

**PENGARUH *AUSTEMPERING* BAJA AISI 4140 TERHADAP  
PERAMBATAN RETAK FATIK**

**(Skripsi)**

**Oleh:**

**REZA ANNISA AINNAYAH  
NPM 1815021057**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**

**PENGARUH *AUSTEMPERING* BAJA AISI 4140 TERHADAP  
PERAMBATAN RETAK FATIK**

**Oleh**

**REZA ANNISA AINNAYAH**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**

## ABSTRAK

### PENGARUH *AUSTEMPERING* BAJA AISI 4140 TERHADAP PERAMBATAN RETAK FATIK

Oleh

REZA ANNISA AINNAYAH

Baja AISI 4140 diberi perlakuan *austempering* pada temperatur 362 °C dengan penahanan selama 60 menit. Uji tarik dilakukan untuk mengetahui perubahan kekuatan tarik dan uji perambatan retak fatik menggunakan spesimen *Compact Tension* (CT) untuk mengetahui laju perambatan retak fatik. Hasil uji tarik menunjukkan tegangan luluh meningkat sebesar 8,7 % dan energi regangan elastis sebesar 55,7 % dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan. Data panjang retak dan jumlah siklus dianalisis menggunakan metode *polynomial incremental* untuk menentukan laju perambatan retak fatik ( $da/dN$ ) dan kisaran faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ). Plot data  $da/dN$  vs  $\Delta K$  dilakukan untuk menentukan koefisien persamaan Paris pada daerah perambatan retak stabil - stage II. Nilai konstanta  $m = 3,16$  baja *austempering* lebih rendah dibandingkan nilai  $m = 3,81$  baja tanpa perlakuan. Sebaliknya nilai konstanta  $C = 4,12 \times 10^{-13}$  baja *austempering* relatif lebih tinggi satu order dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan  $C = 4,15 \times 10^{-12}$ . Penurunan laju perambatan retak fatik baja *austempering* dapat dikaitkan dengan struktur mikro bainit yang lebih halus.

**Kata Kunci** : baja AISI 4140, *austempering*, bainit, perambatan retak fatik, faktor intensitas tegangan.

## **ABSTRACT**

### **EFFECT AUSTEMPERING OF AISI 4140 STEEL AGAINST FATIGUE CRACK GROWTH**

**By**

**REZA ANNISA AINNAYAH**

*AISI 4140 steel was heat-treated by austempering process at 362 °C for 60 minutes holding time. Tensile test was carried out to determine changes in tensile strength and fatigue crack growth test using compact tension (CT) specimen was performed to determine the rate of fatigue crack growth. The results of the tensile test showed that the yield stress increased by 8.7 % and the elastic strain energy by 55.7 % compared to untreated steel. Crack length and number of cycles data were analyzed using the incremental polynomial method to determine the fatigue crack growth rate ( $da/dN$ ) and the range of stress intensity factor ( $\Delta K$ ). Plot of  $da/dN$  vs  $\Delta K$  data was constructed for determining the Paris's law equation coefficients in the stable crack growth area - stage II. The constant value  $m = 3.16$  of austempering steel is lower than that of the value of  $m = 3.81$  of untreated steel. On the other hand, the constant  $C = 4,12 \times 10^{-13}$  for austempering steel is one order higher than that of untreated steel  $C = 4,15 \times 10^{-12}$ . The decrease in the fatigue crack growth rate of austempered steel can be attributed to formation of fine bainite structures.*

**Keywords :** *AISI 4140 steel, austempering, bainite, fatigue crack growth, intensity stress factor.*

Judul Skripsi : **PENGARUH AUSTEMPERING BAJA AISI 4140 TERHADAP PERAMBATAN RETAK FATIK**

Nama Mahasiswa : **REZA ANNISA AINNAYAH**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1815021057**

Program studi : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

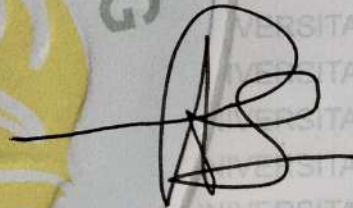
**MENYETUJUI**

Komisi Pembimbing 1



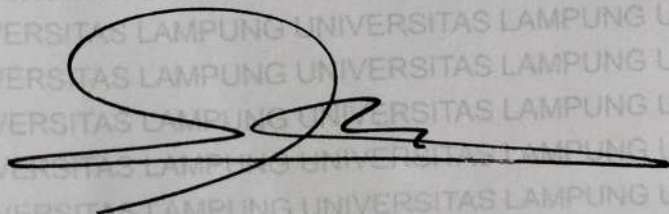
**Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.**  
NIP. 1972121119988031002

Komisi Pembimbing 2



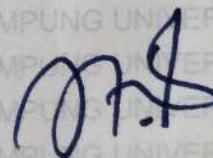
**Zulhanif, S.T., M.T.**  
NIP. 197304022000031002

Ketua Jurusan  
Teknik Mesin



**Dr. Amrul, S.T., M.T.**  
NIP. 197103311999031003

Ketua Program Studi S1  
Teknik Mesin



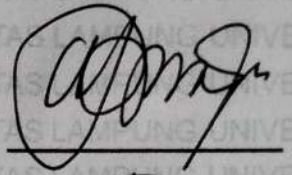
**Novri Tanti, S.T., M.T.**  
NIP. 197011041997032001



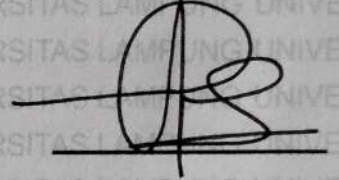
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

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



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **29 November 2022**



## PERNYATAAN PENULIS

Skripsi dengan judul “PENGARUH *AUSTEMPERING* BAJA AISI 4140 TERHADAP PERAMBATAN RETAK FATIK” dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 12 Desember 2022

Yang membuat pernyataan



Reza Annisa Ainnayah  
NPM. 1815021057

## **HALAMAN MOTO**

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan yang lain).”

**-Q.S. Al-Insyirah: 6-7-**

“Jika kamu tidak sanggup menahan lelahnya belajar, maka kamu harus sanggup menahan perihnya kebodohan.”

**-Imam Syafi'i-**

“By the time we've made it, we've had it.”

**-Malcolm Forbes-**

”Usaha tidak akan mengkhianati hasil”

**-unknown-**



## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

*“Hey look, we made it!”*

Tugas akhir ini saya persembahkan untuk :

Umi tercinta,

**Zulmeytha Reno**

*“I am a strong woman because a strong woman raised me”*

## SANWACANA

### *Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh*

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, para sahabat, keluarga serta pengikutnya yang tetap istiqomah hingga akhir zaman. Penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh *Austempering* Baja AISI 4140 Terhadap Perambatan Retak Fatik” merupakan syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis sangat berharap karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal dapat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari khususnya pada bidang itu sendiri. Skripsi ini dapat terselesaikan karena dukungan dan keterlibatan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Umi, Zulmeytha Reno yang selalu menyayangi, memberikan segalanya, mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi di Teknik Mesin.
2. Muhammad Zaqi Fadhillah, sebagai adik yang selalu ada untuk membantu semua masalah baik di dalam proses perkuliahan dan di luar perkuliahan.
3. Zulmeyri Reno dan Zulhayri Reno, sebagai bunda dan paman yang selalu membantu dan mendukung secara materi maupun moril bagi penulis selama menjalankan kuliah.
4. Keluarga Besar Lel Iskandar sebagai sanak saudara terdekat yang selalu memberikan support kepada penulis.

5. Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan selalu mendampingi penulis dengan sabar dalam proses penyusunan skripsi hingga terselesaikan secara terstruktur.
6. Zulhanif, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan saran serta masukan dengan tenang kepada penulis selama proses pengerjaan skripsi ini.
7. Harnowo Supriadi, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan tanpa pernah menyalahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
8. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Novri Tanti, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
10. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
11. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi gurudan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
12. Sangkot Sahat Tua Lubis, sebagai pria pendamping penulis yang selalu membantu serta memberikan ketenangan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
13. David Tarade, Rizqy Nurully, Sahid Ar Rafi, Made Gita, Rizki Ramdhan dan Jonathan Tebu yang sudah bersedia menjadi teman serta membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
14. Sarah Renada dan M Nabil Damara yang selalu menjadi tempat bertanya penulis saat mengalami kesulitan dalam mengerjakan skripsi.
15. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

16. Seluruh saudara-saudara yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
17. Teman angkatan 2018 Teknik Mesin yang telah memberikan informasi-informasi terkait penyelesaian skripsi.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat pada skripsi ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Besar harapannya agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca. Aamiin.

**Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh**



## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di kota Jakarta, Provinsi DKI Jakarta pada 02 Mei 2000 sebagai anak pertama dari pasangan Bapak Zafaruddin dan Ibu Zulmeytha Reno. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Pesanggrahan 10 Pagi hingga tahun 2012, lalu dilanjutkan di SMPN 48 Jakarta yang diselesaikan pada tahun 2015 dan SMKN 29 Penerbangan Jakarta yang diselesaikan tahun 2018. Pada tahun 2018, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin di Universitas

Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Wakil Bendahara Umum pada tahun 2019 dan sebagai Bendahara Umum tahun 2020. Selain aktif dalam HIMATEM, penulis pernah menjadi bagian panitia kegiatan-kegiatan pada Jurusan Teknik Mesin.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PLTU unit Tarahan, Lampung Selatan pada Januari 2022 dengan judul laporan “**ANALISA DAN PERHITUNGAN WEAR RATE LINER PLATE PADA HOPPER S-5 PC UNLOADING PLTU TARAHAN**”.

Tahun 2022 penulis melakukan peneitian dengan tema perambatan retak fatik dengan judul penelitian “**PENGARUH AUSTEMPERING BAJA AISI 4140 TERHADAP PERAMBATAN RETAK FATIK**” dibawah bimbingan Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T. dan Zulhanif, S.T., M.T.

## DAFTAR ISI

	HALAMAN
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xviii</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Sistematika Penulisan .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Baja .....	6
2.1.1 Baja Karbon .....	6
2.1.2 Baja Paduan ( <i>alloy steel</i> ) .....	8
2.2 Baja AISI 4140 .....	8
2.3 <i>Austempering</i> .....	11
2.4 Struktur Mikro Baja .....	13
2.4.1 <i>Ferrite</i> (Fe - $\alpha$ ) .....	13
2.4.2 <i>Austenite</i> (Fe - $\gamma$ ).....	14
2.4.3 <i>Cementite</i> (besi karbida).....	15
2.4.4 <i>Pearlite</i> .....	15

2.4.5	<i>Bainite</i> .....	16
2.4.6	<i>Martensite</i> .....	17
2.5	Uji Tarik .....	17
2.6	Mekanisme Perambatan Retak Fatik .....	19
2.7	Faktor Intensitas Tegangan ( $K$ ) Dan <i>Fracture Toughness</i> ( $K_{IC}$ ) .....	22
2.8	Laju Perambatan Retak Fatik .....	26
<b>III. METODE PENELITIAN .....</b>		<b>28</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	28
3.2	Bahan yang Digunakan .....	28
3.2.1	Baja AISI 4140 .....	28
3.2.2	Spesimen Uji Tarik .....	28
3.2.3	Spesimen Uji Perambatan Retak Fatik .....	29
3.2.4	Natrium Nitrat ( $\text{NaNO}_3$ ) .....	29
3.2.5	Kalium Nitrat ( $\text{KNO}_3$ ) .....	30
3.3	Alat yang Digunakan .....	30
3.3.1	Mesin MTS Landmark 100kN .....	30
3.3.2	Jangka Sorong ( <i>Vernier Caliper</i> ) .....	31
3.3.3	Pemanas Induksi ( <i>Induction Heater</i> ) .....	32
3.3.4	<i>Thermogun</i> .....	31
3.3.5	Dapur <i>Salt Bath</i> .....	33
3.3.6	<i>Clip Gage on Displacement</i> .....	33
3.3.7	Dino-Lite ( <i>Digital Microscope</i> ) .....	34
3.4	Metode Penelitian .....	34
3.4.1	Persiapan Spesimen Uji .....	34
3.4.2	Pembuatan Spesimen Uji .....	34
3.4.3	Proses Austenisasi .....	34
3.4.4	Proses Austempering .....	35
3.4.5	Uji Tarik Statis .....	36
3.4.6	Uji Perambatan Retak Fatik .....	38

3.4.7	Observasi Mikrostruktur dan SEM Fraktografi .....	39
3.5	Pengambilan Data .....	39
3.5.1	Uji Tarik Statis .....	39
3.5.2	Uji Perambatan Retak Fatik .....	39
3.6	Metode yang Digunakan .....	40
3.7	Prosedur Penelitian .....	41
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>42</b>
4.1	Data Hasil Pengujian Tarik dan Analisis .....	42
4.2	Hasil Pengujian Perambatan Retak Fatik .....	45
4.3	Pengamatan Mikrostruktur .....	55
4.4	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) Fraktografi .....	58
<b>V.</b>	<b>SIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>61</b>
5.1	Simpulan .....	61
5.2	Saran .....	62

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi Baja Karbon .....	6
Tabel 2.2 Komposisi Baja AISI 4140 .....	9
Tabel 2.3 Hasil Uji Tarik Baja AISI 4140 .....	9
Tabel 3.1 Spesifikasi Jangka Sorong .....	31
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Thermogun Laser</i> .....	32
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>Clip Gage on Displacement</i> .....	33
Tabel 3.4 Hasil Uji Tarik Statis .....	39
Tabel 3.5 Data Hasil Uji Perambatan Retak Fatik .....	39
Tabel 4.1 Hasil Uji Tarik Statis Baja AISI 4140 .....	43
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Perambatan Retak Fatik Baja AISI 4140 .....	46

