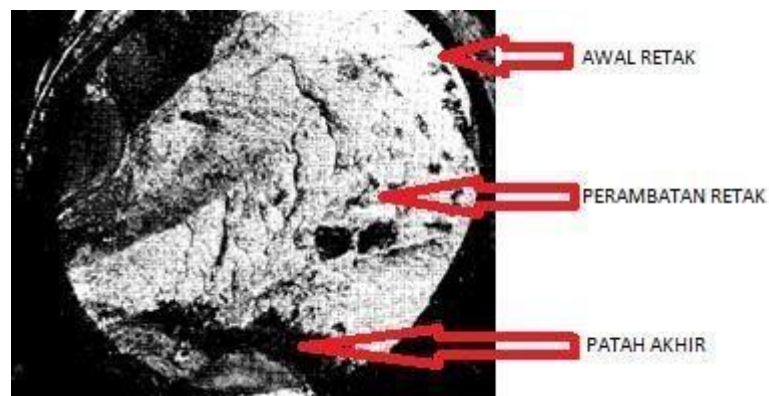
Gambar 2.3. Dimensi sampel uji *fatigue* standar JIS Z 2273

Wirjosumarto dan Okumura (2000) menyatakan bahwa logam terkadang patah akibat tegangan berulang yang besarnya di bawah tegangan izin. Gejala patah yang disebabkan karena beban luar yang berulang, perubahan bentuk yang berulang atau tegangan termal yang berulang dinamakan patah *fatigue*.

Beberapa contoh dari patah fatigue ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan 2.5. Pada Gambar 2.4 patah *fatigue* menjalar sedikit demi sedikit dalam bentuk lingkaran mulai dari retakan yang merupakan pusat dari patahan.



Gambar 2. 4 Skema permukaan patah fatigue (Wiryo Sumarto dan Okumura, 2000)



Gambar 2.5 Permukaan patah *fatigue* (Wiryo Sumarto dan Okumura, 2000)

Patah fatigue tidak terjadi apabila tegangan yang berulang tidak melebihi nilai tertentu yang dinamakan batas *fatigue*. Tegangan yang diberikan dapat berupa aksial (tarik dan tekan), lentur, atau torsional (Callister dan Rethwisch, 2008).

2.2 Perhitungan Tegangan Bending (σ_b) pada Pengujian Fatik

Pengujian fatik dilakukan dengan *Rotary Bending Machine*. Jika benda uji diberi beban bending, maka akan terjadi momen lentur pada benda uji. Momen lentur ini menyebabkan terjadinya beban lentur pada permukaan benda uji.

Akhir dari perambatan retak pada komponen akibat beban dinamis adalah munculnya *initial crack* atau awalan retak pada permukaan benda uji. Rumus mencari tegangan bending pada pengujian fatik adalah sebagai berikut.

$$\sigma_b = \frac{M \times y}{I} \quad 2.1$$

Di mana:

- σ_b = Tegangan bending (MPa)
 M = Momen lentur (N.mm)
 y = Setengah dari ketebalan plat uji (1/2 t) (mm)
 I = Momen inersia benda uji (mm⁴)

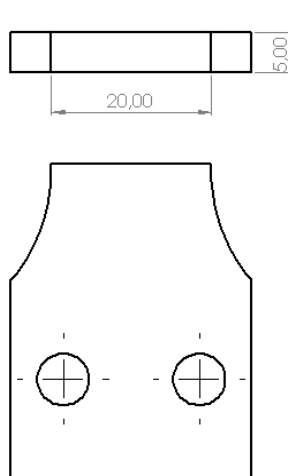
Momen inersia dapat dihitung melalui persamaan berikut.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad 2.2$$

Di mana:

- b = Lebar spesimen (mm)
 h = Tinggi spesimen (mm)

Dimensi dari b dan h untuk menentukan momen inersia pada pengujian fatigues ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Dimensi permukaan momen inersia spesimen *fatigue*.

Momen lentur dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3.

$$M = \frac{\theta}{\theta_{maks}} \times r \quad 2.3$$

Di mana:

θ = Sudut pembebanan ($^{\circ}$)

θ_{maks} = Pembebanan maksimum (15°)

r = *Repeating moment* (2 kgf.m = 19613,3 Nmm)

Repeating moment didapat dari spesifikasi mesin uji *fatigue* yang digunakan sebesar ± 2 kgf. m

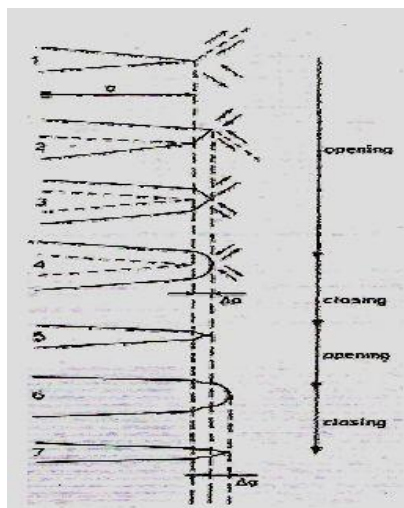
Repeating moment = 2 kgf.m

2 kgf.m = 2 kg \times 9,80665 m/s² \times 1000 mm

= 19613,3 Nmm

2.3 Mekanisme Penjalaran Retak

Perpatahan adalah pemisahan atau pemecahan suatu benda padat, menjadi dua bagian atau lebih diakibatkan adanya tegangan. Proses perpatahan terdiri atas pembentukan retak ini memerlukan jumlah siklus yang cukup besar. Perambatan retak yang terjadi pada tahap ini sangat lambat. Mekanisme perambatan retak fatik dijelaskan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Mekanisme perambatan retak fatik (Broek,1986).

Kegagalan lelah ditunjukkan oleh aspek-aspek sebagai berikut (Dieter, 1986)

1. Pengintian awal retak (*Initial crack*)
2. Adanya perambatan retak ditunjukkan oleh *beach mark*.
3. Daerah patah akhir (*Final failure*).

Daerah patahan biasanya memiliki ciri-ciri bidang patahan yang mirip patahan pada uji impact atau pada uji *fracture toughness* (ketangguhan patahan) pada material yang sama. Bidang patahannya tampak kasar atau berserabut (Dieter, 1986).

2.4 Prediksi Umur Lelah Komponen

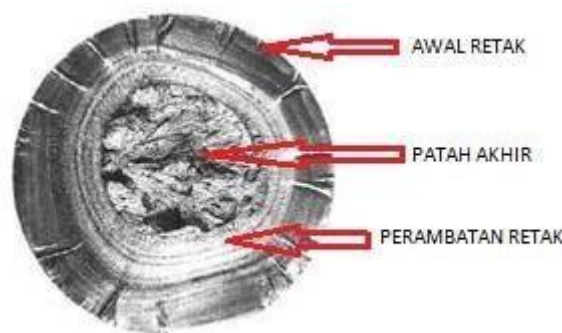
Beberapa faktor yang mempengaruhi umur lelah komponen adalah :

1. Beban (jenis beban, frekuensi siklus beban, pola beban, rasio beban, dan ragam beban).
2. Kontinuitas, yaitu ada tidaknya rongga.
3. Ketelitian proses pengerjaan.
4. Bentuk dan ukuran spesimen
5. Temperatur operasi.

2.5 Karakteristik Makroskopis Perambatan Retak Fatik

Karakteristik makroskopis dari kelelahan logam adalah sebagai berikut

1. Tidak adanya deformasi plastis secara makro.
2. Terdapat tanda 'garis-garis pantai' (*beach marks*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 dibawah ini.



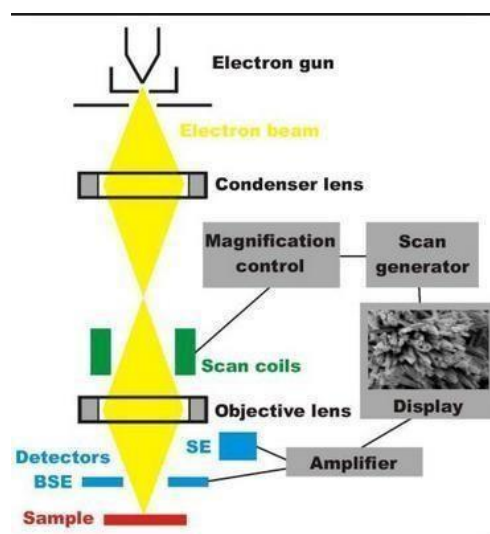
Gambar 2.8 Permukaan patah lelah dari Baut

Tanda garis-garis pantai (beach marks) yang merupakan tanda penjaran retakan, mengarah tegak lurus dengan tegangan tarik dan setelah menjalar sedemikian hingga penampang yang tersisa tidak mampu lagi menahan beban yang bekerja, maka akhirnya terjadilah patah akhir atau patah statik (Abrianto, 2009).

