

**ANALISIS PERAMBATAN FATIK BAJA *LEAF SPRING* JIS SUP9
DIBERIKAN PERLAKUAN PANAS AUSTEMPERING**

TESIS

Oleh

**AHMAD KURNIAWAN PURGA
NPM 2025022001**



**MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**ANALISIS PERAMBATAN FATIK BAJA *LEAF SPRING* JIS SUP9
DIBERIKAN PERLAKUAN PANAS AUSTEMPERING**

Oleh

AHMAD KURNIAWAN PURGA

Tesis

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

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

ABSTRAK

ANALISIS PERAMBATAN FATIK BAJA *LEAF SPRING* JIS SUP9 DIBERIKAN PERLAKUAN PANAS *AUSTEMPERING*

Oleh

AHMAD KURNIAWAN PURGA

Baja JIS SUP9 mempunyai sifat mekanik yang mampu menahan beban secara berkelanjutan. Terkait hal tersebut, diperlukan pengamatan lanjutan dalam rangka mengetahui tingkat kekuatan dan kelelahan baja yang akan digunakan untuk memprediksi umur pakai dengan cara melakukan eksperimen uji tarik dan uji fatik, lalu diberikan perlakuan panas Austempering dengan larutan garam selama 120 menit pada temperatur 800 derajat Celcius, kemudian dilakukan pendinginan pada temperatur ruang. Hasil uji tarik, yaitu tegangan maksimal baja mengalami kenaikan menjadi 1087,16 MPa sehingga spesimen menjadi getas. Hasil uji fatik menunjukkan bahwa pada spesimen yang tegak lurus terhadap arah pengerolan spesimen memiliki siklus 60000N dan perambatan retak 20,8 mm, sedangkan pada spesimen dengan arah pengerolan yang sama, menghasilkan siklus 37500N namun panjang retak 21,2 mm. Hasil pengujian tersebut menunjukkan sifat high cycle fatigue spesimen karena pada pengamatan struktur mikro dengan Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM) menunjukkan Fasa Perlit, Bainit dan Ferit. Hal tersebut merupakan alasan dan jawaban kenapa Baja JIS SUP9 masih bisa diandalkan sebagai bahan pegas kendaraan yang membawa beban.

Kata Kunci : Baja JIS SUP9, Uji Tarik, Uji Fatik, *Austempering*, Mikrostruktur

ABSTRACT

FATIGUE PROCESS ANALYSIS OF JIS SUP9 LEAF SPRING STEEL GIVEN AUSTEMPERING HEAT TREATMENT

By

AHMAD KURNIAWAN PURGA

JIS SUP9 steel is known for its mechanical properties that are able to withstand continuous loads. Regarding this, further observation is needed to comprehensively determine the strength and fatigue characteristic of JIS SUP9 steel which will be used to predict its service life by conducting both tensile and fatigue test experiments, then subjecting the steel to Austempering heat treatment with a salt solution at 800 degrees Celsius for 120 minutes followed by cooling to room temperature. The results of the tensile test showed the maximum stress of the steel indicating a higher strength to 1087.16 MPa hence the specimen became brittle. The fatigue test results showed that the specimen perpendicular to the rolling direction had a cycle of 60,000N and a crack propagation of 20.8 mm, whereas the specimen with the same rolling direction produced a cycle of 37,500N but a crack length of 21.2 mm. The test results showed the high cycle fatigue properties of the specimen because microstructure observations using Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM) revealing Pearlite, Bainite, and Ferrite phases. This is the reason why JIS SUP9 Steel can still be relied on as a spring material for vehicles that carry loads.

Keywords : JIS SUP9 Steel, Tensile Test, Fatigue Test, Austempering, Mikrostruktur

Judul Tesis

**: ANALISIS PERAMBATAN FATIK BAJA
LEAF SPRING JIS SUP9 DIBERIKAN
PERLAKUAN PANAS AUSTEMPERING**

Nama Mahasiswa

: Ahmad Kurniawan Purga

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2025022001

Program Studi

: Magister Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Prof. M. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19721211 199803 1 002



Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.
NIP 19570411 198610 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin



Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19710817 199802 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. M. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.**



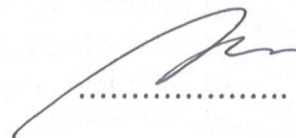
Anggota Penguji : **Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.**



Penguji Utama I : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.**



Penguji Utama II : **Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **13 Juni 2024**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Ahmad Kurniawan Purga

NPM : 2025022001

Fakultas : Teknik

Jurusan : Teknik Mesin

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Menyatakan bahwa Tesis saya dengan Judul “ANALISIS PERAMBATAN FATIQ BAJA *LEAF SPRING* JIS SUP9 DIBERIKAN PERLAKUAN PANAS AUSTEMPERING” adalah karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur didalam Pasal Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 318/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, Juni 2024

Yang Membuat Pernyataan,



Ahmad Kurniawan Purga

NPM. 2025022001

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kotagajah Kabupaten Lampung Tengah pada tanggal 16 Oktober 1993, sebagai anak ketiga dari empat bersaudara, dari Ayah yang bernama M. Rifai Basri dan Ibu Sri Dwiyatmani.

Pendidikan diawali Taman Kanak-kanan (TK) Pertiwi Kotagajah pada tahun 1997 hingga 1998, Sekolah Dasar (SD) Negeri 3 Kotagajah tahun 1998 hingga tahun 2005, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 2 Kotagajah tahun 2005 hingga tahun 2008 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 1 Kotagajah sejak 2008 hingga 2011. Pada tahun 2011 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan lulus pada tahun 2018.

Pada tahun 2020 penulis melanjutkan pendidikan di Program Studi Magister Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Pembelajaran Jarak Jauh (PJJ) dan lulus pada tahun 2024, serta pada tahun 2021 penulis bekerja di Bappeda Provinsi Lampung sebagai Konsultan Individual hingga tahun 2024.