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur mikro baja AISI 4140 ( <i>raw steel</i> ) .....	10
Gambar 2.2 <i>Time-Temperature-Transformation diagram</i> .....	11
Gambar 2.3 Struktur (a) <i>upper bainite</i> dan (b) <i>lower bainite</i> .....	12
Gambar 2.4 Struktur mikro <i>ferrite</i> .....	14
Gambar 2.5 Struktur mikro <i>austenite</i> .....	14
Gambar 2.6 Struktur mikro (a) <i>cementite lamellae</i> dan (b) <i>cementite particles</i> .....	15
Gambar 2.7 Struktur mikro pada fasa <i>pearlit</i> .....	16
Gambar 2.8 Struktur mikro <i>bainit</i> .....	16
Gambar 2.9 Struktur mikro pada fasa <i>martensite</i> .....	17
Gambar 2.10 Kurva Tegangan-Regangan .....	18
Gambar 2.11 Tahap kegagalan fatik .....	20
Gambar 2.12 Hubungan antara intensitas tegangan dan laju pertumbuhan retak .....	21
Gambar 2.13 Siklus perambatan retak .....	23
Gambar 2.14 Tegangan Siklik .....	23
Gambar 3.1 Spesimen uji tarik standar ASTM E8 .....	28
Gambar 3.2 Spesimen uji fatik standar ASTM E647 .....	29
Gambar 3.3 Natrium Nitrat ( $\text{NaNO}_3$ ).....	30
Gambar 3.4 Kalium Nitrat ( $\text{KNO}_3$ ) .....	31
Gambar 3.5 Mesin MTS Landmark 100 kN .....	30
Gambar 3.6 Jangka Sorong .....	31
Gambar 3.7 Pemanas Induksi ( <i>Induction Heater</i> ) .....	31
Gambar 3.8 <i>Thermogun Laser</i> .....	32
Gambar 3.9 Dapur <i>Salt Bath</i> .....	33

Gambar 3.10 <i>Clip Gauge on Displacement</i> .....	33
Gambar 3.11 <i>Dino-Lite (Digital Microscope)</i> .....	34
Gambar 3.12 Kalibrasi temperatur spesimen .....	35
Gambar 3.13 Diagram proses <i>austempering</i> .....	36
Gambar 3.14 Diagram alir penelitian.....	36
Gambar 4.1 Kurva tegangan versus regangan .....	42
Gambar 4.2 Tahap inisiasi retak .....	47
Gambar 4.3 Tahap perambatan retak .....	48
Gambar 4.4 Tahap perambatan retak cepat .....	49
Gambar 4.5 Pertambahan panjang retak selama siklus pembebanan .....	50
Gambar 4.6 Hubungan faktor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak ..	51
Gambar 4.7 Hubungan faktor intensitas tegangan terhadap panjang retak regresi ...	52
Gambar 4.8 Hubungan faktor intensitas tegangan terhadap jumlah siklus .....	53
Gambar 4.9 Perbandingan antara kondisi <i>non treatment</i> dan <i>austempering</i> .....	54
Gambar 4.10 Mikrostruktur baja AISI 4140 kondisi <i>austempering</i> .....	55
Gambar 4.11 Tampilan spesimen setelah pengujian perambatan retak fatik .....	58
Gambar 4.12 Hasil SEM dari patahan baja AISI 4140 kondisi <i>austempering</i> .....	59

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penggunaan baja sebagai bahan utama sangat banyak ditemukan dalam dunia industri maupun otomotif seperti pembuatan *spare part* pada mesin-mesin. Dalam suatu perancangan, sifat mekanis baja sangat penting untuk menjamin keberhasilan agar sesuai dengan perhitungan perancangan. Sifat mekanis baja meliputi kekerasan, keuletan dan ketangguhan. Setiap baja memiliki sifat mekanis yang berbeda sesuai dengan komposisi yang terkandung dalam baja tersebut.

Baja AISI 4140 merupakan jenis paduan baja karbon menengah dengan komposisi kimia C (0.38- 0.43 %), Mn (0.75-1.00 %), Si (0.20-0.35 %), Cr (0.80-1.10 %), Mo (0.15-0.25 %), P ( $\leq 0.035$  %) dan S ( $\leq 0.04$  %). Umumnya baja ini tahan karat, karena terdapat paduan Cr dan Mo. Baja ini tergolong pada baja *Hypotectoid* karena memiliki kandungan karbon yakni 0.38-0.43 %. Kandungan karbon pada baja ini digunakan untuk penentuan temperatur saat perlakuan panas. Perlakuan panas diperlukan untuk mendapatkan kombinasi yang tinggi antara kekuatan, keuletan dan ketangguhan.

*Austempering* merupakan proses perlakuan panas isothermal pada baja yang menghasilkan struktur mikro berupa bainit. Perlakuan *austempering* dilakukan dengan cara memanaskan baja hingga terbentuk *austenit* dan dicelupkan ke dalam cairan garam pada temperatur di atas terbentuknya martensit, kemudian dilakukan penahanan temperatur (*holding time*) dalam waktu tertentu dan diikuti dengan pendinginan di udara. Biasanya perlakuan *austempering* digunakan sebagai pengganti dari perlakuan *quenching-tempering* untuk



meningkatkan keuletan dan ketangguhan tanpa menghasilkan retak dan distorsi seperti yang sering kali ditimbulkan dari perlakuan *quenching*.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ameh *et al* (2016) menggunakan *high strength steel* dengan temperatur austemper 350°C selama 90 menit menghasilkan laju perambatan retak fatik dari struktur mikro bainit ditemukan meningkat dalam kisaran  $\Delta K$  tinggi dari 1.2, 1.5 dan 1.1 dibandingkan dengan perlakuan *normalized*, *quenching* dan tempering. Peningkatan yang signifikan kemungkinan besar disebabkan oleh adanya struktur mikro berupa penampakan bulu pada struktur *upper bainite* yang terdiri dari *ferrite* kasar dan perlit yang menunjukkan defleksi retak rendah sehingga menurunkan ketahanan terhadap perambatan retak karena retak dengan mudah menyebar melalui *sheave bainite*.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Nagarajan *et al* (2017) menggunakan baja AISI 4140 dengan temperatur *austempering* 332°C selama 60 menit menghasilkan laju perambatan retak yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen yang diberikan perlakuan *annealing*. Struktur mikro yang terbentuk yaitu *lower bainite* dengan sedikit *martensite*. *Lower bainite* memiliki struktur yang sangat halus sehingga menciptakan ketahanan terhadap laju perambatan retak karena ujung retak bertemu dengan sejumlah besar batas butir dalam skala halus sehingga akan mengurangi kecepatan dari laju perambatan retak.

Penelitian lain yang dilakukan Bilal *et al* (2019) menggunakan baja AISI 4340 dengan temperatur *austempering* 310°C, 340°C dan 380°C selama variasi waktu 30, 60 dan 90 menit. Peningkatan jumlah bainit diamati seiring dengan bertambahnya waktu perendaman, sehingga struktur mikro setelah 60 menit *austempering* terdiri dari *bainite* yang mendominasi. *Austempering* pada 380°C mengakibatkan pembentukan *upper bainite*, pada 340°C menunjukkan pembentukan *upper* dan *lower bainite* sedangkan pada 310°C menghasilkan pembentukan *lower bainite* pada struktur mikro. Jumlah austenit yang tertahan telah diamati menurun seiring dengan penurunan temperatur, hal ini

disebabkan oleh fakta bahwa peluang untuk transformasi bainitik meningkat dengan penurunan temperatur yang mengakibatkan peningkatan jumlah bainit.

Sementara penelitian yang dilakukan oleh Yurt (2016) menggunakan baja AISI 4140 dengan temperatur austemper 375°C, 380°C, 400°C, 425°C, 435°C dan 450°C selama 20 menit menghasilkan struktur mikro *lower bainit* (karbida terletak diantara ferit) yang dapat terlihat dari hasil mikrostruktur pada 375°C - 380°C. Sedangkan *upper bainite* mulai terlihat pada 425°C dan pada 435°C terlihat ferit mendominasi daripada pembentukan *upper bainite*. Jumlah karbida pada 450°C terlihat sedikit lebih banyak daripada mikrostruktur lainnya.

Pada kasus rancang bangun suatu konstruksi mesin, selalu diperlukan sifat material agar komponen tersebut dapat bekerja dengan optimal dan dapat memenuhi persyaratan fungsi dari konstruksi. Sifat yang dikenal dengan kelelahan (*fatigue*) material sangat penting dalam suatu perancangan karena dapat menyebabkan kegagalan. Salah faktor kelelahan yang perlu diketahui adalah karakteristik perambatan retak (*crack propagation*) dari material dasar yang akan menyebar seiring dengan pertambahan waktu dan siklus kerja. Sesuai dengan keterangan tersebut bahwa perambatan retak fatik material sangat penting dan juga melihat beberapa referensi serta literatur yang telah dilakukan penelitian serta pengujian, maka penulis akan melakukan penelitian mengenai “**Pengaruh Austempering Baja AISI 4140 Terhadap Perambatan Retak Fatik**”

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh austempering baja AISI 4140 terhadap kekuatan mekanik.

2. Mengetahui struktur mikro pada baja AISI 4140 setelah perlakuan *austempering*.
3. Menganalisis pengaruh perlakuan *austempering* baja AISI 4140 terhadap laju perambatan retak fatik.
4. Menganalisis morfologi patahan spesimen pada baja AISI 4140 setelah perlakuan *austempering*.

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengaruh oksidasi saat austenisasi tidak dibahas.
2. Pengaruh kehilangan ketebalan saat austenisasi masih memenuhi standar ASTM E647.
3. Temperatur spesimen saat austenisasi dianggap sudah mencapai temperatur austenit dengan memakai acuan warna dari baja saat dipanaskan.

### 1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

#### I. PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang kenggunaan baja pada umumnya, spesifikasi baja AISI 4140, perlakuan *austempering*, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penelitian yang dilakukan.

#### II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang teori-teori yang berhubungan dengan pembahasan tentang permasalahan yang diangkat seperti jenis baja, spesifikasi lanjut dari baja AISI 4140, struktur mikro baja, *austempering*, perambatan retak fatik, faktor intensitas tegangan dan *fracture toughness*.

### **III. METODOLOGI PENELITIAN**

Berisikan tentang metode-metode dalam mengumpulkan informasi, tempat dan waktu penelitian, dan menerangkan tentang alur penelitian serta bagaimana proses dari pengambilan data yang dilakukan.

### **IV. DATA DAN PEMBAHASAN**

Berisikan data pengamatan yang diperoleh serta pembahasan data dari hasil pengujian.

### **V. SIMPULAN DAN SARAN**

Berisikan kesimpulan serta saran yang diberikan oleh penulis dari penelitian yang dilakukan.

### **DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan sumber-sumber dari literatur yang terdapat pada laporan penelitian.

### **LAMPIRAN**

Berisikan data berupa foto-foto yang mendukung laporan ini.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Baja

Baja diklasifikasikan berdasarkan banyaknya kandungan kadar karbon dan banyaknya paduan yang terkandung.

#### 2.1.1 Baja Karbon

Salah satu cara untuk dapat mengklasifikasikan baja adalah dengan melihat perbedaan prosentase karbon dalam campuran logam baja. Menurut Sriati Djaprie (1986 : 90) terdapat tiga macam baja berdasarkan kandungan karbon didalamnya, yaitu:

**Tabel 2.1** Klasifikasi Baja Karbon (Sriati dkk., 1986)

Jenis	Kelas	Kadar karbon (%)	Kekuatan luluh (kg/mm)	Kekuatan tarik (kg/mm)	Elongation (%)
Baja karbon rendah	Baja lunak khusus	0,08	18-28	32-36	40-30
	Baja sangat lunak	0,08-0,12	20-29	36-42	40-30
	Baja lunak	0,12-0,20	22-30	38-48	36-24
	Baja setengah lunak	0,20-0,30	24-36	44-55	32-22
Baja karbon sedang	Baja setengah keras	0,30-0,40	30-40	50-60	30-17
Baja karbon tinggi	Baja keras	0,40-0,50	34-46	58-70	26-14
	Baja sangat keras	0,50-0,80	36-100	65-100	20-11

#### 2.1.1.1 Baja karbon rendah (*low carbon steel*)

Mengandung kurang dari 0.3% karbon. Baja jenis ini memiliki kekuatan rendah tetapi keuletan dan ketangguhannya sangat tinggi serta memiliki sifat mudah dilas dan tahan aus. Baja karbon rendah tidak akan merespon apabila diberikan perlakuan panas yang bertujuan untuk mengubah struktur mikronya menjadi martensit. Struktur mikro yang terdapat pada baja jenis ini terdiri dari unsur pokok ferlit dan perlit, karena itu baja ini relatif lunak dan lemah.

#### 2.1.1.2 Baja karbon sedang (*medium carbon steel*)

Mengandung karbon sebesar 0,3%C – 0,6%C. Memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada baja karbon rendah sehingga kekuatan tarik dan batas regangannya tinggi, tetapi keuletannya rendah. Baja karbon sedang mampu diberikan suatu perlakuan panas seperti austenisasi, quenching dan tempering untuk memperbaiki struktur mikronya. Akibat dari perlakuan panas, baja jenis ini akan mengalami penurunan pada nilai kekerasannya.

#### 2.1.1.3 Baja karbon tinggi

Mengandung karbon sebesar 0,6%C – 1,5%C sehingga memiliki nilai kekerasan yang tinggi namun keuletannya lebih rendah, bahkan hampir tidak dapat diketahui antara jarak tegangan luluhnya terhadap tegangan proporsional pada grafik tegangan regangan. Selain itu baja karbon tinggi mempunyai kekuatan tarik paling tinggi dan tahan terhadap panas. Sifat tahan panas dikarenakan baja jenis ini memiliki jumlah martensit cukup tinggi yang membuat baja menjadi getas sehingga tidak akan memberikan hasil optimal pada saat dilakukan pengerasan dengan perlakuan panas.