2.6 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron microscopy (SEM) merupakan mikroskop elektron yang banyak digunakan dalam ilmu pengetahuan material. SEM banyak digunakan karena memiliki kombinasi yang unik, mulai dari persiapan spesimen yang simpel dan mudah, kapabilitas tampilan yang bagus serta fleksibel.

SEM digunakan pada sampel yang tebal dan memungkinkan untuk analisis permukaan. Pancaran berkas yang jatuh pada sampel akan dipantulkan dan didifraksikan. Adanya elektron yang terdifraksi dapat diamati dalam bentuk pola-pola difraksi. Pola-pola difraksi yang tampak sangat bergantung pada bentuk dan ukuran sel satuan dari sampel. SEM juga dapat digunakan untuk menyimpulkan data-data kristalografi, sehingga hal ini dapat dikembangkan untuk menentukan elemen atau senyawa. Berikut cara kerja *Scanning Electron Microscope (SEM)* dijelaskan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram SEM (Reed, 1993)

Prinsip kerja SEM dapat dilihat pada Gambar 2.16. Dua sinar elektron digunakan secara simultan. Satu *strike specimen* digunakan untuk menguji dan strike yang lain adalah CRT (*Cathode Ray Tube*) memberi tampilan yang dapat dilihat oleh operator. Akibat tumbukan pada spesimen dihasilkan satu jenis elektron dan emisi foton. Sinyal yang terpilih dikoleksi, dideteksi dan dikuatkan untuk memodulasi tingkat keterangan dari sinar elektron yang kedua, maka sejumlah besar sinar akan menghasilkan bintik gelap.

SEM menggunakan prinsip *scanning*, maksudnya berkas elektron diarahkan dari titik ke titik pada objek. Gerakan berkas elektron dari satu titik ke titik yang lain pada suatu daerah objek menyerupai gerakan membaca. Gerakan membaca ini disebut dengan *scanning*. Komponen utama SEM terdiri dari dua unit, yaitu *electron column* dan *display consule*. *Electron column* merupakan model *electron beam scanning*, sedangkan *display consule* merupakan elektron sekunder yang di dalamnya terdapat CRT. Pancaran elektron energi tinggi dihasilkan oleh *electron gun* yang kedua tipenya berdasar pada pemanfaatan arus. Yang pertama pistol termionik dimana pancaran elektron tercapai dengan pemanasan tungsten atau filamen katoda pada suhu 1500 K sampai 3000 K. Katoda adalah kutub negatif yang dibutuhkan untuk mempercepat tegangan E_0 kali elektron volt (KeV). Pistol termionik sangat luas penggunaannya karena relatif aman untuk digunakan dalam tabung vakum 10^{-9} Torr, atau lebih kecil dari itu.

Sumber alternatif lain dari pistol *field emission* dimana ujung kawat wolfram yangtajam dihubungkan tertutup dengan anoda ekstraksi dan diterapkan potensial sampai beberapa ribu volt. Elektron yang keluar dari kawat wolfram tidak membutuhkan pemanasan yang dapat dilakukan pada suhu kamar, menuju tabung vakum yang dipercepat seperti pada pistol termionik ke arah anoda. Pistol *field emission* tergantung dari permukaan emitter yang secara otomatis bersih, sehingga harus bekerja pada operasi kevakuman yang ultra tinggi kira-kira 10^{-9} Torr, namun jika lebih besar maka akan lebih baik. Jarak panjang dari emitter *electron column*. Pemancaran elektron dari elektron column pada *chamber* harus dipompa cukup vakum menggunakan *oil-difussion*, *turbo molecular*, atau pompa ion (Chan, 1993).

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilengkapi dengan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) yang dapat menentukan unsur dan analisis komposisi kimia. Bila suatu berkas elektron yang ditembakkan atau dikenai pada sampel akan terjadi interaksi berupa elektron yang keluar dari atomnya, maka elektron tersebut mempunyai tingkat energi yang lebih rendah dari yang lain. Hal ini menyebabkan atom menjadi kurang stabil, sedangkan suatu atom mempunyai kecenderungan ingin menjadi stabil. Oleh karena itu, elektron yang mempunyai tingkat energi yang lebih tinggi akan turun (transisi) ke tingkat yang lebih rendah.

Kelebihan energi yang dilepas pada waktu transisi adalah dalam bentuk sinar-X. Karena beda tingkat energi untuk suatu atom tertentu, sehingga sinar-X yang dihasilkan oleh suatu atom tersebut juga mempunyai energi tertentu dan ini disebut sinar-X karakteristik. Energi pancaran elektron dalam bentuk sinar-X akan dideteksi dan dihitung oleh EDS dan akan dihasilkan keluaran berupa grafik puncak-puncak tertentu yang mewakili unsur yang terkandung. EDS juga memiliki kemampuan untuk melakukan elemental masing-masing elemen di permukaan bahan. EDS juga dapat digunakan untuk menganalisis secara kuantitas dari persentase masing-masing elemen (Qulub, 2011).

2.7 Kurva S-N

Kurva S-N merupakan kurva yang dihasilkan dari pengujian *fatigue*. Kurva S-N adalah grafik hubungan antara kekuatan fatik (S: *Strength*) dan jumlah siklus pembebanan (N: *Number of Stress Cycle*). Pada saat pengujian, dimasukkan faktor geometri, perlakuan permukaan, kondisi pembebanan, temperatur dan proses perlakuan material sehingga kurva S-N yang dihasilkan memberikan banyak informasi sifat fatik. Kurva S-N memiliki kekurangan yaitu tidak dapat memprediksi deformasi plastis lokal dan efek dari tegangan rata-rata. (Mardhi dan Himawan, 2011)

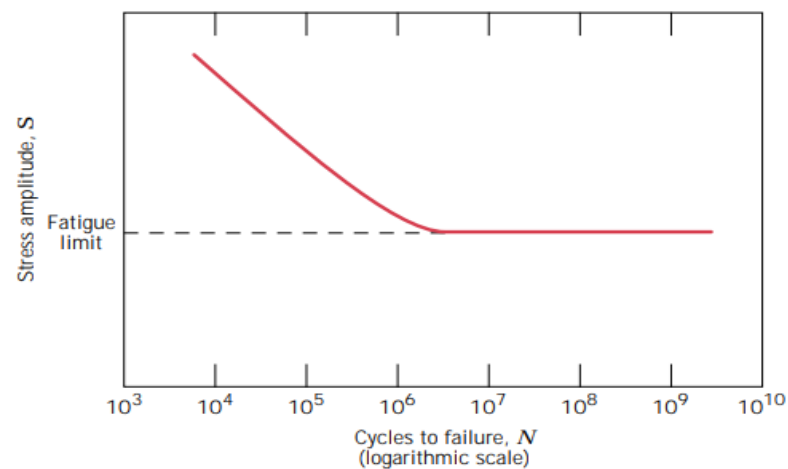
Kurva S-N adalah karakteristik *fatigue* yang digunakan dari bahan yang mengalami tegangan berulang dengan besar yang sama. Kurva itu didapatkan dari uji spesimen yang diberi beban dengan jumlah N sampai terjadi kegagalan.

Besarnya N berbanding terbalik dengan rentang tegangan S (tegangan maksimum-tegangan minimum). Kurva S-N memberikan informasi karakteristik

fatik dengan amplitude pembebanan yang konstan. (Amirudin, A dan Lubis, 2018)

Analisa komponen ketahanan *fatigue* didasarkan pada kurva S-N material atau komponen. Kurva S-N umumnya diperoleh dari proses pengujian, sehingga didapatkan estimasi ketahanan lelah. Kurva S-N menunjukkan hubungan antara tingkat stress yang diterapkan dan batas kelelahan dari material (Zhao dkk., 2017). Jumlah siklus kegagalan akan menurun, jika stress meningkat. Untuk baja, kurva S-N menjadi horizontal di beberapa tingkat stress yang rendah.