PERSEMBAHAN

Tesis ini Penulis Persembahkan kepada :

1. AYAH (M. Rifai Basri bin Basri) dan IBU (Sri Dwiyatmani binti Sugimin Martosubroto).
2. Cikwo ERDA YUSNITA, Cikngah FITRI YUSTINA dan Adek NURIL SYAHIDA, yang selalu memberi motivasi penulis untuk selalu menyelesaikan Tesis hingga selesai, selalu mendukung penulis baik secara materi maupun moral mengingatkan pesan Ibu Kalau Tesis ini harus diselesaikan dengan penuh Tanggungjawab karena sudah dimulai.
3. Keluarga Besar Basri bin Abdul Hamid dan Sugimin Martosubroto bin Atmo Sentono.

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur penulis ucapkan kepada ALLAH SWT, Tuhan Pemilik segala isi baik di Bumi ataupun di Langit, karena atas berkat Rahmat, Karunia dan Izin-Nya, Penulis dapat menyelesaikan Tesis ini diwaktu yang tepat dan baik.

Tesis ini memiliki Judul “Analisis Perambatan Fatik Baja *Leaf Spring* JIS SUP9 diberikan Perlakuan Panas *Austempering*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik di Universitas Lampung. Dalam kesempatan ini penulis dengan lembar ucapan terimakasih ini mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
5. Bapak Dr. Harmen, ST., MT., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin.
6. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing utama atas kesediaanya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam proses menyelesaikan Tesis ini.
7. Bapak Prof. Dr. Sugiyanto, M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua atas kesediannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam proses menyelesaikan Tesis ini.
8. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M. Met. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan masukan dan saran selama proses pengujian.

9. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran selama proses pengujian.
10. Agus Sugiri, ST., M. Eng., selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang selalu memberikan arahan dan masukan serta dukungan moril kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian.
11. Rekan Kerja Bidang P3M Bappeda Provinsi Lampung yang sudah memberikan dukungan secara moril kepada penulis untuk dapat menyelesaikan Penelitian.
12. Teman-teman kuliah Program Studi Magsiter Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2019 dan 2020.
13. Teman-teman kuliah Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2011.
14. Teman-teman seperjuangan yang selama kuliah selalu galau tapi optimis selesai hingga wisuda, Panji Mario Leksono dan Eko Wahyu Saputra.
15. Kepada Mas Salam yang selalu membantu membuatkan keperluan surat menyurat selama perkuliahan di Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
16. Kepada Mas Dadang yang selalu membantu menyiapkan tempat ketika seminar proposal, seminar hasil dan ujian komprehensif.
17. Semua pihak yang membantu penulis untuk menyelesaikan Tesis ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari banyak kekurangan dalam penyusunan dalam Tesis ini, oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 13 Juni 2024
Penulis,

Ahmad Kurniawan Purga
NPM. 2025022001

DAFTAR ISI

COVER	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
JUDUL TESIS	iv
MENGESAHKAN	v
SURAT PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
UCAPAN TERIMA KASIH	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	4

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Baja.....	5
2.2 Uji Tarik	6
2.3 Uji Fatik	9
2.4 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatmen</i>).....	13
2.5 <i>Austempering</i>	14

2.6	Mikro Struktur Baja	17
2.7	Diagram Fe-Fe ₃ C	20
2.8	SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	21
2.9	Transformasi Martensit	21
2.10	Pengujian <i>Optical Microscope</i>	23
2.11	Baja Pegas Daun JIS SUP9	23
2.12	Logaritma Regangan Sejati	24

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	25
3.2	Alat dan Bahan Pengujian	26
3.3	Dimensi Baja JIS SUP9	27
3.4	Prosedur Pengujian	28
3.5	Diagram Alir Pengujian	33

IV. PEMBAHASAN

4.1	Pengujian Tarik dan Analisanya	34
4.2	Pengujian Fatik dan Analisanya	37
4.3	Pengamatan Mikrostruktur dan Fraktografi	41

V. PENUTUP

5.1	Simpulan	46
5.2	Saran	47

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Uji Tarik	7
Gambar 2.2	Benda kerja bertambah panjang ΔL ketika diberi beban P ...	8
Gambar 2.3	Perambatan Retak Paris Law	10
Gambar 2.4	Diagram kesetimbangan Fe-Fe ₃ C	20
Gambar 2.5	Diagram transformasi isothermal untuk besi-karbon paduan	22
Gambar 2.6	Logaritma Regangan Sejati	24
Gambar 3.1	Mesin MTS Landmark 100kN	26
Gambar 3.2	Spesifikasi Mesin MTS-Landmark Model 370-10	26
Gambar 3.3	Baja JIS-SUP9 sebelum proses mekanik	28
Gambar 3.4	Spesimen Uji Tarik	28
Gambar 3.5	Spesimen Uji Fatik	28
Gambar 3.6	Proses Pemanasan Spesimen sebelum dilakukan Austempering dengan Larutan Garam	30
Gambar 3.7	Diagram Proses Austempering	30
Gambar 3.8	Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 4.1	Kurva perambatan retak baja JIS SUP 9 dengan kondisi pembebann dan arak perambatan retak berbeda	34
Gambar 4.2	Kurva Perambatan Retak Baja JIS SUP9 dengan kondisi Pembebanan dan arah Perambatan retak berbeda	37
Gambar 4.3	Kurva dadN dan ΔK baja JIS SUP 9 dengan kondisi pembebanan fatik dan arah retak berbeda	38
Gambar 4.4	Plot data dadN dan ΔK hasil experiment dan plot kurva linier fitting untuk menentukan nilai dadN dan ΔK dalam daerah perambatan retak zona stabil: (a-b) data experiment untuk spesimen CT dengan orientasi beban dan arah retak	