### 2.1.2 Baja Paduan (*alloy steel*)

Tujuan dari penambahan unsur pada baja paduan yaitu untuk menaikkan sifat mekanik baja seperti kekerasan, ketangguhan, kekuatan tarik dan sebagainya pada temperatur rendah. Baja paduan diklasifikasikan menurut karbonnya adalah sebagai berikut :

#### 2.1.2.1 *Low alloy steel*

Memiliki kandungan unsur paduan kurang dari  $\leq 2,5\%$  dengan presentase karbon  $< 0,2\%$ . Kekuatan dan ketangguhan yang dimiliki baja ini lebih tinggi dibandingkan baja karbon dengan kandungan karbon yang sama. Keuletan yang dimiliki lebih tinggi dibanding dengan baja karbon yang memiliki nilai kekuatan yang sama.

#### 2.1.2.2 *Medium alloy steel*

Memiliki kandungan unsur paduan  $2,5\% - 10\%$ . Penambahan unsur karbon akan meningkatkan kekuatan tarik tetapi kemampuan regangannya akan berkurang.

#### 2.1.2.3 *High alloy steel*

Memiliki kandungan unsur paduan  $>10\%$ . Baja ini mempunyai sifat khusus seperti tahan karat dan tahan panas.

## 2.2 **Baja AISI 4140**

Menurut *American Iron and Steel Institute* (AISI), jenis 4140 termasuk dalam baja paduan yang didesain menggunakan *four-digit number* yang artinya ada perbedaan kandungan dalam baja tersebut. Angka 4 menunjukkan kandungan unsur paduan *chromium* dan *molybdenum*, angka 1 menunjukkan presentase paduan  $\pm 1\%$  dan angka 40 menunjukkan kandungan karbon sebesar  $\pm 0,4\%$ .

Komposisi kimia yang terkandung pada baja AISI 4140 ditunjukkan pada tabel 2.1.

Paduan utama dari baja AISI 4140 adalah *Molybdenum* dan *Chromium*. *Molybdenum* merupakan unsur yang larut pada *ferite* maupun *austenite*, unsur ini berfungsi sebagai pembentuk karbida yang akan menaikkan *hardenability*, kekuatan dan kekerasan pada temperatur tinggi serta mencegah *britleness*. Baja jenis ini relatif memiliki *hardenability*, *ductility*, dan *weldability* yang cukup baik. Sama halnya dengan *Molybdenum*, unsur *Chromium* juga terlarut dalam *ferite* maupun *austenit* terutama pada jenis baja karbon rendah sehingga akan menaikkan kekuatan dan ketangguhan.

**Tabel 2.2** Komposisi Baja AISI 4140 (Badaruddin *et al.*, 2019)

Element	Composition (wt %)
Karbon (C)	0.443
Kromium (Cr)	1,150
Molibdenum (Mo)	0,198
Mangan (Mn)	0,805
Silikon (Si)	0,308
Sulfur (S)	0,010
Fosfor (P)	0,021
Nikel (Ni)	0,253

Menurut penelitian yang dilakukan Badaruddin *et al* (2018) untuk sifat mekanik dari baja AISI 4140 tanpa perlakuan (*raw material*) setelah dilakukan uji tarik adalah seperti yang tertera pada Tabel 2.3

**Tabel 2.3** Hasil Uji Tarik Baja AISI 4140 (Badaruddin *et al.*,2018)

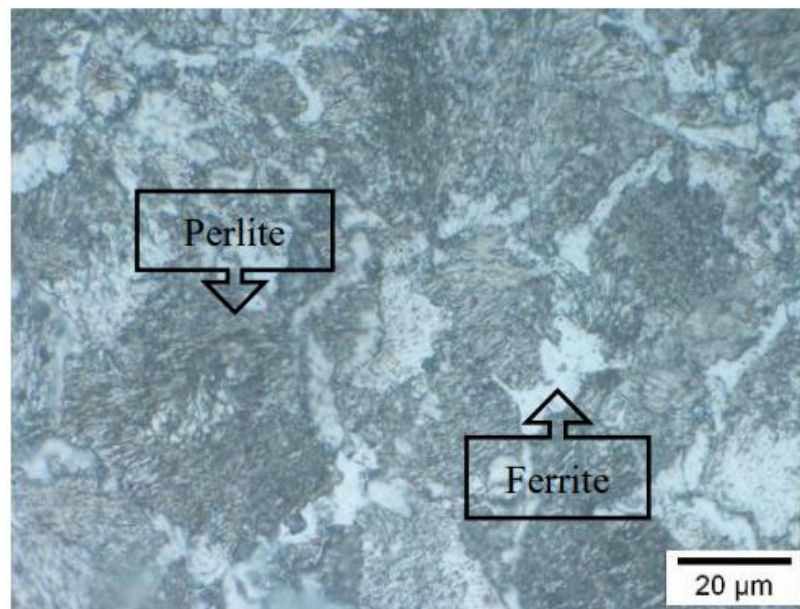
Nama spesimen	Modulus elastisitas (GPa)	Tegangan (MPa)		Energi plastis (kJ)	Energi elastis (kJ)	Reduksi luas penampang (%)	Elongasi total (%)
		Luluh (0.2%)	Ultimate				
TA1	206.866	949.725	1103.540	0.001	0.027	42.80	14.12
TA2	211.710	929.306	1083.842	0.001	0.029	52.83	15.05

Untuk mencapai sifat-sifat mekanik tertentu dari baja AISI 4140 digunakan cara dengan diberi perlakuan seperti *normalizing*, austenisasi dan tempering. Baja AISI 4140 dapat dilakukan *normalizing* mencapai 870-920°C, austenisasi



mencapai 840-870°C dan tempering mencapai 550 °C - 675 °C dikarenakan baja ini tahan terhadap temperatur tinggi (Parker, 1967). Kekuatan baja AISI 4140 akan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur yang diberikan saat proses perlakuan panas (Widyawati,2014). Baja AISI 4140 mengalami penurunan nilai kekerasan setiap kenaikan temperatur tempering dan butiran struktur mikro yang terbentuk membesar. Terjadi kenaikan nilai kekuatan tarik seiring dengan meningkatnya temperatur dan butiran struktur mikro terbentuk lebih halus dan membulat (Mahardika, 2020).

Menurut Badaruddin *et al* (2012) baja AISI 4140 memiliki struktur mikro tanpa perlakuan (*raw material*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.1.



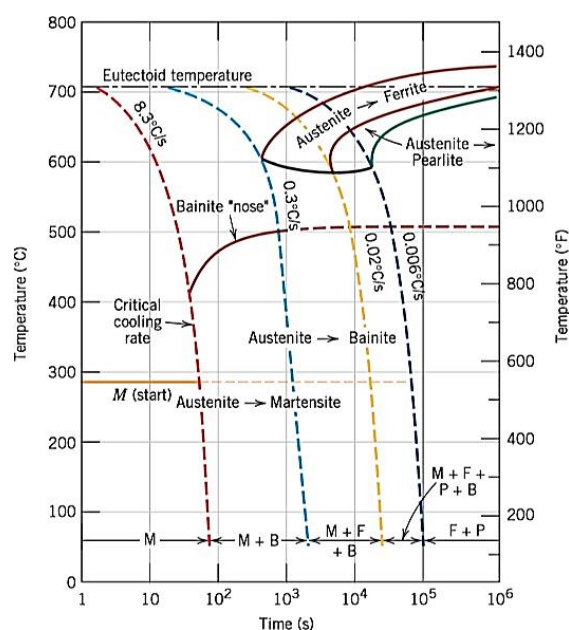
Gambar 2.1 Struktur mikro baja AISI 4140 (*raw steel*) (Badaruddin *et al.*, 2021)

Gambar 2.1 menunjukkan struktur mikro dari baja AISI 4140, terlihat bahwa struktur yang terbentuk merupakan fasa *ferrite* dan *pearlite*. Fasa *ferrite* berwarna terang dan memiliki sifat yang lunak. Sedangkan *pearlite* berwarna gelap dan memiliki sifat lebih keras daripada fasa *ferrite*.

### 2.3 Austempering

Menurut Akbar (2018) *austempering* merupakan transformasi pada *ferrous alloy* dengan temperatur diatas pembentukan *martensite* dan di bawah temperatur pembentukan *pearlite*. *Austempering* dapat diterapkan pada beberapa jenis baja kekuatan tinggi yang memiliki kekuatan dan ketangguhan tertentu. Material yang mendapatkan perlakuan ini akan memiliki ketangguhan yang lebih tinggi, kekuatan impaknya menjadi lebih baik, batas lelah dan keuletannya meningkat dibandingkan dengan kekerasan yang sama dari hasil perlakuan *quench* konvensional.

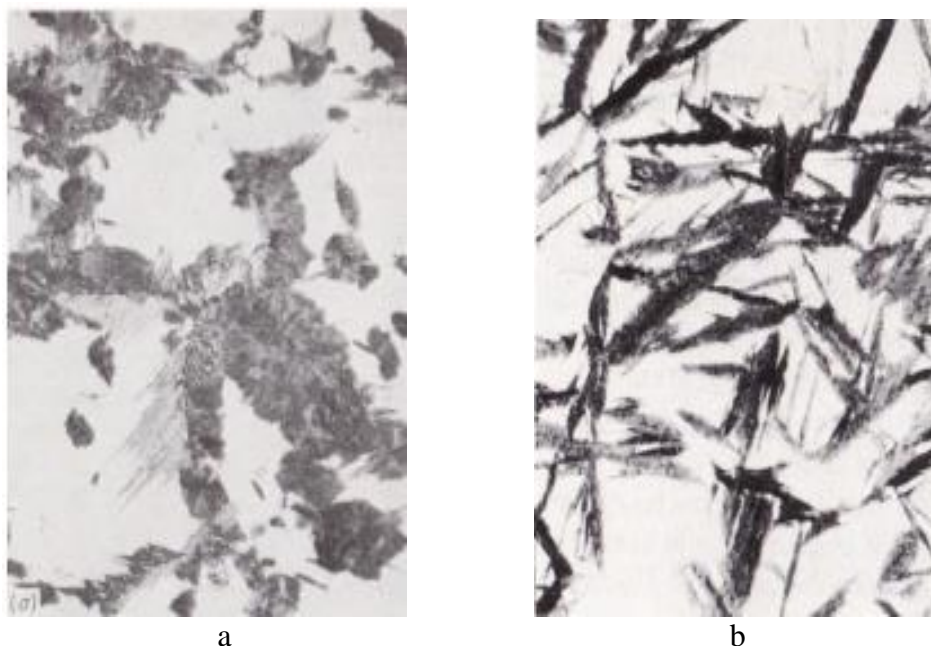
*Austempering* dilakukan dengan cara mendinginkan baja secara cepat dari temperatur austenisasinya ke dalam cairan garam yang temperturnya diatas temperatur pembentukan *martensite* dan di bawah temperatur pembentukan *pearlite*, kemudian dilakukan *holding time* hingga austenit berubah menjadi bainit lalu didinginkan diudara (Gambar 2.2). *Austempering* dilakukan di dalam tungku garam agar temperturnya dapat terkontrol dengan baik sehingga kekerasan yang dihasilkan memiliki kehomogenan yang tinggi. Jika temperatur tungku garam semakin rendah, maka kapasitas pendinginannya semakin tinggi.



Gambar 2.2 *Time-Temperature-Transformation diagram* (Callister, 2007).

Pada temperatur di bawah *nose* hingga diatas  $M_s$ , suatu struktur mikro lain mulai terbentuk yaitu bainit. Pada temperatur yang rendah ini, austenit sudah jauh di bawah temperatur stabilnya dan akan mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC ke BCC. Karena *driving force*, atom-atom akan tergeser sehingga menjadi BCC maka akan terbentuk ferit. Karena terdapat banyak karbon sementara ferit tidak mampu untuk melarutkan karbon, maka karbon akan berdifusi keluar dari ferit sebagai karbida. Sementara itu austenit di sekitar ferit akan berubah menjadi ferit dan karbonnya akan berdifusi keluar sehingga akan diperoleh struktur berupa bilah-bilah ferit yang di dalamnya terdapat platelet sementit dengan arah sejajar sumbu pertumbuhannya.

Dalam proses *austempering*, untuk menghindari pembentukan struktur perlit atau martensit baja diquenching pada rendaman logam cair atau garam. Proses tersebut akan dengan cepat mendinginkan baja dan membiarkannya melewati titik pembentukan pearlit sehingga akan mencapai pembentukan bainit (Niazi *et al.*, 2014). Terdapat dua jenis bainit yaitu bainit atas dan bawah yang pembentukannya tergantung dari temperatur *holding time* yang dilakukan ketika proses *austempering*, temperatur pembentukan *lower bainite* berada lebih rendah dibanding temperatur pembentukan *upper bainite*.



Gambar 2.3 Struktur (a) *upper bainite* dan (b) *lower bainite*

Menurut Speer *et al* (2004) *upper bainite* terbentuk pada temperatur yang relatif tinggi (mendekati *nose*) yaitu 400 °C - 550 °C dan strukturnya terlihat seperti bulu halus (*feathery*) sedangkan *lower bainite* terbentuk pada temperatur yang relatif rendah (mendekati *Ms*) yaitu 250 °C dan 300 °C dan strukturnya terlihat seperti jarum (*needlelike*). Nilai kekerasan yang dihasilkan dari *upper bainite* mencapai 40 HRC dan *lower bainite* mencapai 60 HRC (Manta, 2017). *Austempering* meningkatkan nilai kekerasan, hal tersebut disebabkan oleh struktur mikro yang semakin halus dan jarak antara karbida menjadi semakin dekat. Selain meningkatkan nilai kekerasan, *austempering* juga menghasilkan keuletan, ketangguhan dan ketahanan benturan yang tinggi. Karena pendinginan yang dilakukan pada proses *austempering* tidak *ekstrem*, maka jarang terjadi retak pendinginan atau distorsi bagian yang diberikan perlakuan panas.