Hal ini disebut batas kelelahan (*fatigue limit*). Untuk mengetahui *fatigue limit* atau batas lelah dari suatu material besi dan bukan besi diperoleh dari kurva S-N yaitu kurva tegangan (S) terhadap jumlah siklus (N) sampai terjadi kegagalan. Kurva S-N dijelaskan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Kurva S-N (Callister dan Rethwisch, 2008)

Gambar 2.10 diperoleh dari tegangan versus jumlah siklus pada spesimen uji hingga kegagalan benda uji. Pada kurva ini siklus menggunakan skala logaritmik. Batas terhadap kelelahan (daya tahan) besi ditentukan oleh jumlah siklus $N > 10^7$ (Callister dan Rethwisch, 2008)

Rumus mencari tegangan siklus pada uji *fatigue* ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$N = t \times n \quad 2.7$$

Di mana:

N = Siklus

t = Waktu (detik)

n = Putaran Motor (rpm)

2.8 Kajian Pustaka

Berikut ini kajian pustaka sebagai referensi dalam penelitian yang dilakukan didapat dari beberapa sumber seperti skripsi, jurnal-jurnal yang berkaitan dengan kekuatan lelah dan pengaruh perlakuan panas pada material. Kajian pustaka pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Jurnal yang ditulis (Amiruddin, A., Lubis, F.A. 2018) berjudul Analisa Pengujian Lelah Material Tembaga Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine. Dari hasil pengujian kelelahan (*fatigue*) spesimen tembaga 7060 dengan beban 10 kg menghasilkan tegangan 34,226 MPa, Siklus 78840 dalam waktu 59,15 menit. Pada beban 11 kg menghasilkan tegangan 37,648 MPa, Siklus 69542 dalam waktu 54,27 menit. Pada beban 12 kg menghasilkan tegangan 41,071 MPa, Siklus 47340 dalam waktu 37,47 menit. Pada beban 13 kg menghasilkan tegangan 44,494 MPa, Siklus 36254 dalam waktu 28,28menit. Pada beban 14 kg menghasilkan tegangan 47,916 MPa, Siklus 32204 dalam waktu 20,57 menit. Maka semakin bertambahnya beban, Siklus dan waktu kelelahan (*fatigue*) yang terjadi pada material Tembaga 7060 semakin cepat. Disebabkan karena bertambahnya pembebanan pada material tembaga 7060.
2. Jurnal yang berjudul “Studi Analisa Kelayakan Material Sebagai Produk Silinder Hidrolik Bucket Excavator”. Dari hasil pengujian dan perhitungan dapatt disimpulkan bahwa retak fatik berawal dari permukaan dan pembersihan

retak permukaan baik dengan permesinan atau pengamplasan memperpanjang umur fatik suatu komponen. Selain itu dari hasil penelitian ini dapat diambil manfaatnya dalam bidang perawatan mesin. Pada saat bagian yang berputar dan menerima beban fatik dilakukan perawatan atau dilakukan pemeliharaan, maka disarankan untuk dilakukan penghalusan permukaan baik dengan melakukan penggerindaan atau pengamplasan dengan tujuan menghilangkan inisiasi retak dan retak mikro yang terbentuk. Jurnal yang berjudul Setelah melakukan pengujian diketahui hubungan siklus putaran dan beban terhadap kekuatan bahan pada uji fatik bending. data hasil pengujian maka dapat ditarik kesimpulan bahwasanya:

- a) Jumlah siklus putaran tertinggi 15085,9 dengan beban 9,81 N dan Jumlah siklus putaran terendah 2199,28 dengan beban 2,34 N pada kekuatan bahan St 37. Untuk Jumlah siklus putaran tertinggi 6954,48 dengan beban 9,81 N. jumlah siklus putaran terendah 2080,4 dengan beban 29,43 N pada kekuatan bahan St 40
- b) Pada spesimen 1 menunjukkan hasil Tegangan tertinggi 2,34 N/mm² jumlah siklus 2080,4 dan Tegangan terendah 0,34 N/mm² dengan jumlah siklus 6954,48. Untuk hasil pada spesimen ke 2 menunjukkan Tegangan tertinggi 2,34 N/mm² jumlah siklus 2199,28 dan Tegangan terendah 0,34 N/mm² dengan jumlah siklus 15085,93
- c) Pada bahan uji menggunakan Baja St 37 dengan nilai kekerasan (HRC) 40,98 yang lebih memiliki jenis patah getas di bandingkan baja St 40 dengan nilai kekerasan (HRC) 39,90, yang lebih memiliki patah ulet

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

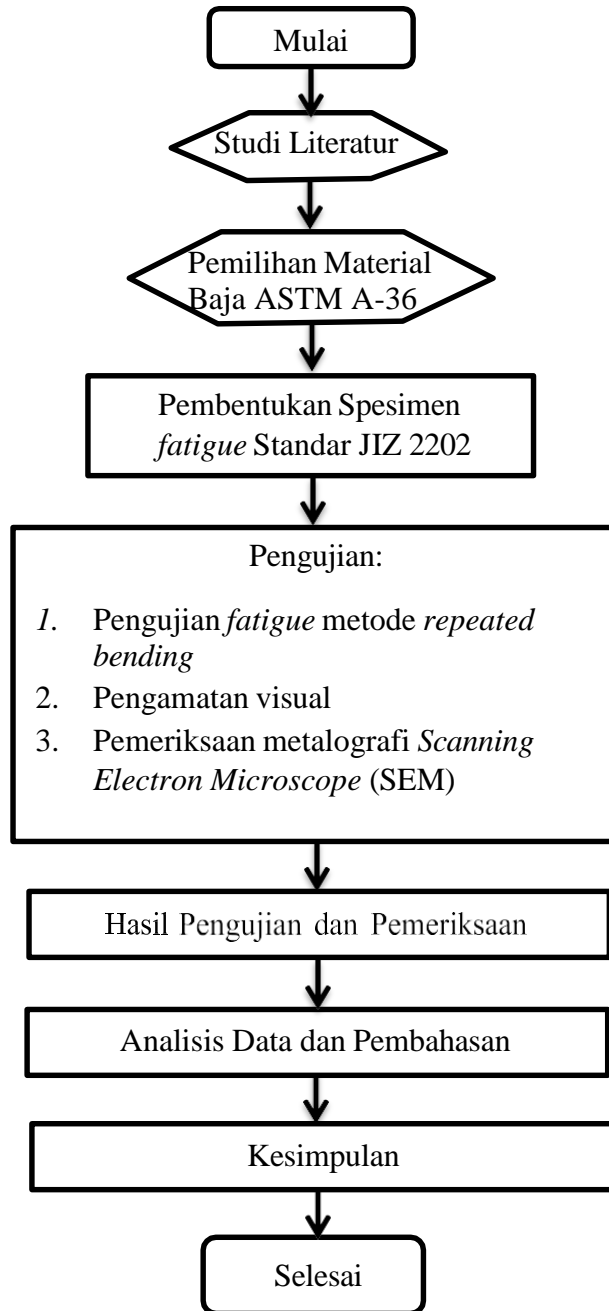
3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian menjelaskan mengenai proses pengujian dan pemeriksaan yang akan dilakukan. Diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk mengetahui penelitian - penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan penelitian baja ASTM A-36, pengujian fatik, pengamatan visul, dan pemeriksaan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian fatik pada penelitian ini menggunakan metode *repeated bending*.

Baja ASTM A-36 yang digunakan pada pengujian didapatkan dari toko *online*. Baja tersebut kemudian dibuat spesimen berdasarkan standar JIS Z 2273 untuk pengujian *fatigue bending*. Setelah spesimen tersebut dibentuk, maka akan dilakukan pengujian *fatigue bending* untuk mengamati karakteristik permukaan patahan spesimen dengan pengamatan visual menggunakan mikroskop optik untuk mengmati area pengintian retak (*Initial crack*), perambatan retak, dan patahan akhir (*Final failure*) dan pengujian fatik untuk mengetahui batas ketahanan lelah pada baja ASTM A-36.

Pada spesimen pengujian *fatigue* dengan menggunakan metode *Repeated bending*, temperature yang digunakan adalah kamar ruangan laboratorium dengan temperature 27°C. Pada pengujian *fatigue* dilakukan menggunakan variasi sudut pembebanan sebesar 1°, 2°, dan 3° yang didapat melalui perhitungan tegangan *bending* sehingga mendapatkan berupa siklus dari masing – masing sudut tersebut.

Spesimen baja ASTM A-36 yang sudah patah lelah akibat pengujian *fatigue* metode *repeated bending*. Dan setelah patah akibat pengujian *fatigue bending* kemudian permukaan patah lelah akibat pengujian *fatigue* metode *repeated bending* akan diamati melalui pengamatan visual dan pemeriksaan *Scanning Electron Microscope* (SEM) sehingga didapatkan hasil dari analisis. Penjelasan tersebut dapat dilihat melalui diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

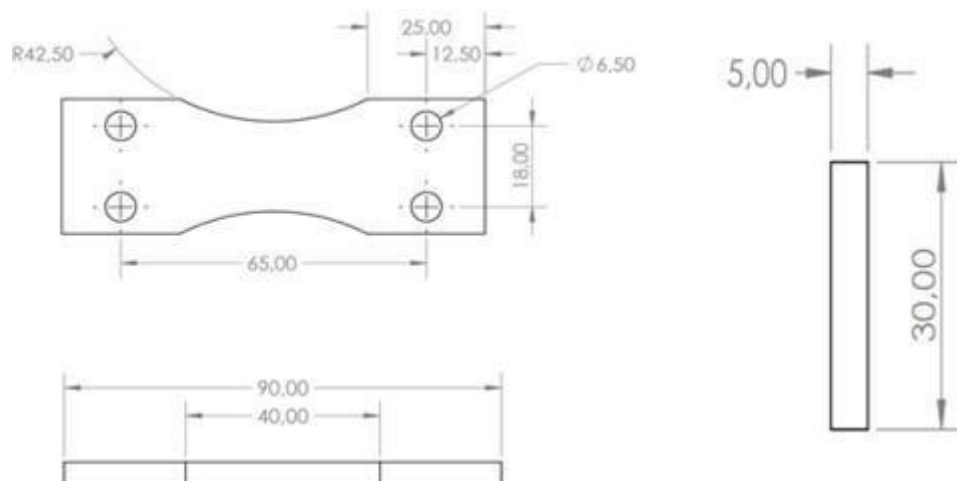
3.2 Studi literatur

Tahap pertama dalam proses penelitian yang akan dilakukan adalah studi literature mengenai hal yang berkaitan dengan pengujian *fatigue* dari penelitian sebelumnya dan literature yang relevan dengan baja ASTM A – 36 dan *Scanning Electrom Microscope*.