	X-Y, dan (c-d) untuk spesimen CT dengan orientasi beban dan arah retak Y-X	39
Gambar 4.5	Hasil Pengamatan <i>Optical Microscope</i> dengan pembesaran 1000X atau 20µm Baja JIS SUP9	42
Gambar 4.6	Hasil Pengamatan <i>Scanning Elektron Microscope</i> (SEM) dengan pembesaran 100 µm dan 20µm Baja JIS SUP9	43
Gambar 4.11	Spektrum Hasil Uji EDS Baja JIS SUP9	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Dimensi Baja JIS-SUP9 sebelum proses mekanik	27
Tabel 4.1	Sifat kekuatan tarik dan koefisien pengerasan regangan baja JIS SUP 9	35
Tabel 4.2	Nilai konstanta laju perambatan retak fatik baja JIS SUP 9 dan nilai ΔK_{th}	39
Tabel 4.3	Komposisi Unsur Kandungan Baja JIS SUP9 Pada luasan tertentu	44

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Suspensi yang diterapkan pada kendaraan bermotor seperti mobil akan membuat pengendara merasa nyaman berada di dalam mobil, karena mobil bisa melaju dengan stabil. Suspensi bisa membantu meredam getaran atau guncangan yang terjadi, ketika Anda melewati sebuah jalan yang tidak bagus atau cenderung bergelombang. Kendaraan di Indonesia oleh perusahaan otomotif diberikan 2 jenis peredam kejut atau per atau suspensi untuk meredam guncangan ketika sedang berkendara, pertama yaitu *Coiled Spring* dan *Leaf Spring*. Dalam perkembangannya suspensi pada kendaraan pribadi lebih banyak menggunakan jenis *coiled spring*, hal tersebut karena lebih memberikan kenyamanan ketika melewati jalan yang bergelombang atau rusak, sedangkan *leaf spring* mulai ditinggalkan untuk kendaraan penumpang tetapi tetap dipertahankan pada kendaraan yang fungsinya membawa beban yang berat. Perusahaan kendaraan bermotor dengan dimensi besar masih memanfaatkan *leaf spring* sebagai suspensi karena dinilai kuat untuk menahan beban.

Ketahanan Baja JIS SUP9 dalam menerima beban kendaraan didukung oleh sifat mekanik seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik, modulus elastisitas serta elongasi atau disebut faktor metalurgi, namun seiring berjalannya waktu spesimen tersebut

tetap mengalami degradasi sifatnya yang disebabkan oleh sering menerima beban yang dinamis atau sering disebut kerusakan Fatik. (Ye et al. 2010).

Dalam penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya terdapat penelitian dengan judul Pengaruh Perlakuan Panas *Single* dan *Double Quenching-Tempering* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja JIS SUP 9A , pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa Baja *Leaf Spring* dalam kerjanya dapat menerima beban berat dan memiliki kekuatan mekanik yang baik seperti kekuatan tarik dan kekuatan impak serta struktur mikro fase martensit sangat halus. Meskipun begitu, Baja Pegas memiliki tingkat kelelahan yang akan merambat pada keretakan spesimen karena dilakukan pembebanan yang dilakukan secara berulang. (Indratmoko, 2023).

Merujuk pada penelitian sebelumnya menggunakan perlakuan panas single dan double quenching terhadap spesimen JIS SUP9A dan belum adanya pengujian dengan perlakuan panas *Austempering*, oleh karena itu penulis dengan Baja JIS SUP9 melakukan Pengujian Tarik dan Perambatan Retak Fatik dengan perlakuan panas *Austempering* dengan larutan garam untuk mengetahui lebih jauh terkait pengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro, sehingga penulis ingin menganalisis dan mengevaluasi kekuatan tarik dan perambatan retak fatik terhadap Baja JIS SUP9 dengan beban statis dan kemampuan baja tersebut mencapai tegangan maksimal setelah dilakukan uji tarik, serta struktur mikro setelah dilakukannya uji tarik dan uji fatik terhadap spesimen menggunakan pengamatan *Optical Microscope* dan *Scanning Electron Microscope*.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan uji JIS SUP9 memiliki tujuan sebagai berikut :

1. Mengevaluasi kekuatan mekanik baja JIS SUP9 yang diproduksi dalam kondisi *hot rolling*.
2. Menganalisis perambatan retak dan bentuk retakan yang terjadi selama pembebanan dinamis.
3. Menganalisis struktur mikro proses manufaktur terhadap kekuatan mekanik dan perambatan retak.

1.3 Batasan Penelitian

Untuk membatasi permasalahan yang terjadi berkaitan dengan penelitian, ada beberapa hal yang menjadi Batasan yaitu:

1. Hanya menentukan kekuatan tarik dalam arah pengerolan (aksial). Tidak melakukan proses tarik tegak lurus dengan arah pengerolan, evaluasi kekuatan tarik hanya pada bahan yang searah proses pengerolan.
2. Pengujian Perambatan retak fatik dilakukan pada kondisi arah ditentukan hanya berdasarkan laju perambatan retak yang terbentuk selama pengujian fatik.
3. Temperature perambatan dilakukan pada suhu ruang.
4. Pengaruh proses pembuatan spesimen dianggap (kekerasan permukaan) tidak berpengaruh yang signifikan terhadap perubahan retak.
5. Modulus elastisitas untuk menentukan parameter komplaiyen berdasarkan atas pengujian tarik dari arah proses pengerolan.

1.4 Sistematika Penulisan

Penelitian ini menggunakan peraturan penulisan Karya Ilmiah yang dibuat oleh Universitas Lampung dimana susunan penulisan atau sistematika penulisannya diatur seperti berikut :

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Rumusan Masalah, Batasan Penelitian dan Sistematika Penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab 2 berisikan teori yang digunakan dan mendukung dalam penelitian.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab 3 berisikan penjelasan terkait Alat dan Bahan Penelitian, Waktu dan Tempat Penelitian, Spesifikasi Bahan Uji, Proses Perlakuan Panas, Tabel Nilai Uji Tarik dan Uji Fatik dan Diagram Alir Penelitian.

IV. DATA PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan data hasil pengujian tarik dan pengamatan bahan uji terhadap perambatan retak serta penjabaran pembahasannya.