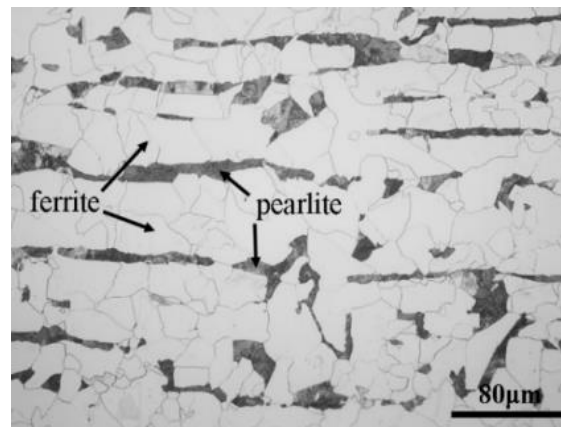
## 2.4 Struktur Mikro Baja

Struktur mikro dapat dilihat melalui diagram fasa, sehingga dapat diketahui fasa yang akan diperoleh pada komposisi dan temperatur tertentu. Dari struktur mikro maka dapat dilihat beberapa hal yaitu ukuran dan bentuk butir, distribusi fasa yang terdapat pada material khususnya logam dan pengotor yang terkandung pada material tersebut. Beberapa fasa yang sering ditemukan dalam baja karbon yaitu :

### 2.4.1 Ferrite (Fe - $\alpha$ )

Fasa yang berwarna putih ini disebut juga dengan alpha ( $\alpha$ ) dan stabil dibawah temperatur 910 °C. Daya larut karbon dalam *ferrite* rendah yaitu <1 atom C per 1000 atom besi, hal ini disebabkan karena ruang antar atomnya kecil dan rapat sehingga daya tampung karbonnya pun terbatas. Pada temperatur ruang, kadar karbonnya sebesar 0,008 % sehingga dapat dianggap besi murni. Kadar karbon maksimum yang dimiliki *ferrite* sebesar 0,025 % pada temperatur 723 °C. Sifat yang dimiliki *ferrite* adalah lunak dan liat sehingga menghasilkan kekuatan

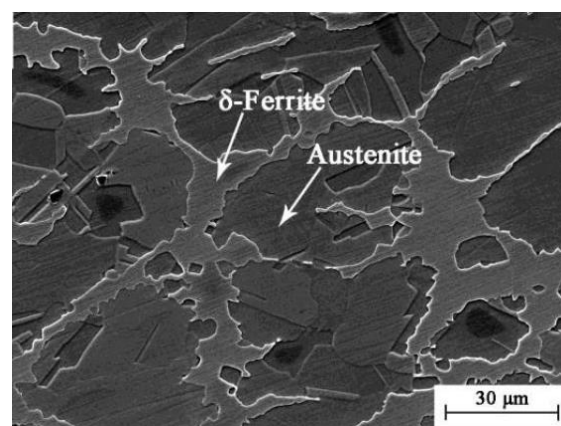
tarik kurang dari 340 MPa dan bersifat ferromagnetik. Nilai kekerasan *ferrite* tidak lebih dari 90 HRB dan diatas temperatur 768°C.



Gambar 2.4 Struktur mikro *ferrite* (Guo *et al.*, 2019)

#### 2.4.2 *Austenite* (Fe – $\gamma$ )

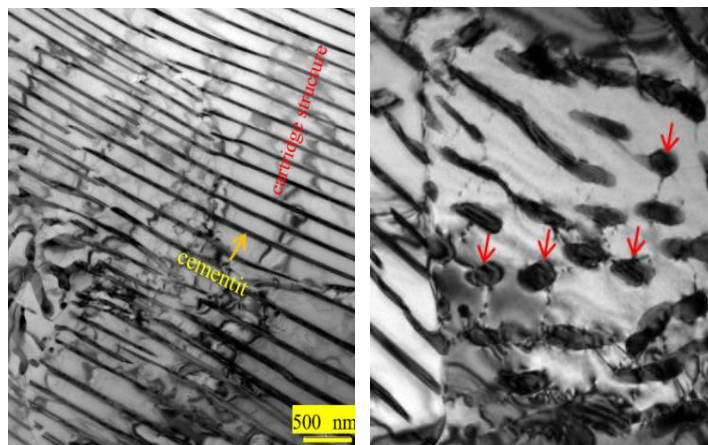
*Austenite* merupakan campuran dari besi (Fe) dan karbon (C) yang terbentuk pada saat proses pendinginan, namun pada pendinginan selanjutnya *austenite* berubah menjadi *ferrite*, *pearlite* dan *sementite*. Sifat yang dimiliki austenit adalah ketangguhan yang tinggi, lunak dan lentur dengan kadar karbon maksimum 2,14% dan stabil pada temperatur 912 °C-1394 °C. *Austenite* memiliki kekuatan tarik sekitar 150.000 psi, *elongation* sekitar 10 % dalam 2 in dan nilai kekerasan sekitar 40 HRC.



Gambar 2.5 Struktur mikro *austenite* (Xu *et al.*, 2018)

### 2.4.3 *Cementite* (besi karbida)

Pada paduan besi dimana kondisi karbon melebihi daya larut maka akan membentuk fasa kedua yang disebut dengan karbida besi atau *cementite*. Sifat dasar dari *cementite* sangat keras dengan nilai kekerasan 5-68 HRC, sehingga *cementite* dalam *ferrite* akan meningkatkan kekerasan baja. Fasa ini sangat rapuh yang menyebabkan tidak tahan terhadap konsentrasi tegangan. *Cementite* memiliki komposisi kimia berupa  $Fe_3C$ , sehingga sangat keras tetapi tidak terlalu kuat dan memiliki nilai kekuatan tarik yang rendah yaitu hanya sekitar 5.000 psi. Pada fasa ini kelarutan karbon mencapai 6,70% dengan temperatur dibawah 1400 °C.



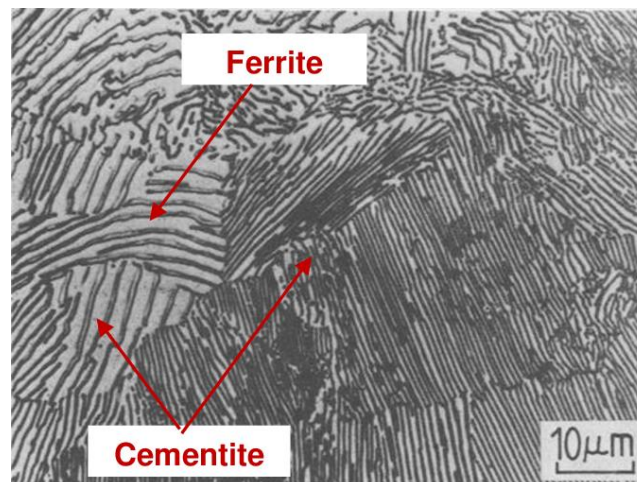
Gambar 2.6 Struktur mikro (a) *cementite lamellae* dan (b) *cementite particles* (Wang *et al.*, 2019)

### 2.4.4 *Perlite*

Fasa ini merupakan campuran mekanis dari dua fasa yaitu *ferrite* dengan kandungan karbon 0,025 % dan sementit dengan kandungan karbon 6,67 % dalam bentuk *lamellar* (lapisan) yang terletak rapat berselang seling bersebelahan. *Pearlit* terjadi pada temperatur dibawah 723°C dengan cara menguraikan *austenite* berkomposisi eutecid. Fasa ini memiliki sifat lebih keras dan kuat daripada *ferrite* dengan nilai kekerasan mencapai 10-30 HRC serta kekuatan tarik



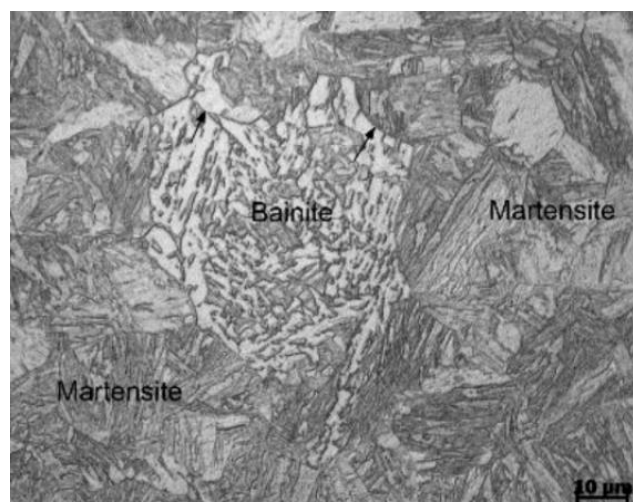
sekitar 120.000 psi, akan tetapi kurang liat dengan *elongation* sekitar 20 % dalam 2 in.



Gambar 2.7 Struktur mikro pada fasa pearlit (*lamellae ferrite* dan *cementite*) (Kapito *et al.*, 2019)

#### 2.4.5 Bainit

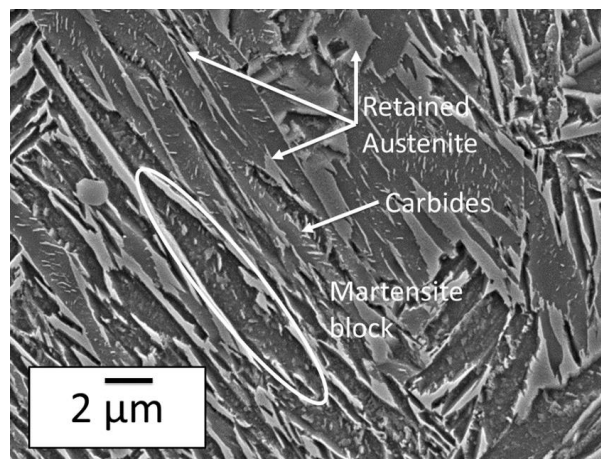
*Bainit* merupakan fasa yang terbentuk akibat dari transformasi pendinginan yang sangat cepat pada fasa austenit ke temperatur dari 250°C hingga 550°C dan ditahan pada temperatur tersebut. *Bainit* merupakan struktur mikro dari reaksi eutektoid ( $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) non-lamellar (tidak berupa lapisan) sehingga dapat dikatakan bahwa *bainit* campuran dari fasa ferit dan sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Sifat *bainit* adalah lunak dan memiliki kekuatan tarik sekitar 550-1150 MPa.



Gambar 2.8 Struktur mikro *bainit* (Lan *et al.*, 2018)

#### 2.4.6 *Martensite*

*Martensite* adalah fasa dimana ferit dan martensit bercampur dalam bentuk jarum-jarum sementit, bukan dalam lamellar. Fasa ini terbentuk dari 23 meta yang terbentuk dengan laju pendinginan cepat. *Martensite* akan terbentuk jika kandungan karbon dalam baja mencapai 0,6 % sedangkan jika diatas 1% akan terbentuk *martensite* pelat, perubahan tersebut terjadi pada interval  $0,6 \% < C < 1,08 \%$  dengan temperatur dibawah  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sifat *martensite* adalah rapuh dan getas akan tetapi fasa ini juga bersifat keras dengan nilai kekuatan tarik diatas 1150 MPa.



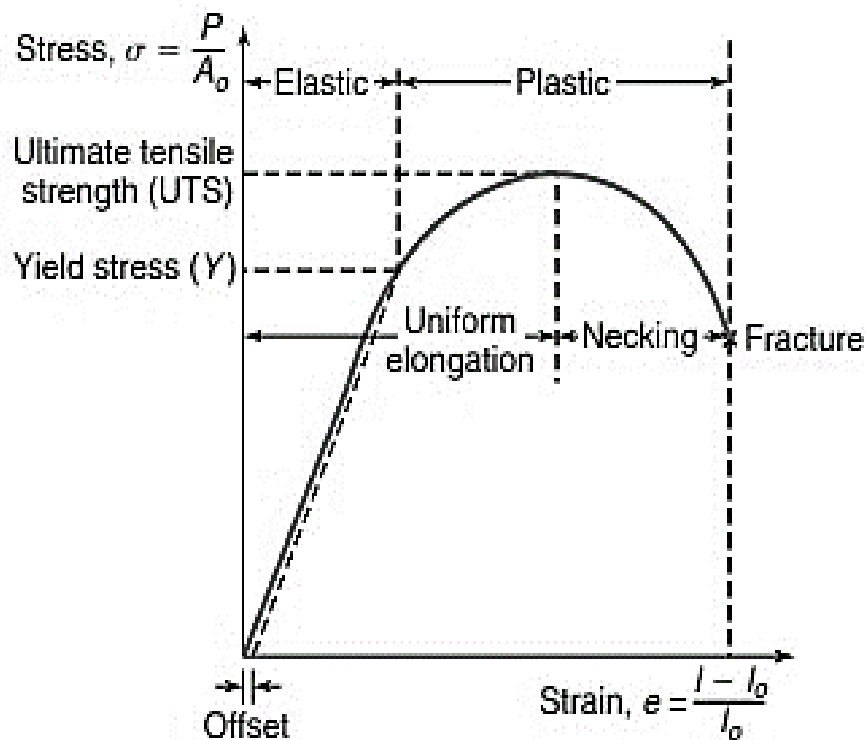
Gambar 2.9 Struktur mikro pada fasa *martensite* (Allain *et al.*, 2018)

## 2.5 Uji Tarik

Uji tarik merupakan pemberian gaya atau tegangan tarik yang berfungsi untuk mengetahui atau mendeteksi kekuatan dari suatu material. Tegangan tarik yang dimaksud merupakan tegangan external atau perpanjangan sumbu spesimen. Untuk mengetahui kekuatan tarik suatu material dalam pembentukan tarik, garis gaya harus berhimpit dengan garis sumbu spesimen sehingga pembebanan terjadi. Hasil uji tarik mencatat fenomena hubungan antara tegangan-regangan selama proses pengujian, kemudian dapat menghasilkan sebuah kurva (Gambar 2.10). Dari kurva tegangan-regangan



dapat dilakukan analisis terhadap daerah elastis dan daerah plastis. Selain itu dapat diketahui untuk nilai *yield stress* dan *Ultimate Tensile Strength* (UTS).