3.3 Persiapan Spesimen

Langkah-langkah persiapan spesimen adalah sebagai berikut.

1. Spesimen uji fatik adalah plat baja ASTM A-36 mengacu pada standarisasi ASME dengan ketebalan plat 10 mm.
2. Pemotongan dan persiapan spesimen dengan mengacu pada standar JIS Z 2273. Proses pemotongan dan pembentukan spesimen dilakukan *Gometaltech* di cikarang.



Gambar 3.2 Spesimen Uji *Fatigue Bending* berdasarkan standar JIS Z 2273

3.4 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Alat uji *fatigue*, Adapun spesifikasinya sebagai berikut :
 - Jenis : *Repeated Torsion and Bending Fatigue Testing Machine*

- Produksi negara : Japan
- *Type* : FTS-4
- Kapasitas : 2kgf.m



Gambar 3.3 *Repeated Torsion and Bending Fatigue Testing Machine*

2. Alat uji *Scanning Electron Microscope* (SEM), Adapun spesifikasinya sebagai berikut :
 - *Evo 10 MA (W)* ; *maximum specimen height: 100 mm, diameter: 230 mm*
 - *Motoeized stage travel: 80 x 100 x 35 mm*
 - *Field of View: 6 mm at Analytical Working Distance (AWD)*
 - *9 specimen sample holder*
 - *External camera sample navigator*



Gambar 3.4 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

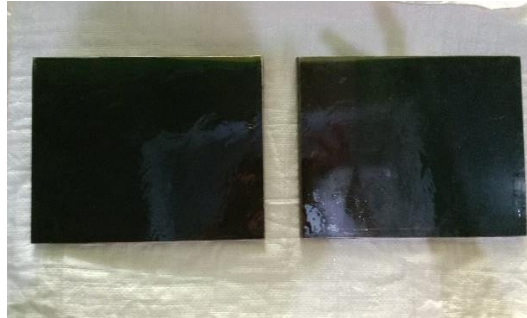
3. Stopwatch

Berfungsi sebagai alat ukur waktu pada saat pengujian.

4. Jangka sorong

Digunakan untuk mengukur dimensi spesimen.

5. Pelat baja ASTM A-36



Gambar 3.5 Plat baja ASTM A-36

Material yang digunakan pada pengujian ini adalah pelat ASTM A-36, Pelat ini dibeli di toko *online* sesuai ukuran yang dibutuhkan.

3.5 Metode Pengujian

Dalam penyusunan tesis, penelitian menggunakan metode pengujian sebagai berikut:

3.5.1 Pengujian *Fatigue Metode Repeated Bending*

Pengujian *fatigue* bertujuan untuk mendapatkan nilai ketahanan lelah baja ASTM A-36. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya dengan standar pengujian JIS Z 2202 menggunakan mesin *Torsion and Bending Fatigue Machine* yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.6 *Repeated Torsion and Bending Fatigue Testing Machine*

3.5.2 Pengamatan Visual

Pada pengamatan visual baja ASTM A-36 akan dilakukan dengan mengamati spesimen yang telah diuji *fatigue*, Hal ini bertujuan untuk jenis perpatahan dan perambatan retakan pada permukaan spesimen yang ditandai dengan adanya *Beachmark*. Pada pengujian spesimen uji *fatigue* menggunakan temperatur suhu kamar

3.5.3 Pemeriksaan Faktografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro plat baja ASTM A-36, yang dilaksanakan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi – Universitas Lampung, Kota Bandar Lampung.

Langkah – langkah pengujian metalografi adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan specimen yang akan di uji.
2. Memotong spesimen sesuai ukuran pada mesin foto pengujian SEM.
3. Melakukan coating pada permukaan specimen yang akan di uji dengan emas (Au).
4. Meletakkan spesimen yang sudah siap diuji kedalam mesin foto pengujian SEM.
5. Melakukan pengujian.



Gambar 3.7 Scanning Electron Microscope (SEM)

3.6 Komposisi Kimia Baja ASTM A-36

Komposisi kimia dari baja ASTM A-36 dalam penelitian ini berdasarkan spesifikasi *mill certificate* yang diproduksi oleh Seah Besteel Corp ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Komposisi kimia baja ASTM A-36 (% berat)

Komposisi	C	Si	Mn	P	S
(% berat)	0,20	0,24	1,067	0,025	0,024

3.7 Mechanical Properties Baja ASTM A-36

Tabel 3.2 merupakan tabel sifat mekanik dari baja ASTM A-36 yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan spesifikasi *mill certificate* yang diproduksi oleh Seah Besteel Corp.

Tabel 3.2 Sifat mekanik baja ASTM A-36

Sifat Mekanik	Simbol	Nilai
<i>Yield Strength</i> (MPa)	σ_y	245-300
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	σ_t	420-440
<i>Elongation</i> (%)	E	27-30

3.8 Penentuan Pembebanan Pada Pengujian *Fatigue*

Pembebanan pada pengujian *fatigue* dapat diprediksi dengan menghitung tegangan bending yang nilainya harus lebih kecil dari nilai *yield strength*, dalam hal ini tegangan yang terjadi masih di dalam kondisi elastis. Berdasarkan Tabel 3.3 nilai *yield strength* dari baja ASTM A-36 sebesar 245 MPa, sehingga tegangan bending untuk pengujian *fatigue* harus lebih kecil dari 245 MPa.

3.8.1 Momen Lentur

Untuk menghitung tegangan bending, dihitung terlebih dahulu momen lentur menggunakan Persamaan 3.3.

$$M = \frac{\theta}{\theta \text{ maks}} \times r \quad 3.1$$

Di mana:

θ = Sudut pembebanan ($^{\circ}$)

$\theta \text{ maks}$ = Pembebanan maksimum (15°)

r = *Repeating moment* (2 kgf.m = 19613,3 Nmm)

Sehingga momen lentur dari masing-masing sudut pembebanan untuk pengujian *fatigue* adalah sebagai berikut.

Momen lentur pada sudut 1°

$$M = \frac{1}{15} \times 19613,3 = 1307,55 \text{ Nmm}$$

Momen lentur pada sudut 2°

$$M = \frac{2}{15} \times 19613,3 = 2615,10 \text{ Nmm}$$

Momen lentur pada sudut 3°

$$M = \frac{3}{15} \times 19613,3 = 3992,66 \text{ Nmm}$$

3.8.2 Tegangan Bending (σ_b)

Perhitungan tegangan bending pada pengujian *fatigue* metode *repeated bending* menggunakan Persamaan 3.4.

$$\sigma_b = \frac{M \times y}{I} \quad 3.2$$

Di mana:

σ_b	= Tegangan bending	(MPa)
M	= Momen lentur	(Nmm)
y	= Setengah dari ketebalan plat uji (1/2 t)	(mm)
I	= Momen inersia benda uji	(mm ⁴)

Momen inersia dapat dihitung melalui Persamaan 3.5.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad 3.3$$

Di mana:

b	= Lebar spesimen	(mm)
h	= Tinggi spesimen	(mm)

Maka besarnya momen inersia pada spesimen pengujian *fatigue* JIS Z 2202 adalah sebagai berikut.

$$I = \frac{30 \text{ mm} \times (5 \text{ mm})^3}{12}$$

$$= 312,5 \text{ mm}^4$$

Sehingga tegangan bending pada masing-masing sudut pembebanan adalah sebagai berikut:

Tegangan bending pada sudut 1°

$$\sigma_b = \frac{1307,55 \text{ Nmm} \times 2,5 \text{ mm}}{312,5 \text{ mm}^4} = 10,46 \text{ MPa}$$

Tegangan bending pada sudut 2°

$$\sigma_b = \frac{2615,10 \text{ Nmm} \times 2,5 \text{ mm}}{312,5 \text{ mm}^4} = 20,92 \text{ MPa}$$

Tegangan bending pada sudut 3°

$$\sigma_b = \frac{3992,66 \text{ Nmm} \times 2,5 \text{ mm}}{312,5 \text{ mm}^4} = 31,94 \text{ MPa}$$

Tabel 3. 3 Data pembebanan pengujian *fatigue* metode *repeated bending* pada baja ASTM A-36

Sudut	Momen Lentur (Nmm)	Tegangan (MPa)
1°	1307,55	10,46
2°	2615,10	20,92
3°	3992,66	31,94

3.9 Waktu dan Tempat

Pada penelitian pengujian *fatigue* metode *repeated bending* dilakukan di Laboratorium Teknik mesin Universitas Sriwijaya, dan penelitian pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi – Universitas Lampung.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian Fatik

Data hasil pengujian ini didapat setelah melakukan pengujian fatik di Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya menggunakan mesin *Repeated Torsion and Bending Fatigue Testing Mesin*.