V. PENUTUP

Kesimpulan dan Saran.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Baja

Baja adalah paduan logam terdiri dari besi, dengan kandungan lainnya berupa karbon dengan besar antara 0,2 dan 1,7 atau 2,04% menurut beratnya dan tergantung pada kadarnya. Karbon adalah bahan paduan yang paling hemat biaya untuk besi, tetapi berbagai elemen paduan lainnya digunakan seperti mangan, vanadium, dan tungsten. Baja karbon adalah material logam yang terbentuk dari unsur utama Fe dan unsur kedua yang berpengaruh pada sifat-sifatnya kedua yang berpengaruh pada sifat sifatnya adalah karbon, sedangkan unsur yang lain berpengaruh menurut prosesntasnya berpengaruh menurut prosesntasnya (Ashby, 2013). Baja Karbon terdiri dari:

a. Baja Karbon Tinggi

Baja Karbon Tinggi memiliki komposisi unsur karbon $>0,55\%$ dengan karakteristik memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi setelah proses *heat treatment*. Bahkan, jenis baja ini memiliki ketahanan terhadap aus yang sangat baik. Hanya saja nilai daktilitas atau keuletannya sedang, sehingga perlu energi lebih untuk menempa dan membentuk baja sesuai keinginan. Contoh baja karbon tinggi adalah *rolling mills*, *screw drivers*, *pali*, *wire rope*, kunci pas, dan berbagai perkakas dan kebutuhan konstruksi lainnya.

b. Baja Karbon Sedang

Baja Karbon Sedang memiliki komposisi karbon sekitar 0,25% hingga 0,55% dan memiliki karakteristik kekuatan baja cukup tinggi setelah *heat treatment* selain itu nilai ketangguhan cukup baik. Penggunaan baja karbon sedang biasanya untuk pembuatan poros engkol, suku cadang mesin, silinder, sekrup, hingga gandar.

c. Baja Karbon Rendah

Baja ini memiliki komposisi karbon paling rendah di antara yang lainnya, yaitu >0,25%, memiliki karakter kekuatan dan kekerasannya kurang baik. Meski begitu, jenis baja ini memiliki daktilitas yang tinggi sehingga sangat mudah untuk dibentuk. Biaya produksi Baja Karbon Rendah juga rendah, terutama dalam hal penggunaan energi saat proses pembuatannya. Beberapa pengaplikasian jenis baja dengan komposisi karbon rendah ini adalah untuk pembuatan rantai, kawat, beberapa sperepart mesin, pipa, hingga paku.

2.2 Uji Tarik

Pengujian tarik adalah salah satu proses pengujian yang berfungsi untuk mengetahui kekuatan mekanik dari suatu material. Pengujian tarik dilakukan dengan cara melakukan penarikan material dengan gaya tarik secara terus menerus dan teratur sampai material mengalami kegagalan atau patah, dari uji tarik ini, kita bisa mendapatkan nilai tarik yang diperlukan agar material atau spesimen uji mengalami kegagalan. Kemudian dari hasil uji tarik tersebut, kita bisa menjabarkan atau membuatkan sebuah kurva, yaitu kurva tegangan dan regangan, dan dari kurva tersebut kita bisa mencari dan menganalisa daerah elastis, daerah plastis dan nilai titik luluhnya (*yield strength*).



Gambar 2.1 Diagram Uji Tarik (Salindeho, 2013).

Untuk kurva tegangan vs regangan bisa diperoleh dari hasil pengukuran perpanjangan spesimen uji dimana tegangan yang digunakan adalah tegangan membujur rata-rata dari pengujian tarik yang diperoleh dan dibagi dengan luas awal penampang melintang benda.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dimana Σ merupakan Tegangan tarik, N/m^2 (Pa), F adalah Gaya (N) dan A yaitu Luas permukaan (m^2).

Regangan tarik suatu batang yang ditarik dapat didefinisikan dengan cara yang sama sebagai perbandingan antara berkurangnya panjang batang dengan panjang semula yang nilainya lebih kecil dari 0. Sehingga perubahan yang terjadi dari suatu perbandingan pada panjang batang $\Delta\ell/\ell_0$ disebut dengan regangan seperti yang pada persamaan berikut.

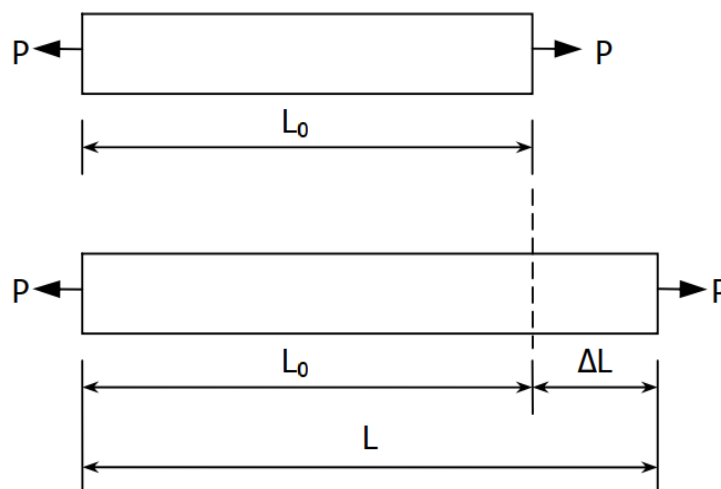
$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (2)$$

Dimana E merupakan Regangan, ℓ adalah Panjang batang (m), ℓ_0 adalah Panjang semula (m) dan $\Delta \ell$ ialah Perubahan panjang (m).

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

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Dimana E merupakan Modulus elastis (GPa), Σ adalah Tegangan (MPa) dan ε ialah Regangan.