Gambar 2.10 Kurva Tegangan-Regangan

Tegangan ( $\sigma$ ) dapat ditentukan oleh Persamaan 2.1. Regangan ( $\varepsilon$ ) merupakan angka yang menunjukkan nilai penambahan panjang material saat diberikan beban tarik yang berbanding lurus dengan panjang awalnya sehingga nilai regangan dapat ditentukan oleh Persamaan 2.2. Saat beban terus bertambah, spesimen akhirnya mengalami deformasi elastis nonlinier pada tegangan yang disebut batas proporsional. Saat itulah tegangan dan regangan menjadi tidak proporsional, tetapi spesimen masih bisa untuk kembali ke bentuk aslinya. Sedangkan deformasi plastis terjadi ketika tegangan luluh material sudah tercapai.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Tidak mudah untuk material yang ulet menentukan titik luluh pada kurva tegangan-regangan dikarenakan kemiringan kurva mulai menurun perlahan di atas batas proporsional. Oleh karena itu biasanya *yield stress* didefinisikan dengan menggambar garis kemiringan yang sama dengan garis kurva elastis linier dengan diimbangi oleh regangan 0,002 atau perpanjangan 2%. Sehingga *yield stress* didefinisikan sebagai tegangan dimana garis offset memotong kurva tegangan-regangan. Dibawah beban yang terus meningkat, akan terjadi perpanjangan pada spesimen dan menyebabkan luas penampang dari spesimen berkurang. Jika tegangan yang lebih tinggi dari tegangan luluh diturunkan, bentuk dari garis kurva akan lurus ke arah bawah dan sejajar dengan kemiringan awal kurva. Tegangan akan mencapai titik maksimum dan kemudian mulai menurun ketika beban ditingkatkan lebih tinggi. Titik maksimum tersebut disebut dengan kekuatan tarik atau *Ultimate Tensile Strength* (UTS).

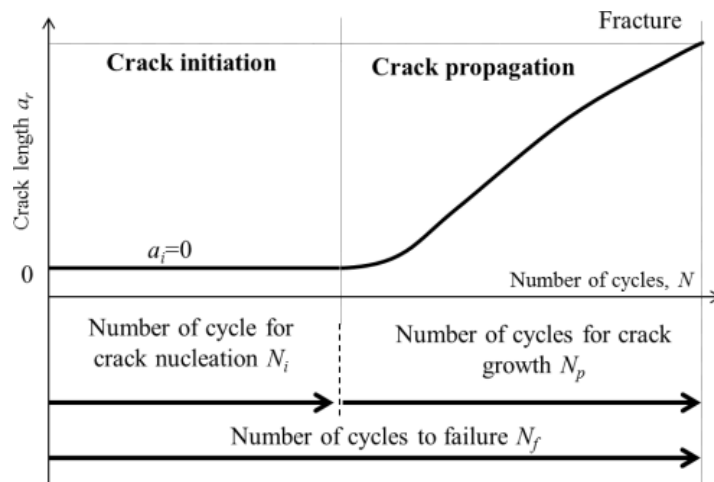
Spesimen akan mengalami *necking* ketika dibebani melebihi kekuatan tarik maksimumnya dan menyebabkan luas penampang dari spesimen tidak lagi sama pada daerah *necking*. Sebelum spesimen patah, tegangan akan turun lebih jauh. Rasio tegangan terhadap regangan pada daerah elastis disebut dengan modulus elastisitas (Persamaan 2.3). Modulus elastisitas ( $E$ ) disebut dengan kemiringan bagian elastis dari kurva. Semakin tinggi nilai dari modulus elastisitas, maka semakin tinggi beban yang diperlukan untuk meregangkan spesimen pada tingkat yang sama.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (2.3)$$

## 2.6 Mekanisme Perambatan Retak Fatik

Sejumlah besar siklus merupakan persyaratan penting untuk kegagalan fatik yang terdiri dari dua tahap yaitu nukleasi retak dan diikuti dengan perambatan retak sampai panjang retakan mencapai nilai kritis untuk putus (Thao, 2021). Uji perambatan retak fatik dilakukan untuk mengukur hubungan antara panjang

retak dan jumlah siklus (Surojo *et al.*, 2021). Penambahan panjang retak dipengaruhi oleh beban dinamis yang diterapkan. Semakin besar beban yang diterapkan, maka semakin cepat pertambahan panjang retak.



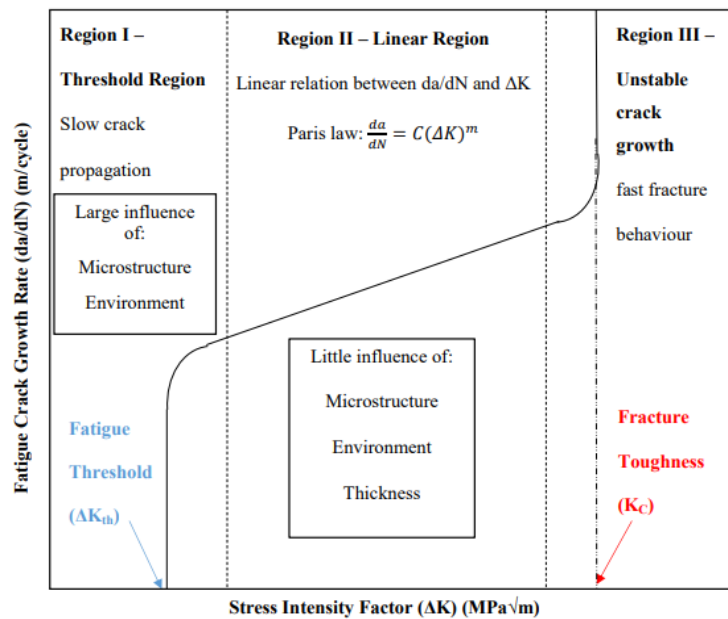
Gambar 2.11 Tahap kegagalan fatik (Thao, 2021)

Data panjang retak dan jumlah siklus digunakan untuk menentukan laju perambatan retak ( $da/dN$ ) dan faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) menggunakan metode polinomial inkremental berdasarkan standar ASTM E647. Nilai ( $da/dN$ ) dan ( $\Delta K$ ) dihitung kemudian di plot dalam kurva logaritmik sehingga diperoleh konstanta material ( $C$ ) dan konstanta eksponensial ( $m$ ) yang mewakili kemiringan kurva dan dikenal sebagai konstanta Paris. Secara umum bagian kurva yang dipertimbangkan untuk perhitungan ( $m$ ) adalah bagian linier yang memiliki tingkat perambatan retak yang teratur. Konstanta Paris digunakan untuk mengkarakterisasi laju perambatan retak fatik yang menggambarkan seberapa cepat retak merambat. Semakin besar konstanta Paris ( $m$ ), maka akan semakin cepat laju perambatan retak.

Perambatan retak suatu struktur terjadi ketika tegangan pada ujung retakan berada diatas kekuatan material. Jika hal tersebut terjadi maka akan menyebabkan konsentrasi tegangan pada ujung retak meningkat dan menyebabkan tegangan yang terjadi akan lebih besar lagi. Terdapat dua tingkat pertumbuhan pada perambatan retak :

1. Pada perambatan retak tingkat pertama (*slip bound crack growth*) yaitu meliputi inisiasi retak di bagian tegangan geser maksimum.

2. Pada perambatan retak tingkat kedua yaitu meliputi perambatan retak dalam arah tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum.



Gambar 2.12 Hubungan antara intensitas tegangan dan laju pertumbuhan retak (Nagarajan, 2014)

Pada Gambar 2.12 terdapat kurva dengan 3 daerah. Daerah I menunjukkan *fatigue threshold* ( $\Delta K_{th}$ ) yang merupakan fluktuasi dari nilai faktor intensitas tegangan. Untuk memungkinkan terjadinya perambatan retak, nilai  $\Delta K$  harus lebih besar dari  $\Delta K_{th}$ . Ketika  $\Delta K > \Delta K_{th}$  maka retak akan sampai pada daerah II yang merupakan tahap perambatan retak (Suhaimi, 2019). Daerah II menunjukkan kondisi linier antara hubungan laju perambatan retak dengan selisih faktor intensitas tegangan yang diterapkan. Daerah III menunjukkan perambatan retak yang sangat cepat dimana faktor intensitas tegangannya diatas harga faktor intensitas kritis. Jika terjadi kenaikan tegangan pada daerah tertentu maka dapat menimbulkan konsentrasi tegangan, kemudian daerah tersebut (lokal) akan terjadi daerah plastis yang pada akhirnya akan menimbulkan retak mikro pada daerah I :

1. Retak mikro akan membesar. Retak akan merambat jika terjadi pembebanan yang berulang. Hal tersebut dinamakan *crack propagation*, pada daerah II.

2. Pada akhirnya material akan mengalami patah statis atau *final fracture* pada daerah III. Daerah I dan II terbentuk karena pengaruh tebal dan struktur mikro yang dominan. Pengaruh dominan di daerah I dan II menyebabkan sukar untuk memprediksi mekanisme perambatan retak secara teoritis pada kedua daerah tersebut.

Perambatan retak meliputi amplitudo putaran beban konstan dari spesimen yang terdapat lubang dan telah mengalami retak dalam. Panjang retak diukur secara visual maupun dengan metode numerik untuk mendapatkan nilai rata-rata perambatan retak. Rata-rata dari perambatan retak dinyatakan sebagai fungsi jangkauan faktor intensitas tegangan  $\Delta K$  yang dihitung menggunakan persamaan pada analisa tekanan elastis linier (Sanyoto, 2008).

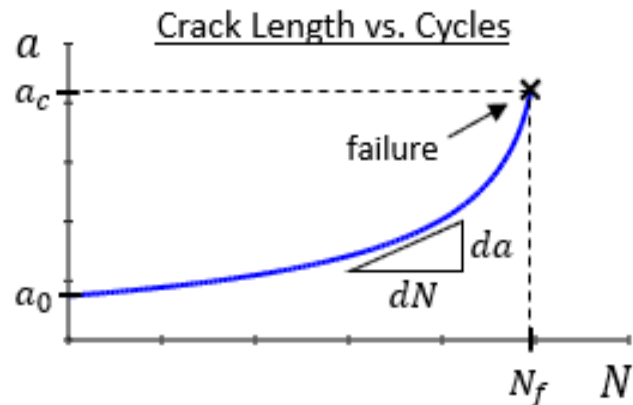
Perambatan retak sering dievaluasi menggunakan persamaan Paris. Persamaan tersebut akan berlaku pada daerah II dari laju perambatan retak. Dalam persamaan Paris terdapat empat komponen yaitu laju perambatan retak ( $da/dN$ ), konstanta Paris ( $c$  dan  $m$ ) serta faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ). Terkait pada parameter tersebut, maka dinyatakan menjadi tiga bagian yaitu :

1. Pendekatan teoritis, yaitu untuk memperoleh harga  $\Delta K$  dilakukan dengan rumus empiris dari ASTM.
2. Pendekatan eksperimen, yaitu untuk memperoleh harga  $C$  dan  $m$ .
3. Tujuan akhir dari pengolahan data eksperimen fatik adalah harga  $da/dN$ .

Nilai  $C$  dan  $m$  didapatkan dari nilai rata-rata setiap spesimen. Hal ini disebabkan karena secara teoritis, nilai konstanta Paris ( $m$ ) bukan merupakan fungsi  $R$ .

## **2.7 Faktor Intensitas Tegangan ( $K$ ) Dan *Fracture Toughness* ( $K_{IC}$ )**

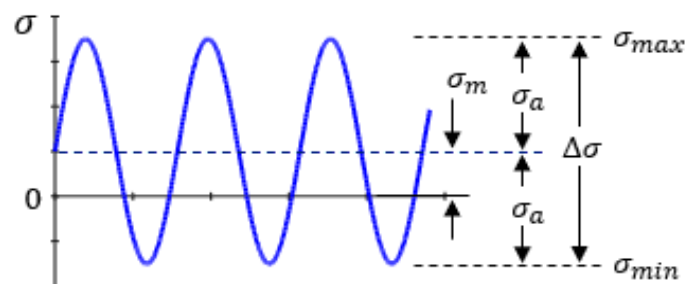
Gambar 2.12 merupakan alur perambatan retak, ukuran retak ( $a$ ) ditampilkan sebagai fungsi dari siklus,  $N$  sebagai beban diterapkan dan  $da/dN$  sebagai laju perambatan retak yang merupakan kemiringan dari kurva perambatan retak.



Gambar 2.13 Siklus perambatan retak

Awalnya retak tumbuh sangat lambat dan menjadi semakin cepat ( $da/dN$  meningkat) seiring dengan bertambahnya ukuran retakan. Laju perambatan bergantung pada faktor intensitas tegangan pada ujung retak yang bergantung pada panjang retak ( $a$ ). Faktor intensitas yang tinggi menyebabkan perambatan retak lebih cepat, retak merambat hingga mencapai ukuran kritis dan terjadi *failure*.

Gambar 2.14 menunjukkan tegangan siklik yang diterapkan dengan menunjukkan nilai konstan ` dan minimum.