Tabel 4.1 Data hasil pengujian *fatigue*

Sampel	<u>Sudut Lendutan</u>	Waktu Fatik (Detik)
Sampel 1	1°	2700
Sampel 2	2°	1680
Sampel 3	3°	600

Setelah mengetahui data dari pengujian fatik, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mengetahui siklus dan tegangan yang terjadi pada Baja ASTM A-36 berdasarkan sudut yang telah ditentukan. Spesifikasi mesin uji fatik dilaboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya yaitu:

$$N = t \times n \qquad 4.1$$

4.1.1 Perhitungan Siklus

Untuk siklus pada speimen dengan pembebanan sudut 1°

$$N = \text{Waktu fatik (menit)} \times \text{Putaran (rpm)}$$

$$N = 45 \text{ (menit)} \times 3000 \text{ rpm}$$

$$N = 135000 \text{ siklus}$$

Untuk siklus pada spesimen dengan pembebanan sudut 2°

$$N = \text{Waktu fatik (menit)} \times \text{Putaran (rpm)}$$

$$N = 28 \text{ (menit)} \times 3000 \text{ rpm}$$

$$N = 84000 \text{ siklus}$$

Untuk siklus pada spesimen dengan pembebanan sudut 3°

$$N = \text{Waktu fatik (menit)} \times \text{Putaran (rpm)}$$

$$N = 10 \text{ (menit)} \times 3000 \text{ rpm}$$

$$N = 30000 \text{ siklus}$$

Jadi untuk nilai siklus pengujian *fatigue* Baja ASTM A-36 pada sudut lengkung 1° spesimen yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 45 menit atau 2700 detik mendapatkan siklus sebesar 135000 siklus, pada sudut lengkung 2° spesimen yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 28 menit atau 1680 detik mendapatkan siklus sebesar 84000 siklus, pada sudut lengkung 3° spesimen yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 10 menit atau 600 detik mendapatkan siklus sebesar 30000 siklus. Untuk nilai siklus pada lengkungan 1° , 2° , dan 3° dihitung dengan persamaan yang sama.

4.1.2 Perhitungan Sudut

Sudut 1°

$$\theta = \frac{1\pi}{180} = 0,0174 \text{ rad}$$

Sudut 2°

$$\theta = \frac{2\pi}{180} = 0,0349 \text{ rad}$$

Sudut 3°

$$\theta = \frac{3\pi}{180} = 0,0523 \text{ rad}$$

4.1.3 Momen Lentur

Untuk menghitung tegangan bending, dihitung terlebih dahulu momen lentur menggunakan Persamaan 3.3.

$$M = \frac{\theta}{\theta \text{ maks}} \times r \quad 4.2$$

Di mana:

$$\begin{aligned} \theta &= \text{Sudut pembebanan} && (\text{°}) \\ \theta \text{ maks} &= \text{Pembebanan maksimum} && (15\text{°}) \\ r &= \text{Repeating moment} && (2 \text{ kgf.m} = 19613,3 \text{ Nmm}) \end{aligned}$$

Sehingga momen lentur dari masing-masing sudut pembebanan untuk pengujian *fatigue* adalah sebagai berikut.

Momen lentur pada sudut 1°

$$M = \frac{1}{15} \times 19613,3 = 1307,55 \text{ Nmm}$$

Momen lentur pada sudut 2°

$$M = \frac{2}{15} \times 19613,3 = 2615,10 \text{ Nmm}$$

Momen lentur pada sudut 3°

$$M = \frac{3}{15} \times 19613,3 = 3992,66 \text{ Nmm}$$

4.1.4 Perhitungan Tegangan Bending (σ_b)

Berdasarkan nilai-nilai yang didapat dari perhitungan di atas, maka nilai pengujian *fatigue* pada baja ASTM A-36 ditunjukkan dalam Tabel 4.2. Dari hasil yang ditunjukkan bahwa semakin besar pembebanan sudut maka siklus patah semakin kecil. Hal ini dikarenakan tegangan kerja yang terjadi berbanding lurus dengan sudut yang diberikan pada pengujian ketahanan lelah/*fatigue*.

Perhitungan tegangan bending pada pengujian *fatigue* metode *repeated bending* menggunakan Persamaan 3.4.

$$\sigma_b = \frac{M \times y}{I} \quad 4.3$$

Di mana:

σ_b	= Tegangan bending	(MPa)
M	= Momen lentur	(Nmm)
y	= Setengah dari ketebalan plat uji (1/2 t)	(mm)
I	= Momen inersia benda uji	(mm ⁴)

Momen inersia dapat dihitung melalui Persamaan 3.5.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad 4.4$$

Di mana:

b	= Lebar spesimen	(mm)
h	= Tinggi spesimen	(mm)

Maka besarnya momen inersia pada spesimen pengujian *fatigue* JIS Z 2202 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} I &= \frac{30 \text{ mm} \times (5 \text{ mm})^3}{12} \\ &= 312,5 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Sehingga tegangan bending pada masing-masing sudut pembebanan adalah sebagai berikut:

Tegangan bending pada sudut 1°

$$\sigma_b = \frac{1307,55 \text{ Nmm} \times 2,5 \text{ mm}}{312,5 \text{ mm}^4} = 10,46 \text{ MPa}$$

Tegangan bending pada sudut 2°

$$\sigma_b = \frac{2615,10 \text{ Nmm} \times 2,5 \text{ mm}}{312,5 \text{ mm}^4} = 20,92 \text{ MPa}$$

Tegangan bending pada sudut 3°

$$\sigma_b = \frac{3992,66 \text{ Nmm} \times 2,5 \text{ mm}}{312,5 \text{ mm}^4} = 31,94 \text{ MPa}$$

4.2 Data Hasil Perhitungan Pengujian *Fatigue*

Data hasil perhitungan pengujian ini didapat setelah melakukan pengujian *fatigue* metode *repeated bending* di Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya. Menggunakan mesin *Repeated Torsion and Bending Fatigue Testing Mesin*.

Tabel 4.2 Hasil pengujian *fatigue* spesimen baja ASTM A-36

Sudut	Waktu (detik)	Putaran (rpm-rps)	Siklus	Tegangan (MPa)
1°	2700	3000-50	135000	10,46
2°	1680	3000-50	84000	20,92
3°	600	3000-50	30000	31,94

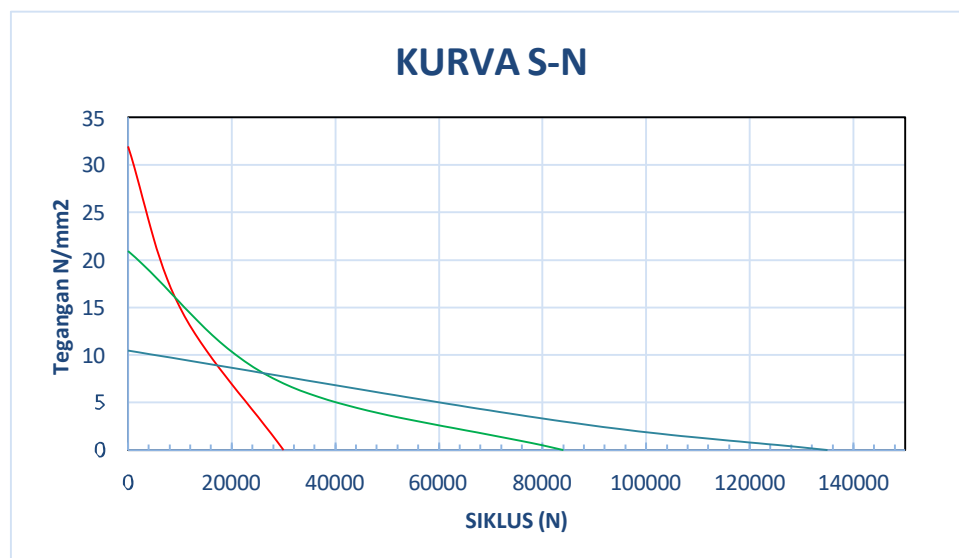
Berdasarkan hasil dari data perhitungan pengujian *fatigue* yang telah didapat pada pengujian spesimen Baja ASTM A-36 yang memiliki nilai siklus tertinggi yaitu pada spesimen dengan sudut 1° yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 45 menit atau 2700 detik dengan kecepatan putaran 3000 rpm mendapatkan siklus sebesar 135000 siklus dan tegangan 10,46 MPa, sedangkan pada spesimen dengan sudut 2° yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 28 menit atau 1680 detik dengan kecepatan putaran 3000 rpm mendapatkan siklus sebesar 84000 siklus dan tegangan 20,92 MPa, serta nilai siklus terendah terdapat pada spesimen dengan sudut 3° yang

patah *fatigue* dalam rentang waktu 10 menit atau 600 detik dengan kecepatan putaran 3000 rpm mendapatkan siklus sebesar 30000 siklus dan tegangan 31,94 MPa.