Gambar 2.2 Benda kerja bertambah panjang ΔL ketika diberi beban P
(Salindeho, 2013)

Pada waktu menetapkan regangan harus diperhatikan:

- Pada baja yang lunak sebelum patah terjadi pengerutan (pengecilan penampang) yang besar.
- Regangan terbesar terjadi pada tempat patahan tersebut, sedang pada kedua ujung benda uji paling sedikit meregang.

$$\Delta L = \frac{P}{A} \times \frac{L_0}{E} \quad (4)$$

ΔL merupakan pertambahan panjang benda kerja (mm), sedangkan L_0 adalah panjang benda kerja awal (mm), P adalah beban yang bekerja (N), A adalah luas penampang benda kerja (mm^2) dan E adalah modulus elastisitas bahan (N/mm^2).

2.3. Uji Fatik

Kelelahan (*Fatigue*) merupakan kecenderungan pada bahan untuk mengalami kegagalan atau patah jika menerima tegangan secara berulang-ulang yang nilainya dibawah batas kekuatan elastisnya. Untuk diketahui bahwa sebagian besar kerusakan yang terjadi pada komponen mesin disebabkan oleh kelelahan bahan ini. Maka dari itu, kelelahan bahan merupakan sifat yang sangat penting untuk diketahui, tetapi sifat ini sulit untuk diukur karena banyak faktor yang mempengaruhinya.

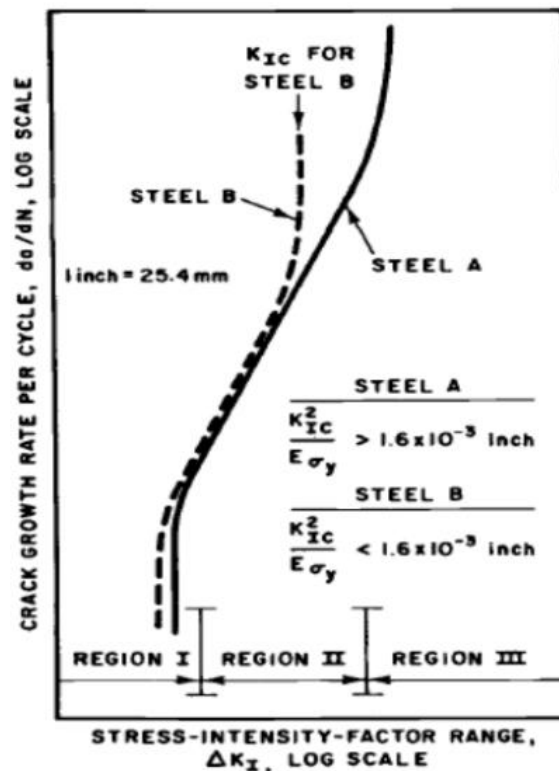
Terdapat tiga fase dalam terjadinya kegagalan bahan akibat fatik (kelelahan) bahan. Ketiga fase tersebut adalah sebagai berikut:

1. Permulaan retak (*crack initiation*)

Diawali dengan adanya *crack* sebagai awal terjadinya fatik kemudian *crack* pada permukaan (seperti goresan, *notch*, lubang-*pitch* dll) akan merambat karena adanya pembebanan yang berulang.

2. Penyebaran retak

Pada fase ini, *crack* mulai merambat seiring dengan tingginya nilai konsentrasi tegangan di *crack initiation*. Penyebaran retak ini berkembang menjadi *microcracks*. Perambatan atau perpaduan *microcrack* tersebut berkembang membentuk *macrocracks* yang akan berujung pada perpatahan bahan.



Gambar 2.3 Perambatan Retak (Andri, 2022)

Berikut penjelasan mengenai pembagian tiap perambatan retak:

a. Region I

Disebut juga dengan region fatigue-threshold (K_{th}). Perambatan terjadi apabila nilai stress intensity factor (ΔK) lebih besar dari pada K_{th} . Pada region ini tidak terjadi perambatan retak dikarenakan nilai $\Delta K < K_{th}$. Nilai ΔK harus lebih besar dari nilai $\Delta (K_{th})$ untuk memungkinkan terjadinya perambatan retak. Nilai da/dN antara region I dan region II adalah:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K^m - (\Delta K + h^m)) \quad (5)$$

b. Region II

Region II merupakan region yang mengalami perambatan retak yang stabil. Perambatan retak dapat dihitung dengan menggunakan hukum paris-erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (6)$$

Keterangan :

C, m = konstanta material

da/dN = kecepatan perambatan fatik

ΔK = perubahan Stress Intensity faktor

c. Region III

Region yang perambatan retaknya tidak stabil dan terjadinya kepecahan. Bila stress intensity factor (K_I) sama dengan stress intensity factor pada kondisi kritis (K_{IC}) maka struktur akan mengalami kepecahan. Nilai da/dN antara region I, II, dan III (bila efek R diperhitungkan) adalah:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_y E} \left\{ \frac{(\Delta K - \Delta K_c + h(1-R))}{(1-R)} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Keterangan :

C, m = konstanta material

da/dN = kecepatan perambatan fatik

ΔK = perubahan Stress Intensity faktor

K = harga kritis K

R = rasio tegangan = $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

3. Patah (*fracture*)

Ini merupakan fase terakhir, bahan akan mengalami perpatahan karena sudah tidak mampu lagi menahan pembebanan secara siklik dan sudah melewati nilai elastisitasnya. Pada tahap ini penjaralan retak yang terjadi pada material

sangatlah cepat sehingga struktur akan pecah menjadi dua dan pada akhirnya akan menghasilkan kerusakan permanen.

Selain tiga fasa terdapat juga dua siklus yang membedakan Fatik, yaitu :

1. *Low Cycle Fatigue (LCF)* yaitu fatik dengan siklus rendah. Pada *low cycle fatigue* memiliki nilai jumlah siklus dibawah $\leq 10^3 = 1000$ siklus dalam kondisi plastis. *Low cycle fatigue* biasanya didesain dengan mengabaikan keseluruhan efek *fatigue* atau dengan mengurangi level tegangan yang diijinkan. Sebagai contoh aplikasi *low cycle fatigue* ini adalah grendel pada laci kecil dekat stir mobil, stud pada roda truk.
2. *High Cycle Fatigue (HCF)* yaitu fatik dengan siklus tinggi. pada *high cycle fatigue* memiliki nilai jumlah siklus antara 10^4 sampai 10^7 dan di luar kondisi elastis. Sebagai contoh aplikasi *high cycle fatigue* adalah engsel pintu mobil, panel badan pesawat, dan pemukul softball aluminium.