Gambar 2.14 Tegangan siklik

Keterangan Gambar 2.14:

- $\sigma_{min}$  : tegangan minimum
- $\sigma_{max}$  : tegangan maksimum
- $\sigma_m$  : tegangan rata-rata
- $\sigma_a$  : tegangan amplitudo
- $\Delta\sigma$  : *range stress*

Rasio tegangan merupakan nilai yang penting dan merupakan rasio tegangan minimum terhadap tegangan maksimum.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.3)$$

Sedangkan faktor intensitas tegangan merupakan fungsi dari geometri dan tegangan yang diterapkan. Berdasarkan *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates* (ASTM International 2015), Persamaan 2.4 berlaku untuk mengukur faktor intensitas tegangan pada spesimen CT standar ASTM E647 untuk berbagai panjang retakan dimana spesimen dibebani pada kondisi tarik.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} Y \quad (2.4)$$

Dimana  $\sigma$  merupakan tegangan yang diterapkan, Y merupakan faktor geometri tak berdimensi yang bergantung pada geometri retak, geometri bagian dan konfigurasi pembebanan. Nilai Y dan  $a$  bergantung pada geometri, jadi untuk retak tertentu dan bagian geometri, faktor intensitas tegangan sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Oleh karena itu dapat diterapkan seperti :

$$K_{max} = Y \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

$$K_{min} = Y \sigma_{min} \sqrt{\pi a} \quad (2.6)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.7)$$

$$R = \frac{K_{max}}{K_{min}} \quad (2.8)$$

Persamaan lainnya yang dapat digunakan untuk menggabungkan range intensitas tegangan dan R-ratio yaitu:

$$\Delta K = K_{max} (1-R) \quad (2.9)$$

Faktor intensitas tegangan akan mempengaruhi distribusi tegangan dan laju perambatan retak, semakin panjang suatu retak maka akan menghasilkan nilai intensitas tegangan yang tinggi. Artinya bahwa tegangan yang tinggi akan membuat material semakin lemah dan rapuh. Intensitas tegangan yang tinggi akan menyebabkan tegangan yang terjadi melebihi titik luluh dari material dan akhirnya akan menimbulkan regangan plastis pada ujung retak. Tegangan yang terjadi akan menurun ketika menjauhi ujung retak.

Untuk menentukan nilai dari tegangan disekitar retak, maka dibutuhkan variabel lain dengan menggunakan Persamaan 2.10.

$$\Delta K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.10)$$

Dimana,

$K$  = faktor intensitas tegangan ( $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ )

$\sigma$  = tegangan yang diterapkan (MPa)

$a$  = panjang retak (mm)

Material akan menahan retak sehingga tidak terjadi patah getas, jika nilai  $\Delta K$  masih dibawah nilai kritisnya yaitu *fracture toughness* ( $K_{IC}$ ). Material yang mengalami patah getas artinya material tersebut sudah mencapai nilai *fracture toughness* ( $K_{IC}$ ) dibandingkan dengan nilai panjang retak ( $a$ ), seperti Persamaan 2.11.

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} \quad (2.11)$$

Dimana,

$\sigma_c$  = tegangan kritis material (MPa)

$K_{IC}$  = *fracture toughness* ( $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ )

$a$  = panjang retak (mm)

Persamaan 2.11 dapat digunakan jika besar setengah panjang retak lebih kecil dibandingkan lebarnya. Jika setengah panjang retak mendekati nol maka dibutuhkan tegangan yang tak terhingga nilainya agar material dapat patah. Akan tetapi spesimen uji tarik akan tetap patah walaupun tegangan yang



berikan belum mencapai tak terhingga. *Fracture toughness* ( $K_{IC}$ ) dipengaruhi oleh sifat mekanik material, temperatur kerja dan pembebanan. Nilai dari *fracture toughness* ( $K_{IC}$ ) akan menurun jika temperatur kerja semakin rendah dan laju pembebanan semakin besar karena menyebabkan material menjadi getas sehingga retak akan merambat dengan cepat.

## 2.8 Laju Perambatan Retak Fatik

Ketika rentang tegangan siklik konstan  $\Delta\sigma$  ( $= \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ) digunakan pada struktur yang retak, perambatan retak fatik dapat terjadi pada tingkat tegangan dibawah kekuatan luluh material. Faktor intensitas ( $\Delta K$ ) tegangan pada siklus juga jauh dibawah harga *fracture toughness* ( $K_{IC}$ ), alasannya adalah material di dekat ujung retak (*crack tip*) berada di bawah deformasi plastis. Tegangan-regangan di dekat ujung retak (*crack tip*) ditentukan oleh faktor intensitas tegangan, sehingga laju perambatan retak dapat dikorelasikan dengan  $\Delta K$ .

Umumnya pada siklus fatik ( $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ), laju perambatan retak yang dikenai putaran amplitudo beban konstan bergantung pada tegangan, panjang retak serta rasio tegangan. Konsep faktor intensitas tegangan memungkinkan untuk memperhitungkan dua ketentuan,

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2.12)$$

Konsep tersebut sangat berfungsi untuk perambatan retak fatik, karena dapat memberikan dasar untuk menerapkan mekanika perpatahan pada perambatan retak fatik. Konsep ini mengartikan bahwa ujung retak ditentukan oleh parameter pembebanan tunggal seperti faktor intensitas tegangan.

Untuk retakan yang tumbuh dibawah intensitas tegangan siklik amplitudo konstan, akan terbentuk daerah plastis berulang pada ujung retak dan retakan yang tumbuh akan meninggalkan lapisan plastis. Hal itu dikarenakan daerah plastis yang cukup kecil sehingga retakan terbentuk pada daerah elastis, kondisi

di ujung retak ditentukan oleh  $K$  dan laju perambatan retak ditandai dengan  $K_{min}$  dan  $K_{max}$ . Jika retakan terjadi cukup panjang dan atau tegangan tinggi, maka akan menyebabkan ketidakstabilan retak dan laju perambatan retak yang cepat. Hal tersebut dikarenakan  $K_{max}$  dekat dengan harga *fracture toughness* ( $K_{IC}$ ) material. Nilai yang lebih rendah dari  $\Delta K$  pada kurva linier (Gambar 2.13) dinyatakan dengan :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.13)$$

Dimana  $C$  dan  $m$  adalah material, lingkungan, rasio ( $R$ ) tegangan yang berdasarkan temperatur. Persamaan 2.14 disebut sebagai hukum Paris. Pada bentuk integralnya, persamaan 2.14 digunakan untuk memperkirakan *lifetime* retak struktur dari suatu material. Pada saat nilai  $\Delta K$  sangat rendah dan terjadi dibawah harga  $\Delta K_{th}$  artinya retakan tidak akan merambat. Nilai  $\Delta K_{th}$  sangat berpengaruh pada laju perambatan retak, berikut ini merupakan nilai  $\Delta K_{th}$  pada kisaran  $R \geq 0.1$  adalah sebagai berikut:

$$\Delta K_{th} = 7.0 (1-0.85R) \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (2.14)$$

$$\Delta K_{th} = 6.4 (1-0.85R) \text{ ksi}\sqrt{in} \quad (2.15)$$

Data perambatan retak fatik biasanya diperoleh dari pengujian pada benda uji dan biasanya disajikan dalam bentuk laju perambatan retak fatik ( $da/dN$ ),  $\Delta K$  dan nilai  $R$ . Pada saat  $\sigma_{min}$  bersifat *compressive*, maka tidak terjadi perambatan retak selama siklus fatik dan tidak ada ketetapan yang jelas untuk menghitung  $\Delta K$  sesuai yang sudah ditentukan. Namun untuk penyelesaiannya, dapat digunakan dua pendekatan yaitu :

1. Saat menghitung  $\Delta K$  akan digunakan siklus tegangan seluruhnya.
2. Yang akan diperhitungkan hanya daerah tarik dari spesimen, yaitu  $\Delta K = K_{max}$ .

### III. METODE PENELITIAN

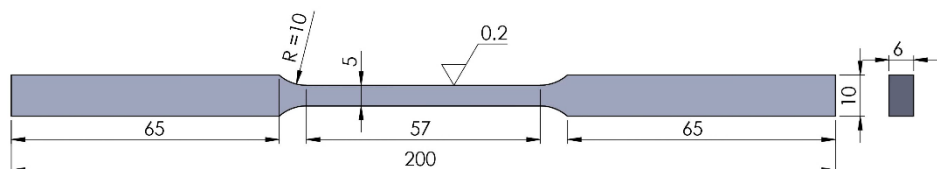
#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian dimulai dari bulan Juli 2022 sampai dengan November 2022. Penelitian dilaksanakan pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung untuk pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik dan Laboratorium Pengembangan Paduan Prodi Teknik Metalurgi Institut Teknologi Bandung untuk observasi mikrostruktur serta Badan Tenaga Nuklir Indonesia (BATAN) untuk pengamatan fraktografi.

#### 3.2 Bahan yang Digunakan

Bahan dan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

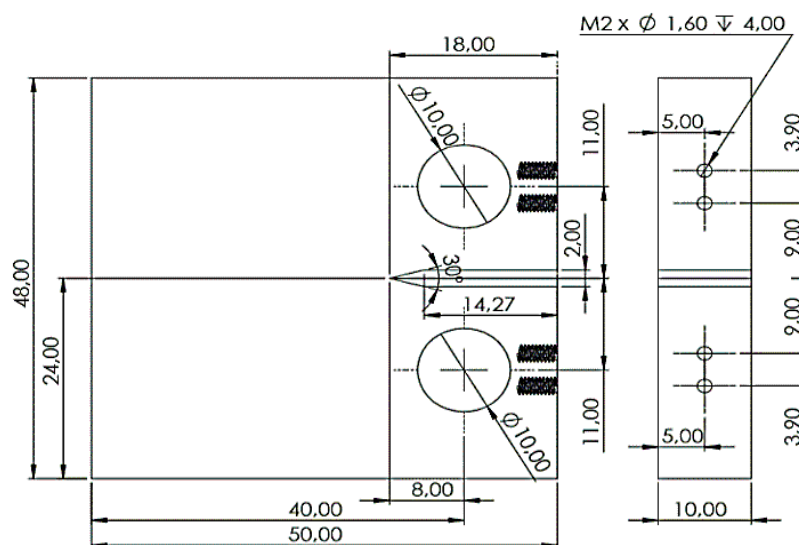
1. Baja AISI 4140  
Baja AISI 4140 ini berbentuk plat.
2. Spesimen Uji Tarik  
Spesimen untuk uji tarik berdasarkan standar ASTM E8. Ukuran dan bentuk seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Spesimen uji tarik standar ASTM E8 (ASTM, 2001)

### 3. Spesimen Uji Perambatan Retak Fatik

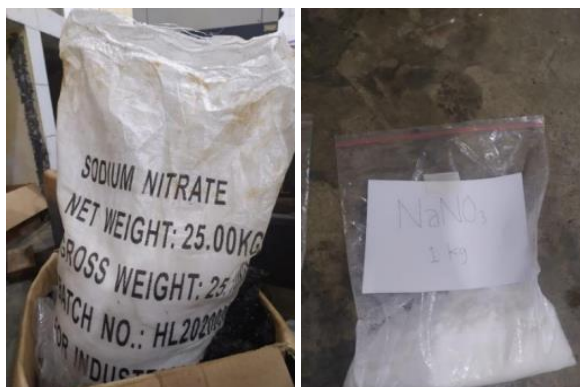
Spesimen untuk uji perambatan retak fatik berdasarkan standar ASTM E647. Ukuran panjang spesimen 50 mm, lebar 48 mm, panjang retak awal ( $\alpha_0$ ) = 18 mm, tebal adalah 10 mm dengan sudut takik sebesar  $30^\circ$ .



Gambar 3.2 Spesimen uji fatik standar ASTM E647 (ASTM E647, 2004)

### 4. Natrium Nitrat ( $\text{NaNO}_3$ )

Natrium nitrat merupakan salah satu jenis garam berbentuk kristal padat dan berwarna putih yang memiliki densitas sebesar 2,257 g/ml. Titik beku yang dimiliki natrium nitrat sebesar  $308^\circ\text{C}$  pada 1 atm dengan titik didih sebesar  $380^\circ\text{C}$  pada 1 atm.



Gambar 3.3 Natrium Nitrat ( $\text{NaNO}_3$ )

5. Kalium Nitrat ( $\text{KNO}_3$ )

Kalium nitrat merupakan salah satu jenis garam berfasa padat dan berwarna putih. Titik didih yang dimiliki kalium nitrat sebesar  $759^\circ\text{C}$  pada 1 atm.



Gambar 3.4 Kalium Nitrat ( $\text{KNO}_3$ )

### 3.3 Alat yang Digunakan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mesin MTS Landmark 100 kN

Mesin Mesin MTS Landmark 100 kN digunakan sebagai alat uji tarik dan perambatan retak fatik pada penelitian ini. Mesin ini terdapat pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 3.5 Mesin MTS Landmark 100 kN

2. Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

Alat ini terdapat pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung yang berfungsi untuk mengukur panjang spesimen uji baik sebelum maupun sesudah dilakukan pengujian tarik.



Gambar 3.6 Jangka Sorong

**Tabel 3.1** Spesifikasi Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

Detail Spesifikasi	
Nama Merek	Mutituyo
Akurasi	0.02 mm / 0.001 in (100 mm)
Range	0-150 mm / 0-6 in
Indikasi Minimum	0.01 mm / 0.0005 in
Standar Temperatur	20°C
Berat	800 gram

3. Pemanas Induksi (*Induction Heater*)

Pemanas induksi merupakan alat yang berfungsi untuk memanaskan spesimen pada proses austenisasi.



Gambar 3.7 Pemanas Induksi (*Induction Heater*)

4. *Thermogun*

*Thermogun* berfungsi untuk melakukan pengukuran temperatur pada spesimen saat proses autenisasi.