Hasil pengujian *fatigue* pada masing-masing spesimen yang mempunyai variasi sudut pembebanan didapatkan hasil siklus dan tegangan yang kemudian dirumuskan ke dalam kurva S-N pengujian *fatigue* sehingga dapat dilihat batas lelah dari spesimen tersebut. Kurva S-N pada pengujian *fatigue* ASTM A-36 ditunjukkan pada Gambar 4.3.

4.3 Kurva S-N

Dari data hasil perhitungan pengujian *fatigue* atau patah lelah yang telah dilakukan diketahui Siklus yang terjadi (N) dan Tegangan (N/mm^2) untuk masing-masing spesimen, kemudian data diplot kedalam kurva S-N pengujian *fatigue* untuk mengetahui batas lelah kekuatan material. Setelah mendapatkan hasil pengujian *fatigue* yang dilakukan terhadap specimen didapat data dalam bentuk Kurva S-N yang terlihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Kurva S-N Spesimen ASTM A – 36

Dari Kurva S-N data hasil perhitungan pengujian *fatigue* atau Lelah pada Baja ASTM A – 36 di atas, dapat dilihat perbandingan antara siklus dengan tegangan. Pada grafik Kurva S-N diatas menunjukkan bahwa garis warna merah

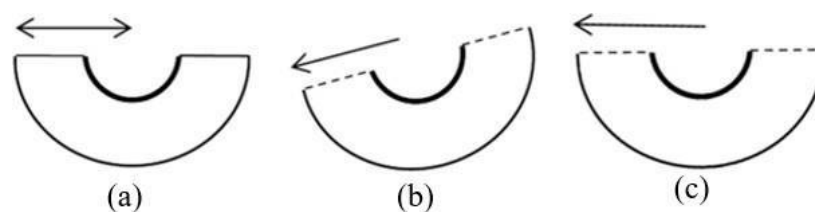
mempunyai tegangan 31,94 MPa mendapatkan siklus sebesar 30000 siklus, garis warna hijau mempunyai tegangan lebih rendah yaitu 20,92 MPa mendapatkan siklus sebesar 84000 siklus, lebih besar nilai daripada garis berwarna merah. Garis berwarna biru mempunyai tegangan 10,64 MPa dengan siklus paling tinggi yakni mendapatkan siklus sebesar 135000 siklus. Jadi semakin kecil tegangan yang diberikan pada specimen maka semakin besar nilai siklus yang didapat, begitupun sebaliknya jika semakin besar tegangan yang diberikan pada specimen maka semakin kecil nilai siklus yang didapat.

4.4 Pengamatan Visual Permukaan Patah Pengujian *Fatigue*

Karakteristik permukaan patah specimen pengujian *fatigue* metode *repeated bending* dengan variasi pembenanan sudut 1° , 2° , dan 3° pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.3 s/d 4.5.

Callister dan Rethwisch (2008) menjelaskan bahwa permukaan patah terdiri dari tiga tahap yaitu tahap pengintian retak, tahap area, dan tahap patah akhir. Permukaan patah *fatigue* ditandai oleh permukaan yang rata dan halus sedangkan permukaan patah akhir yang merupakan patah statis dicirikan dengan bentukpatah yang terdeformasi plastis.

Pengujian *fatigue* metode *repeated bending* pada penelitian ini menggunakan mesin dengan rasio tegangan sama dengan nol. Hal tersebut dapat dilihat dari pergerakan anvil specimen yang bergerak ke bawah (posisi negatif) menuju ke posisi netral (nol) seperti pada gambar skematik Gambar 4.2.

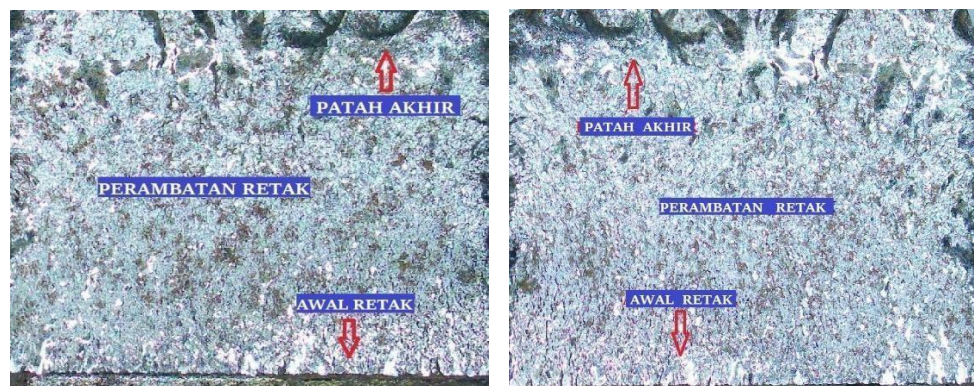


Gambar 4.2 (a). Posisi pembebanan pada saat diam; (b). Posisi pembebanan bergerak turun; (c). Posisi pembebanan bergerak naik ke posisi netral

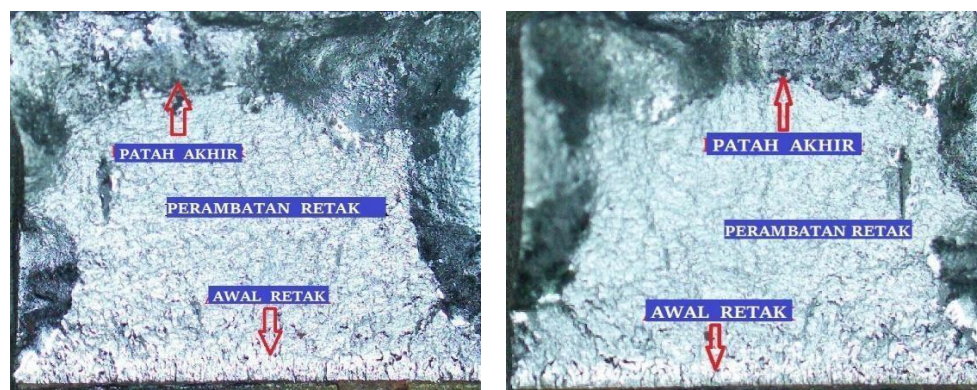
Chandra (2023) menyatakan jika pemeriksaan permukaan patah *fatigue* berupa pengamatan struktur makro tidak begitu jelas mendapatkan karakteristik patah

lelah berupa *beach mark* jika pengujian dilakukan pada kondisi rasio tegangan sama dengan nol ($R = 0$) sedangkan *beach mark* akan tampak lebih jelas jika pengujian *fatigue* dilakukan pada rasio tegangan $R = -1$. Namun, hal tersebut tidak mengurangi bukti adanya permukaan patah lelah dengan indikasi seperti yang dijelaskan sebelumnya.

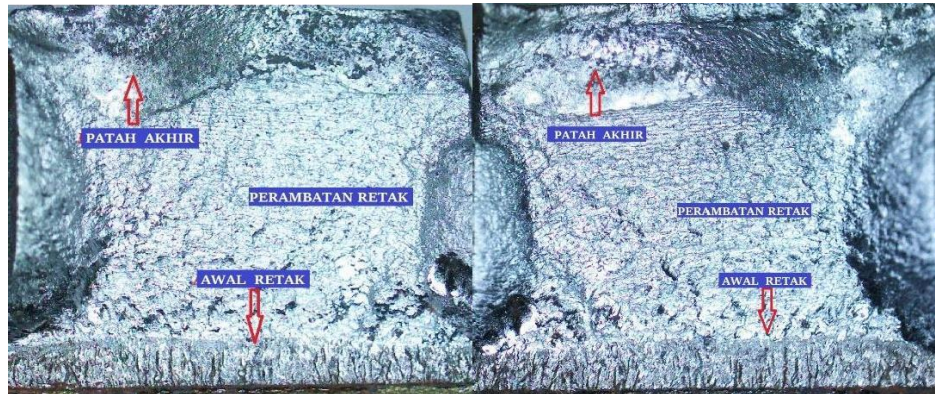
Pada Gambar 4.3 dengan pembebanan sudut 1° perambatan retak tampak lebih luas karena tegangan dan pembebanan sudut yang lebih kecil sehingga jumlah siklus yang dihasilkan akan lebih besar dan perambatan retak akan lebih lama, sedangkan pada Gambar 4.5 dengan pembebanan sudut 3° menghasilkan nilai siklus terkecil yang mengakibatkan perambatan retak berlangsung cepat sehingga perambatan retaknya lebih sedikit.