Kondisi *fatigue* atau fatik ini dapat dipengaruhi atau dapat diubah dengan memperhatikan beberapa faktor, faktor – faktor yang dapat mempengaruhi atau dapat mengubah yaitu sebagai berikut :

1. Tegangan Konsentrasi

Terjadi pada daerah-daerah benda yang dimensinya berubah drastis dan pemicu lain terjadinya konsentrasi tegangan seperti *fillet*, *notch*, alur pasak, positas, inklusi dan lain-lain akan menyebabkan menurunnya umur *fatigue* atau *fatigue life*. Besar konsentrasi tegangan dapat diketahui dengan menghitung konsentrasi suatu tegangan.

2. Ukuran

Bila ukuran suatu spesimen bertambah maka ketahanan *fatigue* menurun. Hal ini dikarenakan, kegagalan akibat *fatigue* biasanya dimulai dari permukaan. Maka penambahan ukuran dilakukan akan memberikan kemungkinan menimbulkan keberadaan cacat. Akibatnya retak berawal pada cacat tersebut.

3. Tegangan sisa

Tegangan sisa tekan akan memberikan peningkatan pada ketahanan fatik. Tegangan sisa ini dapat dikembangkan dengan cara melakukan deformasi plastis yang tidak seragam pada suatu penampang material.

4. Faktor komposisi kimia

Pengaruh komposisi kimia terhadap kekuatan lelah bahan diharapkan agar sama dengan seluruh spesimen uji pada saat pemilihan bahan material yang akan di produksi dalam satu kali proses pembuatan

2.4 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Suatu proses memanaskan kembali kemudian dilanjutkan dengan pendinginan pada baja atau baja paduan sering disebut dengan proses perlakuan panas, dimana proses perlakuan panas tersebut memiliki tujuan agar dapat mengubah kekuatan mekanik dari baja tersebut dan juga merubah mikrostrukturnya sesuai dengan yang diharapkan. Dari proses tersebut juga dapat menghilangkan tegangan serta dapat merubah ukuran butir – butir, ada yang butirnya semakin besar dan ada juga yang butirnya lebih mengecil. Nilai ketangguhan dan keuletan dari baja juga dapat ditingkatkan dengan adanya proses pemanasan. Disamping itu komposisi kimia baja juga harus lebih diketahui agar bisa mendapatkan spesimen yang sesuai dari

harapan, karena perubahan komposisi kimia khususnya karbon dapat mengakibatkan perubahan sifat – sifat fisisnya (Pratowo, 2018).

2.5 Austempering

Austempering merupakan proses perlakuan panas yang diaplikasikan dengan tujuan untuk mendapatkan mikrostruktur yang dikenal sebagai *bainit*. Perlakuan austempering diperlukan guna mendapatkan struktur *bainit* halus yang dimana karbida (Fe_3C) yang ada pada matriks ferit berbentuk partikel – partikel halus jika dibandingkan dengan struktur *lamellar karbida* (Fe_3C) pada *perlite* (Badaruddin, et.al. 2019). Sifat seperti kekerasan, kekuatan, ketahanan benturan, keuletan dan ketahanan aus yang ditingkatkan. Struktur mikro *ausferitik* adalah campuran *ferit bainitik* dan austenit yang tertahan. Austempering merupakan salah satu usaha alternatif antara *quenching* dengan *tempering* guna meningkatkan ketangguhan dan keuletan beberapa baja. Pada *austempering* baja terlebih dahulu dilakukan proses austenisasi, kemudian dilanjutkan dengan proses quenching pada media pendingin seperti rendaman larutan garam pada temperatur sedikit lebih tinggi daripada temperatur baja M_s , kemudian dilanjutkan dengan proses menahan beberapa waktu yang secara isothermal untuk memberi kesempatan berlangsungnya transformasi *austenit* ke *bainit*, lalu didinginkan ke temperatur ruang dalam udara (Pratowo, 2018). Kelebihan proses *austempering* ini adalah tidak diperlukan proses tempering, *austempering* mampu meningkatkan sifat mekanik terutama untuk memperoleh struktur *bainit*, mendapatkan ketangguhan tinggi serta hasil austempering mempunyai kekuatan dan keuletan yang cukup tinggi. Keberhasilan proses *austempering* sangat ditentukan oleh temperatur isothermal pembentukan *bainit* awal (B_s), dimana yang harus memiliki nilai lebih tinggi jika dibandingkan

dengan temperatur awal pembentukan *martensit* (M_s). Berikut merupakan tiga faktor yang bisa menjadi penghambat pada proses austempering baja paduan, yaitu:

1. Terbentuknya *martensit* secara bersama dengan *bainit*, hal ini bisa terjadi karena keakuratan temperatur bainit awal (B_s) yang tidak dapat diprediksi.
2. Temperatur *martensit* (M_s) yang hampir sama dengan temperatur bainit awal (B_s) karena database komposisi kimia baja yang tidak lengkap tersedia.
3. Secara termodinamika dan kinetik transformasi fasa austenit menjadi *ferit* dan *bainit* sangat sulit untuk ditentukan. (Mousalou, et.al, 2018).