Gambar 3.8 *Thermogun Laser***Tabel 3.2** Spesifikasi *Thermogun Laser*

Detail Spesifikasi	
Nama Merek	<i>SMART SENSOR</i>
Material	ABS Plastic
Measuring Range	-18~1650°C (0~3002°F)
Accuracy	± 2°C
Resolution	0.1°C or 0.1°F (1000°C)
Repeatability	± 1°C
Response Time	500mSec, 95% response
Emissivity	0.10~1.00
Distance Spot Ratio	20:1
Display	LCD
Laser Type	Class II, 635nm, <1mW
Operating Temperature	0-40°C / 32~104°F
Operating Humadity	10-95%RH non-condensing, up to 30°C (86°F)
Storage Temperature	-20~60°C / -4~140°F
Power Supply	1 * 9V Battery

#### 5. Dapur *Salt Bath*

Dapur *salt bath* berfungsi pada proses *austempering* yang terdiri dari tungku berisikan larutan garam dengan komposisinya terdiri dari (50% NaNO<sub>3</sub> + 50% KNO<sub>3</sub>), selain itu juga terdapat *temperature controller* sebagai pengatur temperatur tungku yang terhubung dengan termokopel berfungsi sebagai sensor temperatur.



Gambar 3.9 Dapur *Salt Bath*

6. *Clip Gage on Displacement (COD)*

Alat ini terdapat pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung yang berfungsi untuk mengukur variasi celah diantara takik dari spesimen pada pengujian perambatan retak fatik.



Gambar 3.10 *Clip Gage on Displacement (COD)*

**Tabel 3.3** Spesifikasi *Clip Gage on Displacement (COD)*

Detail Spesifikasi	
Nama Merek	Epsilon
Model	3541-008M-040M-ST
Gauge Length	8.00 mm
Travel	+4.00 mm, -1.00mm
Temperature	-40°C to 100°C (-40°F to 120°F)

7. *Dino-Lite (Digital Microscope)*

Alat ini terdapat pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung yang berfungsi untuk mengamati panjang retak yang terjadi selama siklus pembebanan dan dipasang pada mesin MTS Landmark 100 kN. Alat ini bekerja dengan software *Dino Capture*, dimana harus



dilakukan kalibrasi terlebih dahulu agar nilai dari panjang retak yang diukur pada pengamatan akurat.



Gambar 3.11 *Dino-Lite (Digital Microscope)*

### 3.4 Metode Penelitian

Adapun prosedur dalam melakukan penelitian yang dibagi menjadi tiga tahap yaitu tahap persiapan spesimen uji, pembuatan spesimen uji, tahap perlakuan panas, proses *austempering*, tahap pengujian serta tahap terakhir adalah tahap pengambilan data,

1. Persiapan Spesimen Uji

Material yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah baja AISI 4140.

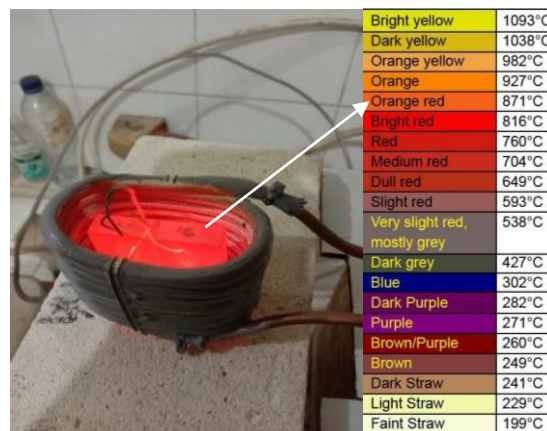
2. Pembuatan Spesimen Uji

Pada tahap ini adalah melakukan standarisasi terhadap dimensi baja AISI 4140, yaitu sesuai dengan standar ASTM E8 (Gambar 3.8). Proses pemesinan yang digunakan untuk spesimen uji adalah *Vertical Machining Center (CNC Milling Machine)*.

3. Proses Austenisasi

Adapun tahap-tahap yang dilakukan pada proses austenisasi untuk spesimen baja AISI 4140 adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen yang akan dilakukan proses *austenisasi*.
2. Memasang spesimen pada *induction heater*.
3. Memasang kabel *power induction heater*.
4. Menghidupkan keran air dan memastikan air pada selang mengalir dengan baik.
5. Menghidupkan MCB *power supply*.
6. Menunggu jarum yang terdapat pada volmeter stabil.
7. Menghidupkan termokontrol dan menghidupkan *thermogun*.
8. Memastikan setiap bagian dari *induction heater* dalam keadaan baik.
9. Menghidupkan MCB modul.
10. Memanaskan spesimen sampai dengan mencapai temperatur 850°C (dibutuhkan waktu 2 menit untuk proses spesimen mencapai 850°C dari temperatur ruangan).
11. Melakukan *holding time* selama 10 menit pada spesimen.



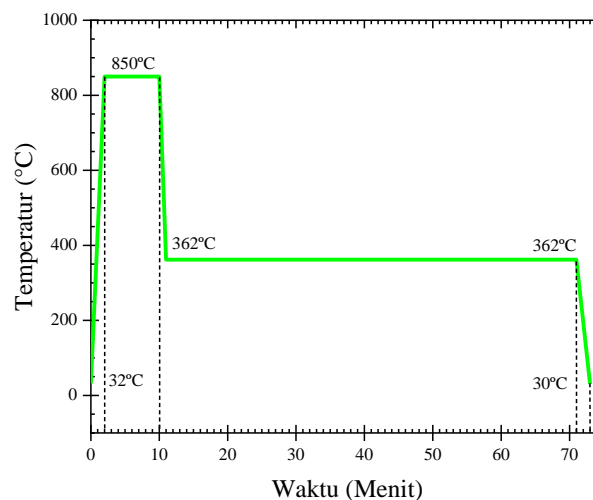
Gambar 3.12 Kalibrasi temperatur spesimen berdasarkan kondisi warna daerah yang dilakukan proses austenisasi menggunakan bagan temperatur warna baja (Issac, B.M)

#### 4. Proses *Austempering*

Setelah proses austenisasi, selanjutnya dilakukan proses *austempering* pada spesimen yang terdiri dari beberapa tahap yaitu :

1. Melakukan pencelupan spesimen yang telah dipanaskan pada temperatur austenisasi ke dalam larutan garam dan ditahan pada

temperatur  $T_1$  °C ( $T_1 = \text{Temperatur awal bainit } (T_{Bs} - 100^\circ\text{C})$ ) dengan *holding time* selama 60 menit. Untuk memperoleh nilai temperatur awal bainit adalah dengan cara memasukkan komposisi kimia dari baja AISI 4140 ke dalam *software* bhadesia, sehingga diperoleh Temperatur awal bainit ( $T_{Bs}$ ) sebesar  $462^\circ\text{C}$ . Kemudian dimasukkan kedalam ketentuannya, dimana  $T_1 = 462^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C} = 362^\circ\text{C}$ . Sesuai dengan data yang diperoleh  $T_1$  yang digunakan sebesar  $362^\circ\text{C}$ .



Gambar 3.13 Diagram Proses Austempering

2. Melakukan pendinginan terhadap spesimen setelah melewati proses *holding time*. Pendinginan dilakukan sampai dengan spesimen mencapai temperatur ruang.
  3. Melakukan pengeringan dan pembersihan terhadap spesimen setelah sebelumnya dilakukan pengeringan.
5. Uji Tarik Statis
- Pada penelitian tugas akhir ini, harus dilakukan pengujian tarik terlebih dahulu untuk mendapatkan data dari nilai tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) dan modulus elastisitas (E). Adapun prosedur yang dilakukan pada pengujian tarik adalah sebagai berikut :
1. Menyiapkan spesimen uji yang sudah dilakukan standarisasi sesuai dengan ASTM E8.
  2. Menghidupkan *chiller* dan *Hydraulic Power Unit* (HPU) .

3. Menghidupkan MTS Landmark 100kN temperatur kontroler.
4. Menghidupkan lampu yang terdapat pada MTS Landmark 100kN.
5. Membuka program *Station Manager* kemudian pilih *file Project 2022* dan *configuration file* tanpa *Extensometer* yaitu *Axial Basic* lalu klik *open*.
6. Pada *station manager* klik *ceklist* pada *Exclusive Control* lalu pada *manual command ceklist* bagian *Enable Manual Command*.
7. Pada *station manager* di *controls detector* ubah *Upper Action* di bagian *axial displacement* dari *interlock* ke *disable* kemudian klik *reset* pada *interlock 1* di *station manager*.
8. Klik *HPU power low* dan tunggu hingga lampu kuning pada tombol berhenti berkedip, kemudian klik *HPU power high* dan tunggu beberapa detik. Lalu melakukan hal yang sama pada *HSM*, klik *HSM power low* dan tunggu beberapa saat, lalu yang terakhir klik *HSM power high*.
9. Setelah posisi *actuator* terdeteksi pada *manual command*, selanjutnya adalah klik posisi *actuator* perlahan untuk membuka katup. Setelah posisi *actuator* sudah dirasa aman terhadap *cross head grip* atas, maka selanjutnya adalah menaikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
10. Mengubah *upper action* di bagian *axial displacement* dari *disable* ke *interlock* pada *detector*.
11. Memilih *template* untuk *Tensile Test* pada *software MTS Test Suite (MPE)*.
12. Memasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian cekam spesimen.
13. Menurunkan *cross head* sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam *grip* bawah dengan kedalaman 45mm atau sesuai dengan tanda yang telah dipasang pada spesimen.
14. Meluruskan *grip* bawah agar sesuai dengan *grip* atas. Pada *manuam command*, klik *control mode* dan ganti *displacement* ke *force* maka *grip* bagian bawah akan dicekam.

15. Setelah itu klik *reset* pada bagian *interlock I station manager* dan pada bagian manual *command* hilangkan *ceklis* di *enable manual command*.
16. Memilih *new test run* pada menu *software MTS Test Suite (MPE)* dan mengatur *setup variables tensile test* yaitu dengan melakukan *input* data panjang spesimen, *gauge length*, diameter dan data *initial speed* serta *secondary speed*
17. Memilih bagian OK dan *Run Test*

## 6. Uji Perambatan Retak Fatik

Setelah mendapatkan perlakuan *austempering* dan pengujian tarik, selanjutnya spesimen akan dilakukan pengujian perambatan retak fatik menggunakan mesin MTS *Landmark* 100kN dengan tahapan antara lain sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen dengan standar E647.
2. Membuka program *Controller 793B*, kemudian klik *manual command* dan pilih *displacement mode*.
3. Menaikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
4. Memasang spesimen pada *cross head grip* atas dan cekam spesimen.
5. Menurunkan *cross head* sampai bagian ujung bawah spesimen masuk ke dalam *grip* bawah dengan mencapai kedalaman 3 mm.
6. Memilih bagian *manual command* dan klik *control mode* ke *force* pada program *Controller 793B*.
7. Memilih bagian *auto offset* untuk *force* dan mulai untuk cekam *grip* bagian bawah sehingga posisi spesimen tidak akan berubah.
8. Membuka *software MTS Test Suite (MPE)* dan pilih *template* untuk *Fatigue Crack Growth (FCG)*
9. Memasukkan data *Pmaks* dan *Pmin*, siklus total, *incremental cycles* untuk mengatur stop pada mesin secara otomatis setiap

jumlah siklus tertentu dengan tujuan agar retak dapat diamati atau diukur dengan mikroskop digital portable.

10. Memasukkan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).

11. Memilih bagian *Run* untuk memulai pengujian.

#### 7. Observasi Mikrostruktur dan SEM Fraktografi

Observasi mikrostruktur berfungsi untuk mengetahui perubahan mikrostruktur serta mempelajari fasa-fasa dan SEM fraktografi yang dilakukan untuk mengetahui jenis perpatahan yang terjadi pada spesimen. Pengujian ini dilakukan sesudah pengujian fatik. Observasi mikrostruktur menggunakan *Inverted Optycal Microscope* dan SEM fraktografi dilakukan menggunakan menggunakan kontras topografi (detektor elektron sekunder).

### 3.5 Pengambilan Data

Adapun pengambilan data yang diperoleh pada proses pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

#### 1. Uji Tarik Statis

**Tabel 3.4** Data Hasil Uji Tarik Statis

Spesimen	Tegangan (MPa)		Energi	Energi	Modulus	Elongasi
	Luluh (0.2%)	Ultimate	Plastis (kJ)	Elastis (kJ)	Elastis (%)	Total (%)
Non Treatment						
Austempering						

#### 2. Uji Perambatan Retak Fatik

**Tabel 3.5** Data Hasil Uji Perambatan Retak Fatik

No	Jumlah siklus	Panjang retak (mm)	
		Compliance	Pengukuran
1			
30	dst	PATAH	PATAH

### 3.6 Metode yang Digunakan

Metode yang digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik pada penelitian ini adalah metode *Incremental Polynomial* (ASTM E647, 2004). Metode ini digunakan untuk menghitung  $da/dN$  meliputi pas polinomial urutan kedua (parabola) ke rangkaian  $(2n+1)$  titik data yang berurutan, di mana  $n$  biasanya senilai 1,2,3,4 atau 4 (ASTM E647, 2004).

$$a_i = b_0 + b_1 \left( \frac{N_i - C_i}{C_2} \right) + b_2 \left( \frac{N_i - C_i}{C_2} \right)^2 \quad (3.1)$$

Dimana,

$$-1 \leq \left( \frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \leq +1 \quad (3.2)$$

Laju perambatan retak pada  $N_i$  diperoleh dari turunan parabola di atas, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\left( \frac{da}{dN} \right) d_i = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \left( \frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \quad (3.3)$$

Berdasarkan *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates* (ASTM International 2015), Persamaan 3.4 berlaku untuk mengukur faktor intensitas tegangan pada spesimen CT standar ASTM E647 untuk berbagai panjang retakan dimana spesimen dibebani pada kondisi tarik.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} Y \quad (3.4)$$

$$Y = (0,886 + 4,64(\alpha) - 13,32(\alpha)^2 + 14,72(\alpha)^3 + 5,6(\alpha)^4) \quad (3.5)$$

Dengan  $\alpha = a_r/W$

$$a_r = 1 - 4,5(y) - 13,15(y^2) - 172,55(y^3) + 879,94(y^4) - 1514,67(y^5) \quad (3.6)$$