Gambar 4.3 Hasil pengamatan makro permukaan patah spesimen uji *fatigue* dengan pembebanan sudut 1°



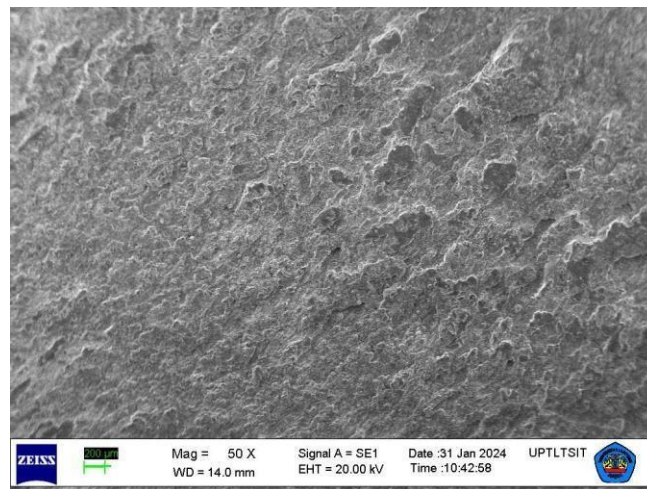
Gambar 4.4 Hasil pengamatan makro permukaan patah spesimen uji *fatigue* dengan pembebanan sudut 2°



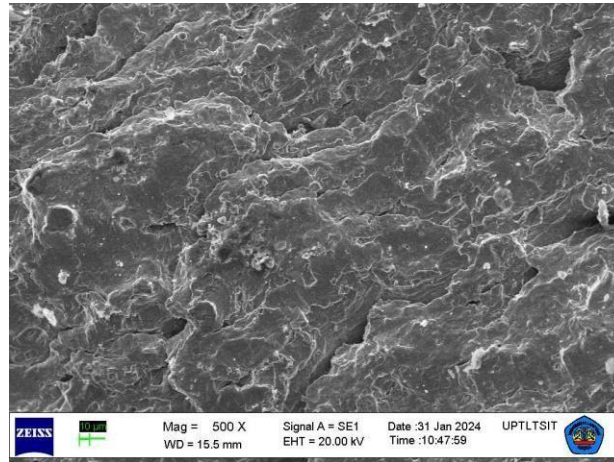
Gambar 4.5 Hasil pengamatan makro permukaan patah spesimen uji *fatigue* dengan pembebanan sudut 3°

4.5 Hasil *Scanning Electron Microscope (SEM)*

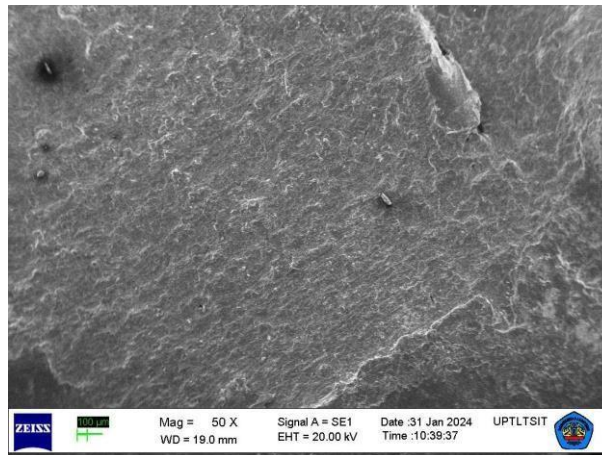
Pengamatan *Scanning Electron Microscope* dilakukan untuk mencari bukti penyebab kegagalan dan mengamati karakteristik pola patahan yang terbentuk setelah spesimen mengalami kegagalan. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.



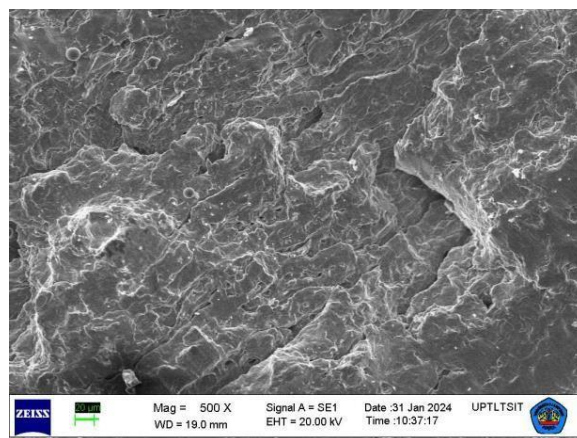
Gambar 4.6 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* pembesaran 50x pada *initial crack* pada permukaan spesimen 1°



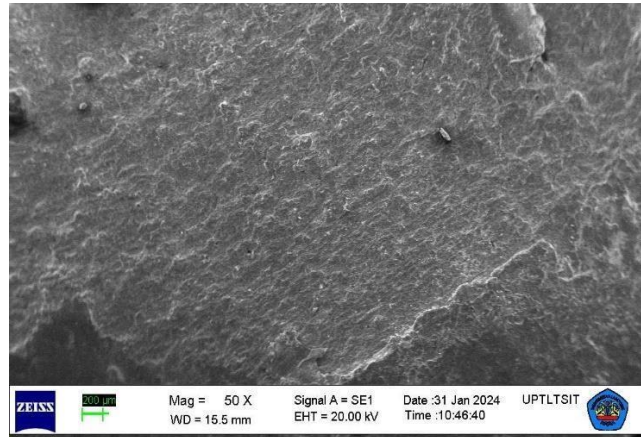
Gambar 4.7 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* pembesaran 500x pada perambatan retak pada permukaan spesimen 1°



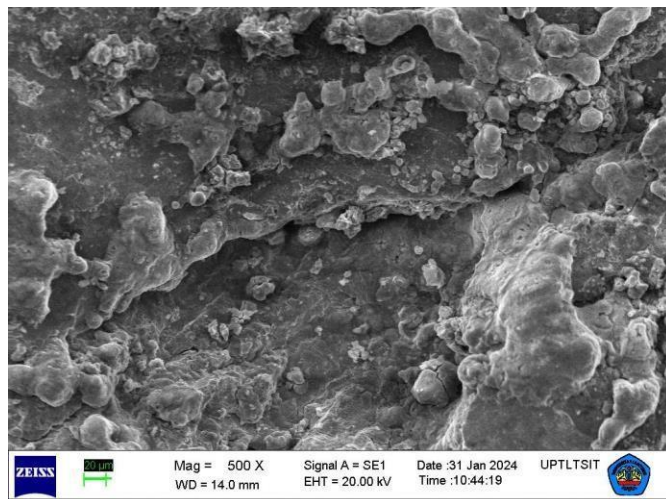
Gambar 4.8 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* pembesaran 50x pada *initial crack* pada permukaan spesimen 2°



Gambar 4.9 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* pembesaran 500x pada perambatan retak pada permukaan spesimen 2°



Gambar 4.10 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* pembesaran 50x pada *initial crack* pada permukaan spesimen 3°



Gambar 4.11 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* pembesaran 500x pada perambatan retak pada permukaan spesimen 3°

4.6 Analisis Hasil Data dan Pembahasan

Hasil yang diperoleh pada pengujian *fatigue*, semakin besar pembebanan sudut maka didapatkan nilai siklus yang semakin besar. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian *fatigue* pada pembebanan sudut 1° yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 45 menit atau 2700 detik dengan kecepatan putaran 3000 rpm mendapatkan siklus sebesar 135000 siklus dan tegangan 10,46 MPa, sedangkan pada spesimen dengan sudut 2° yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 28 menit atau 1680 detik dengan kecepatan putaran 3000 rpm mendapatkan siklus sebesar 84000 siklus dan tegangan 20,92 MPa, serta nilai siklus terendah terdapat pada spesimen dengan sudut 3° yang patah *fatigue* dalam rentang waktu 10 menit atau 600 detik dengan kecepatan putaran 3000 rpm mendapatkan siklus sebesar 30000 siklus dan tegangan 31,94 MPa. Dari hasil pengamatan makro pada spesimen baja ASTM A – 36, Pola perpatahan spesimen pada pembebanan sudut yang berbeda memiliki pola yang berbeda. Dimulai dari awal retak, perambatan retak, dan patah akhir. Perbedaan terjadi pada awal retak, perambatan retak, dan patah akhir di mana pada spesimen dengan pembebanan sudut 1° daerah perambatan retaknya terlihat cenderung lebih kecil daripada daerah patah akhir dikarenakan pada pembebanan tersebut siklus yang dihasilkan merupakan siklus yang terbesar. Jika dibandingkan dengan spesimen yang diberikan sudut 2° daerah perambatan retak akan sedikit lebih kecil dan daerah patah akhir akan sedikit lebih luas. Begitu juga seterusnya pada pembebanan sudut 3° . Hal ini disebabkan karena pada sudut yang lebih besar beban dan getaran yang diterima oleh spesimen akan semakin besar yang dapat menyebabkan lebih cepat proses patah daripada spesimen.