Sifat mekanik menyatakan kemampuan suatu bahan (tentunya juga komponen yang terbuat dari bahan tsb) untuk menerima beban/gaya/energi tanpa menimbulkan kerusakan pada bahan/komponen tsb. Seringkali bila suatu bahan mempunyai sifat mekanik yang baik tetapi kurang baik pada sifat yang lain maka diambil langkah untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan berbagai cara. Misalnya saja baja, baja mempunyai sifat mekanik yang cukup baik (memenuhi syarat untuk suatu pemakaian) tetapi mempunyai sifat tahan korosi yang kurang baik, maka seringkali sifat tahan korosinya ini diperbaiki dengan pengecatan atau galvanising dan lainnya, jadi tidak harus mencari bahan lain yang selain kuat juga tahan korosi. Beberapa sifat mekanik yang penting antara lain :

1. Kekuatan (*strength*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan menjadi patah. Kekuatan ini ada beberapa macam, tergantung pada jenis beban yang bekerja, yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan kekuatan torsi dan kekuatan lengkung.
2. Kekerasan (*hardness*) dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan (abrasi), indentasi atau penetrasi.

Sifat ini berkaitan dengan sifat tahan aus (*wear resistance*). Kekerasan juga mempunyai korelasi dengan kekuatan.

3. Kekenyalan (*elasticity*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan. Bila suatu benda mengalami tegangan maka akan terjadi perubahan bentuk. Bila tegangan yang bekerja besarnya tidak melewati suatu batas tertentu maka perubahan bentuk yang terjadi hanya bersifat sementara, perubahan bentuk itu akan hilang bersama dengan hilangnya tegangan, tetapi bila tegangan yang bekerja telah melampaui batas tersebut maka sebagian dari perubahan bentuk itu tetap ada walaupun tegangan telah dihilangkan. Kekenyalan juga menyatakan seberapa banyak perubahan bentuk elastis yang dapat terjadi sebelum perubahan bentuk yang permanen mulai terjadi, dengan kata lain kekenyalan menyatakan kemampuan bahan untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah menerima beban yang menimbulkan deformasi.
4. Kekakuan (*stiffness*) menyatakan kemampuan bahan menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) atau defleksi. Dalam beberapa hal kekakuan ini lebih penting dari pada kekuatan.
5. Plastisitas (*plasticity*) menyatakan kemampuan bahan untuk mengalami sejumlah deformasi plastik (yang permanen) tanpa mengakibatkan fatah. Sifat ini sangat diperlukan bagi bahan yang akan diproses dengan berbagai proses pembenlukan seperti *forging*, *rolling*, *extruding* dan lainnya. Sifat ini sering juga disebut sebagai keuletan. Bahan yang mampu

mengalami deformasi plastik cukup banyak dikatakan sebagai bahan yang mempunyai keuletan tinggi, bahan yang ulet. Sedang bahan yang tidak menunjukkan terjadinya deformasi plastik dikatakan sebagai bahan yang mempunyai keuletan rendah atau getas.

6. Ketangguhan (*toughness*) menyatakan kemampuan bahan untuk menyerap energi tanpa menyebabkan terjadinya kerusakan. Juga dapat dikatakan sebagai ukuran banyaknya energi yang diperlukan untuk mematahkan suatu benda kerja pada suatu kondisi tertentu. Sifat ini dipengaruhi oleh banyak faktor, sehingga sifat ini sulit diukur.
7. Kelelahan (*fatigue*) merupakan kecenderungan pada logam untuk patah bila menerima tegangan berulang-ulang (*cyclic stress*) yang besarnya masih jauh di bawah batas kekuatan elastiknya. Sebagian besar dari kerusakan yang terjadi pada komponen mesin disebabkan oleh kelelahan. Karenanya kelelahan merupakan sifat yang sangat penting, tetapi sifat ini juga sulit diukur karena sangat banyak faktor yang mempengaruhinya.
8. Merangkak (*creep*) merupakan kecendrungan suatu logam untuk mengalami deformasi plastik yang besarnya merupakan fungsi waktu, pada saat bahan tadi menerima beban yang besarnya relatif tetap.

2.6 Mikrostruktur Baja

Mikrostruktur adalah kondisi dari beberapa gabungan fasa - fasa yang terdapat dalam baja serta dapat diamati dan dianalisa melalui teknik metalografi. Berikut adalah beberapa jenis struktur mikro baja :

1. *Ferit*

Ferit adalah paduan dari unsur karbon serta unsur paduan yang terjadi karena akibat dari suatu proses pendinginan dengan secara lambat, ciri dari *ferit* ini memiliki warna yang lebih terang dengan ruang atomnya yang kecil serta rapat mengakibatkan hanya dapat menampung sedikit jumlah atom karbon. Struktur mikro *ferit* ini memiliki karakter lunak serta memiliki kekuatan yang relatif rendah, keuletan tinggi dan tahan korosi menengah. Struktur mikro *ferit* biasanya terdapat pada baja dengan jumlah kandungan karbon rendah. Dimana larutan karbon didalam fasa berkisar 0,0008% dan berbentuk *polygonal* (Sumiyanto dan Abdunnaser, 2015).

2. *Austenit*

Austenit merupakan campuran dari besi dan karbon yang terjadi karena adanya proses pembekuan. Jumlah karbon yang dimiliki maksimum sebesar 2,14%. Lentur merupakan sifat yang identik dengan *austenit* ini, selain itu juga memiliki sifat keuletan yang tinggi dan lunak.

3. *Simentit*

Simentit merupakan campuran besi yang bisa membentuk fasa stabil pada paduan besi dan baja. Namun pada bentuk fasa murni, *simentit* memiliki sifat sangat keras dan getas.

4. *Pearlite*

Pearlite campuran dari dua fasa yaitu *ferit* dan *simentit* yang keduanya tersusun sebagai pelat sejajar dengan kondisi bolak-balik. *Pearlite* memiliki jumlah karbon tetap sebesar 0,83% pada baja karbon dan terbentuk karena reaksi

eutectoid saat austenit proses pendinginan. Kuat dan lebih keras daripada ferit tetapi kurang ulet dan tidak magnetis merupakan ciri dan *pearlite* ini.