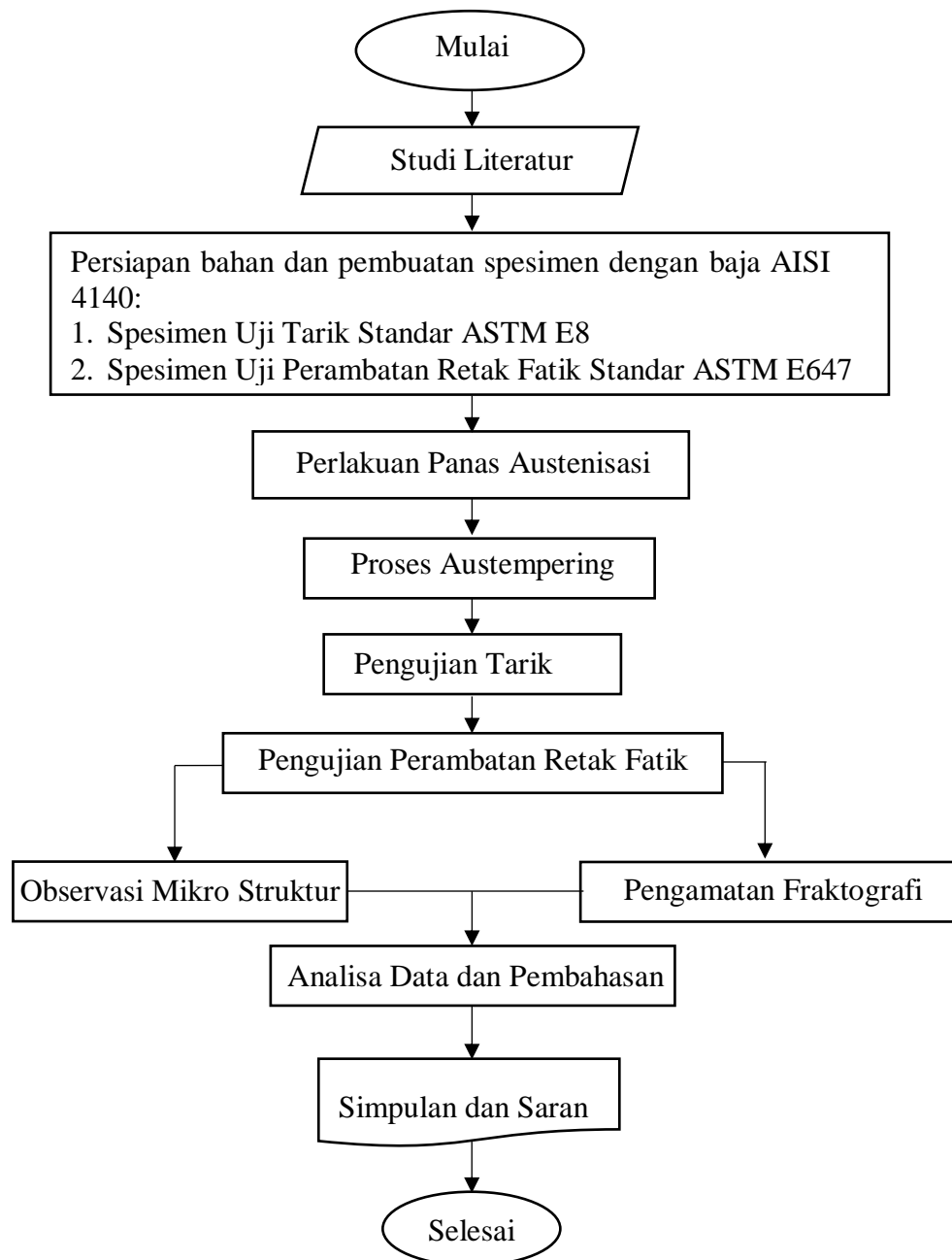
Dimana,

$$y = 1 / (1 + \sqrt{ECB}) \quad (3.7)$$

$$ECB = E \left( \left( \frac{1}{slope} \right) B \right) \quad (3.8)$$

### 3.7. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.14 Diagram alir penelitian



## V. SIMPULAN DAN SARAN

### A. Simpulan

Pada penelitian terhadap baja AISI 4140 yang diberi perlakuan *austempering* dengan temperatur penahanan sebesar 362°C dan waktu penahanan selama 60 menit dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perlakuan *austempering* pada baja AISI 4140 menyebabkan peningkatan terhadap nilai *yield stress* sebesar 8,7% dibandingkan kondisi *non treatment*.
2. Setelah perlakuan *austempering*, ditemukan struktur mikro bainit pada baja AISI 4140. Sesuai dengan bentuknya, jenis bainit tersebut adalah *lower bainite* yang berperan mengurangi laju perambatan retak. Terdapat juga struktur *retained austenite*, akibat dari proses transformasi menjadi bainit yang tidak sempurna dan berfungsi untuk membantu menunda propagasi *microcrack*. Ferit terbentuk dari karbon yang berdifusi keluar dari austenit. Martensit terbentuk akibat dari transformasi austenit menjadi ferit.
3. Perlakuan *austempering* pada baja AISI 4140 dapat meningkatkan siklus fatik dibandingkan dengan baja AISI 4140 kondisi *non treatment*. Hal tersebut karena pengaruh struktur bainit yang terbentuk setelah perlakuan *austempering*. Struktur bainit tersebut mampu mengurangi laju perambatan retak fatik dengan presentase konstanta eksponensial ( $m$ ) sebesar 17% lebih rendah dari kondisi *non treatment* sehingga dapat meningkatkan umur fatik pada baja AISI 4140 kondisi *austempering*.
4. Baja AISI 4140 dengan perlakuan *austempering* menghasilkan retakan intergranular. Permukaan patahan terdiri dari retakan sekunder, *fatigue voids*, *cleavage* dan *ridges*.

## B. Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, untuk mendukung penelitian selanjutnya maka penulis memberikan saran yang dapat disampaikan sebagai berikut :

1. Perlunya memastikan baja AISI 4140 yang akan diberi perlakuan *austempering* harus dalam kondisi *raw material*, tidak diberi perlakuan lain sebelumnya.
2. Perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi *holding time* pada saat proses *austempering*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allain, S. Y. P., Aoued, S., Poulon, A. Q., Goune, M., Danoi, F., Hell, J. P., Bouzat, M., Soler, M dan Geandier, G. 2018. In Situ Investigation of the Iron Carbide Precipitation Process in a Fe-C-Mn-Si Q&P Steel. *Metals*, Vol.11, No.7 , p.1087.
- Andoko, A dan Puspitasari, P. (2017) The Fatigue Crack Growth Rate Due to Single-Step Austempered Heat Treatment in Nodular Cast Iron. *MATEC Web of Conference* 97, 01028
- Akbar, A. R. 2018. Pengaruh Temperatur Austempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja AISI 51B60 Dan Baja AISI 9260 Bekas. (Skripsi). Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Ameh, E. S dan Onyekpe, B. A. 2016. Influence of High Strength Steel Microstructure on Fatigue Crack Growth Rate. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. Vol.5, No.7, pp-79-84.
- Badaruddin, M., Bakti, B., Prasetyo, B dan Sugiyanto. 2021. Effect Of Austempering Temperatures On Surface Hardness Of AISI 4140 Steel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1173 012027.
- Badaruddin, M., Kuncoro, P. S., Suudi, A dan Sugiyanto. 2018. Low Cycle Fatigue Analysis Of an Annealed AISI 4140 Steel. *Prosiding SNTTM XVII, Rekayasa Material*, Hal.56-61.
- Bilal, M. M., Yaqoob, K., Zahid, M. H., Haq, E. U., Tanveer, W. Q, Wadood, A dan Ahmed, B. 2019. Effect of Austempering Conditions On The Microstructure and Mechanical Properties of AISI 4340 and AISI 4140 Steels. *International Journal of Materials Research and Technology*, 8(6): 5194-5200.

- Birenis, D., Ogawa, Y., Matsunaga, H., Takakuwa, O., Yamabe, J., Prytz, O dan Thogersen, A. 2018. Hydrogen-Assisted Fatigue Crack Propagation in a Pure BCC Iron. Part II: Accelerated Regime Manifested by Quasi-Cleavage Fracture at Relatively High Stress Intensity Range Values. MATEC Web of Conference 165, 03010.
- Callister Jr, William D. Jr. (2007). Material Science and Engineering an Introduction-7th Edition. New Jersey: John Wiley and Sons. 1-720 Page.
- C. J McMahon and M Cohen,. 1965. Initiation of Cleavage in Polycrystalline Iron Acta Met, Vol.13, pp. 591.
- Dalwatkar, P., Prabhu, N dan Singh, R. K. P. 2018. Effect of Austempering Temperature and Time on Mechanical Properties of SAE 9260 Steel. AIP Conference Proceedings 1957, 040001.
- Guan, M dan Yu, H. (2013) A Comparison Between Ferrite-Pearlite and Ferrite-Bainite Microstructures. Material Science & Engineering A 559, pp.875-881.
- Kapito, A., Mostert, R. J., Stumpf, W. E and Siyasiya, C.W. Carbide-Free Bainitic Steels For Rail Wheel Applications. 2019. IOP Conference Series Material Science and Engineering 655:012012.
- Lan, L., Chang, Z and Fan, P. 2018. Exploring the Difference in Bainite Transformation with Varying the Prior Austenite Grain Size in Low Carbon Steel. Metals, Vol.8, No.12, p.988.
- Lulu, F., Hu, F., Zhou, W., Ke, R., Zhang, G., Wu, K and Qiao, W. 2019. Influences of Alloying Elements on Continuous Cooling Phase Transformation and Microstructure of Extremely Fine Pearlite. Metals, Vol.9, No.1, p.70.
- Mahardika, S. 2020. Analisa Rekayasa Sifat Mekanik Baja AISI 4140 Dengan Variasi Suhu Tempering Untuk Meningkatkan Keuletan Dan Kekerasan Material. Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi. Jilid 6, hal. 64-69.

- Manta, F. 2017. Proses Austempering Dalam Pembuatan Baja Tahan Aus Berstruktur Bainit. (Skripsi). Bidang Keahlian Rekayasa Dan Sistem Manufaktur, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sepuluh Nopember, Surabaya.
- McEvily, A. J dan Matsunaga, H. 2010. On Fatigue Striations. Transaction B: Mechanical Engineering, Vol.17, No.1, pp. 75-82.
- Nagarajan, V. R., Putatunda, S. K dan Boileau, J. 2017. Fatigue Crack Growth Behavior of Austempered AISI 4140 Steel with Dissolved Hydrogen. Metals, Vol 7, No.11, p.466.
- Niazi, N., Nisar, Salman dan Shah, A. 2014. Austempering Heat Treatment of AISI 4340 Steel and Comparative Analysis of Various Physical Properties at Different Parameters. International Journal Of Multidisciplinary Sciences And Engineering. Vol. 5, No.10, Hal.6-11.
- Parker, E. R. 1967. Material Data Book, For Engineer and Scientists, Mc.Graw-Hill Book Company, New York.
- Sanyoto, B. L dan Berata, W. 2008. Laju Perambatan Retak Plat Aluminium 2024 T3 Dengan Beban Fatigue Unaksial Pada Rasio Dan Jarak Diameter Lubang Berbeda. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM, Vol.2, No.2, Hal.82-91.
- Speer J G, Edmonds D V, Rizzo F C and Matlock D K 2004 Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation, Curr Opin Solid State Mater Sci 8(3-4) 219-237.
- Suhaimi, M. D. A. 2019. Three Dimensional Fatigue Crack Growth Analysis Using Failure Mechanism Approach In Ansys. (Thesis). Bachelor Engineering, Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Malaysia.
- Sunder, R., Porter, W.J dan Ashbaugh. (2004) Fatigue Voids and Their Significance. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.
- Surojo, E., Anindito, J., Paundra, F., Prabowo, A. R., Budiana, E. P., Muhayat, N., Badaruddin, M dan Triyono. 2021. Effect Of Water Flow And Depth On

Fatigue Crack Growth Rate Of Underwater Wet Welded Low Carbon Steel SS400. *Open Engineering*, Vol.11, No.1, pp.329-338.

Thao, B. P. 2021. Microstructural Factors Influencing Fatigue Crack Growth Mechanism In Low-Carbon And High-Carbon Steels. (Thesis). Material Science, Nagaoka University of Technology, Japan.

Wang, J., Shen, Y., Liu, Y., Wang, F and Jia, N. 2019. Tailoring Strength and Ductility of a Cr-Containing High Carbon Steel by Cold-Working and Annealing. *Metals*, Vol.12, No.24, p.4136.

Wang, Y., Liu, B., Pan, Q., Zhao, J., Zhao, X., Sun, H., Xu, D and Yang, Z. 2022 Effect of Austempering on Mechanical Properties of Nb/V Microalloyed Bainitic Bearing Steel. *Crystal*, 12, 1001.

Wu, Z., Yang, M and Zhao, K. 2021. Fatigue Crack Initiation and Propagation at High Temperature of New-Generation Bearing Steel. *Metals*, 11, 25.

Widyawati, F., Achyarsyah, M dan Hidayat, E. 2014. Jurnal Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin dan Manufaktur, Program Studi Teknologi Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung.

Yang, M., Sousa, B., Smith, R., Sabarou, H., Cote D., Zhong Y dan Sission, R. D. 2021. Bainite Percentage Determination and Effect of Bainite Percentage on Mechanical Properties in Austempered AISI 5160 Steel. *Materials Performance and Characterization* 10. No.1.

Yurt, Y. 2016. Improving Mechanical Properties Of Cardan Shafts Manufactured From AISI 4140 Steel Materials. (Thesis). Material Science and Mechanical Engineering, Institute of Science and Engineering, Meliksah University, Turkey.

Xu, L., Wu, H dan Chen, Y. 2018. Interpretation Of The Abnormal High-Temperature Flow Behavior Of Fe-Mn-Al Duplex Lightweight Steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 418(1):012006.