Berdasarkan pengamatan hasil pada pengujian faktografi menggunakan *Scanning Electron Magnetic (SEM)* pada spesimen baja ASTM A – 36 dengan pembesaran 50x pada *Initial crack* terjadi pembentukan pola yang beraturan pada spesimen sudut 1° diikuti juga dengan spesimen sudut 2° , dan 3° . Dengan pembesaran 500x pada spesimen dengan sudut 1° , 2° , dan 3° perambatan retak dapat dilihat dari tanda striasi yang dihasilkan pada permukaan patahan yang menunjukkan pertumbuhan retak fatik secara bertahap dengan bantuan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

Pada gambar 4.7 Hasil dari pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dengan pembesaran 500x pada perambatan retak permukaan 1° menghasilkan permukaan yang dibentuk dari ferrit (berwarna putih) dan pearlite (berwarna hitam) saat fase austenite pada pembesaran 500x matriks yang mendominasi dalam permukaan material yaitu pearlite. Pada gambar 4.9 Hasil dari pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dengan pembesaran 500x pada perambatan retak permukaan 2° didapatkan grafit yang cenderung halus mengikuti pola dari pearlite menghasilkan sementit yang sedikit terdapat pada ferrit (berwarna putih) dan pearlite (berwarna hitam). Pearlite yang mendominasi di dalam struktur mikropada permukaan yang menyebabkan pearlite halus dan kasar kemudian menghasilkan garis butir yang muncul di area sekitar sehingga membuat terjadinya ferrit. Pada gambar 4.11 Hasil dari pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dengan pembesaran 500x pada perambatan retak permukaan 3° didapatkan grafit yang cenderung membulat dikelilingi fasa ferrit dan pearlite, jumlah yang terbentuk hanya beberapa bagian. Untuk fasa pearlite sangat mendominasi dari Sebagian besar struktur yang dihasilkan yaitu pearlite kasar dan halus.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian hasil pengujian dan pemeriksaan yang dilakukan pada penelitian ini, dapat menghasilkan beberapa kesimpulan berikut:

1. Semakin besar pembebanan sudut maka tegangan yang dihasilkan semakin besar, sedangkan siklus yang dihasilkan akan semakin kecil. Dapat dilihat dari struktur makro yang didapat, pola yang dihasilkan dari setiap spesimen memiliki pola yang berbeda.
2. Setelah melakukan pengujian pada spesimen Baja ASTM A - 36, model kegagalan yang terjadi yaitu kegagalan *fatigue* atau spesimen mengalami kelelahan karena fluktuasi beban dinamis yang berulang-ulang, yang ditandai dengan adanya *initial crack*, perambatan retak yang lambat dan daerah patah mendadak di area patah akhir pada pengamatan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya diharapkan agar memberikan perlakuan panas pada spesimen sebelum diuji agar dapat dilihat perbedaan hasil daripada pengujian.

DAFTAR RUJUKAN

- Amiruddin, A., Lubis, F.A. 2018. Analisa Pengujian Lelah Material Tembaga Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Medan.
- Anderson, T. (2005). Fracture Mechanics Fundamentals and Applications 3rd Edition. Taylor & Francis Group.
- ASME BPVC IX (2019). Welding, Brazing, and Fusing Qualifications. An International Code Two Park Avenue: New York.
- ASME BPVC XII (2019). Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks. An International Code Two Park Avenue: New York.
- Broek D., 1986, *Elementary Engineering Fracture Mekhanics*, Martinus Nijhoff Publisher, Dodrect, Nederland.
- Cabrilo A., & Geric K. (2018). Fracture Mechanic and Charpy Impact Properties of a Crack in Weld Metal, HAZ and Base Metal of Welded Armor Steel. Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi sad 2100, Serbia.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2008). Materials Science and Engineering - An Introduction 8th Edition.
- Callister, W. dan Rethwisch, D. (2008). Materials Science and Engineering An Introduction, Journal of Materials Science. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1007/BF01184995
- Chandra, H. (2023) Mekanika Retak Kondisi Linear Elastis. Edisi ke-1. Palembang: Unsri Press.
- Chandra, H., Nukman dan Sianturi, B. (2019) Analysis of Fatigue Life and Crack Propagation Characterization of Gray Cast Iron under Normalizing Process, Journal of Physics: Conference Series, 1198(3). doi:10.1088/1742-6596/1198/3/032006.
- Dieter, George E. 1986. Mechanical metallurgy, Jakarta: Erlangga.
- Diharjo, K. (1996). "Karakteristik Laju Perambatan Retak pada Plat Alumunium 6061 T6", Skripsi Teknik Mesin FT UGM, Yogyakarta
- Griffin, H. dan Riessen, V. A. 1991. *Scanning Electron Microscopy Course Notes*. The University of Western Australia, Nedlands, P. 1-8.
- McMullan, D. 1988. Von Ardenne and The Scanning Electron Microscopy. Proc Roy Micrisc. USA. Vol. 23. P. 283-288.
- Nukman. (2013). Petunjuk Praktikum Material Teknik. Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.

- Qulub. 2011. Scanning Electron Microscope dan Energi Dispersive X-Ray Spectroscopy(SEM-EDS)<http://www.Munawirul-q.blogspot.com/2011/031>. Diakses tanggal 23 Desember 2023, pukul 20.00 WIB.
- Reed, S. J. B. 1993. Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. Cambridge University Press, Florida. P. 23-24.
- Schmieg, S. 2012. Scanning Electron Microscopy. <http://sebastian-schmieg.Blogspot.com/2012/07/scanning-electron-microscopy.html>. Diakses pada tanggal 1 Desember 2023 pukul 20.15 WIB.
- Shirley SL, Hiroomi HOMMA. (2007). Approach to Dynamic Fracture Toughness of GFRP from Aspect of Viscoelastic and Debonding Behaviors, Vol. 1 No 3.
- Soedarmadji W. (2019). Pengujian Impact dan Mikrostruktur Terhadap Baja Per Daun dengan Media Pendingin Oli dan Air. Cyber-Tech Vol, 13, No. 2. Universitas Yudharta Pasuruan.
- Syam B, Kouji Nakazato, and Hiroomi Homma. (1999.). Dynamic Fracture Toughness and Damage Mechanicisms of GFRP Subjected to ShortPulse Stress Intensity, Proc. 3rd Internasional Symposium on Impact Engineering, Singapore, pp 172- 177.
- Syam B, Nayan, A, (1999). Klarifikasi Retak Pelat Plaster Disebabkan Beban Impak Menggunakan MSC/Nastran, Proceeding, Regional Seminar on Numerical Analysis in Engeneering (NAE).

LAMPIRAN



SeAH Besteel Corp.
1-6, SORYONG-DONG, KUNSAN,
CHEONGBUK, KOREA(573-711)

MILL CERTIFICATE

TEL : +82-(0)63-460-8572. 8318(OA)
+82-(0)63-460-8114(Repres.)
FAX : +82-(0)63-460-8423 Page(0/0)

Date : 2018-04-20
Cert. No. : 201804-207465
Customer : RIZQI BAROKAH STEEL
Heat No. : 273301

Steel Grade : AISI 1018/ASTM A36
Shape of Product : Plate Bar
Delivery Condition : Plate Rolled
Size (mm) : 6 X 1200
Length (mm) : 2,400
Weight (kg) : 138
Quantity(pcs) : 1,000

Inspection Items		Chemical Composition (wt. %)				
		C	SI	MN	P	S
		x 100	x 100	x 100	x 1000	x 1000
Spec.	Min.	15	20	0.85		
	Max.	20	24	1.067	0.016	0.021
	Result	20	24	1.067	0.025	0.024
Inspection Items		Product Hardness (HB)				
		SURFACE				

Mechanical Properties AISI 1018/ASTM A36

Mechanical Properties	Symbol	Steel
Yield strength (MPa)	<i>S_y</i>	245 - 300
Tensile strength (MPa)	<i>S_t</i>	420 - 440
Elongation (%)		27 - 30

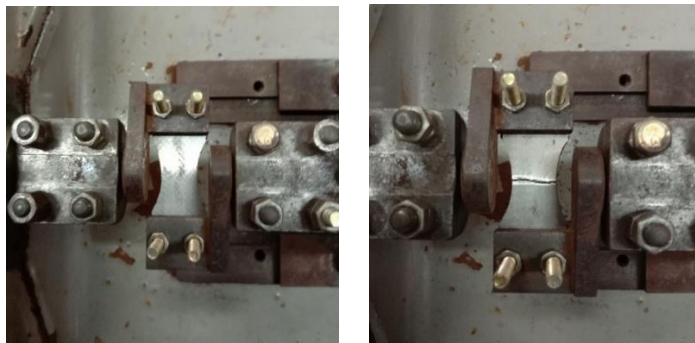
Lampiran 1 Mill certificate Baja ASTM A – 36



Lampiran 2 Mesin uji *fatigue*



Lampiran 3 spesimen pengujian *Fatigue*



Lampiran 4 proses pengujian *Fatigue*



Lampiran 3 spesimen *Fatigue* setelah pengujian