5. *Martensit*

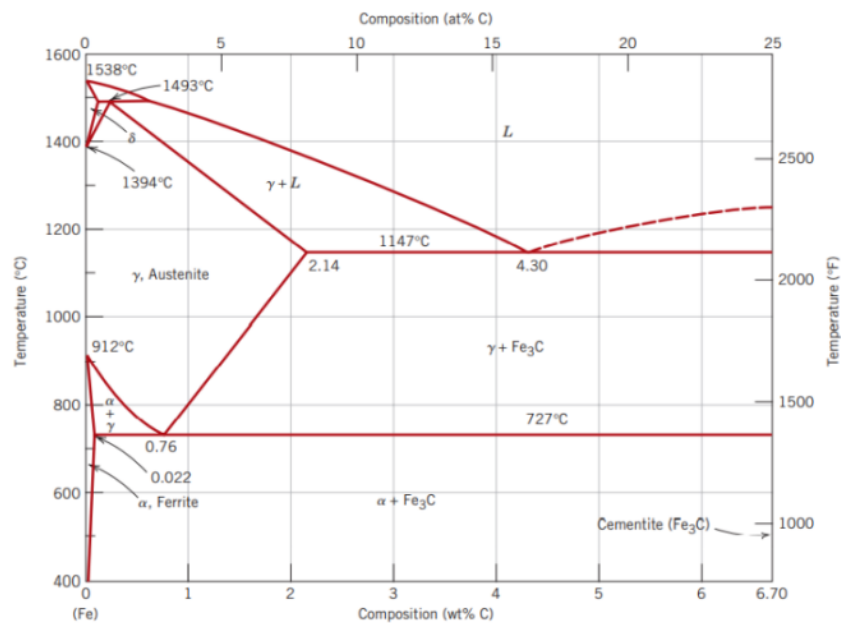
Martensit merupakan transformasi yang terjadi pada austenite karena dilakukan proses pendinginan dengan sangat cepat dan tanpa disertai oleh penyusunan atom karbon yang secara difusi pada kisi - kisi austenite tersebut. Pembentukan martensit terjadi karena proses pergeseran atom dengan nilai jarak atom - atomnya. Akibat dari pergeseran atom ini, mengakibatkan terjadinya perubahan struktur dari *body central cubic* (BCC) menjadi *body center tetragonal* (BCT). Pembentukan martensit dimulai pada garis *martensit stars* (Ms) dan berakhir pada garis *martensit finish* (Mf). Garis Ms dan Mf tidak dipengaruhi oleh laju pendinginan tetapi ditentukan oleh komposisi kimia. Struktur martensit didalam baja merupakan struktur yang memiliki kekerasan paling tinggi.

6. Bainit

Bainit pencampuran dari dua fasa, yaitu antara *ferit* dan *simentit*, kedua fasa ini bisa terbentuk dikarenakan adanya proses pendinginan cepat austenit pada suhu antara 400°C dan 550°C. kemudian dilanjutkan dengan adanya waktu penahanan pada temperatur ini sampai melewati batas kurva transformasi martensit finis untuk terbentuknya formasi bainit. Transformasi bainit bisa terjadi karena adanya pengendapan karbida pada konfigurasi yang lebih halus.

2.7 Diagram Fe-Fe₃C

Sebagai pedoman dasar dalam melakukan perlakuan panas atau *heat treatment* pada besi dan baja maka menggunakan diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C, seperti ditunjukkan pada gambar 2.4, dari gambar tersebut bisa terlihat beberapa fasa yang terjadi pada kondisi tertentu.



Gambar 2.4 Diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C (Callister dan Willian, 2007)

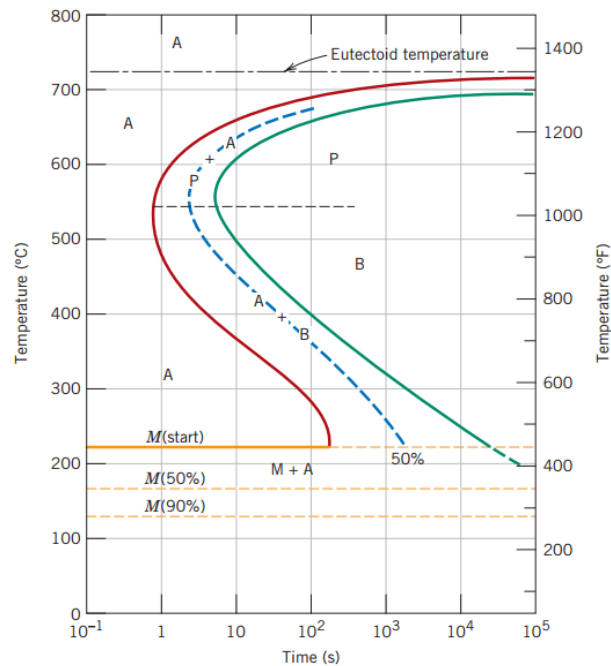
Fasa - fasa tersebut antara lain adalah *ferit*, *cementit* (Fe₃C), *austenit* (g), besi (d) atau campuran fasa - fasa tersebut, dimana letak posisinya tergantung pada kondisi temperatur serta kandungan karbon (Sumiyanto dan Abdunnaser, 2015). Disamping itu diagram fasa Fe-Fe₃C menjadi patokan untuk melakukan proses perlakuan panas terhadap jenis - jenis baja. Sumbu horizontal pada sumbu menunjukkan jumlah kandungan karbon dalam suatu material. sedangkan pada sumbu vertikal menunjukkan temperatur pemanasan dan perubahan struktur mikro yang terjadi (Callister dan Willian, 2007).

2.8 SEM (*Scanning Electron Microscope*)

SEM dilakukan untuk untuk mengamati bentuk patahan pada spesimen uji setelah dilakukan proses pengujian. Cara untuk mendapatkan struktur mikro dengan membaca berkas elektron, didalam SEM berkas elektron berupa noda kecil yang umumnya $1\mu\text{m}$ pada permukaan spesimen. Permukaan spesimen diambil gambarnya, dari gambar tersebut kemudian dianalisa bentuk permukaannya atau kerusakan pada spesimen. Pentingnya SEM adalah memberikan gambaran nyata dari bagian kecil spesimen. Berikut adalah gambar bentuk spesimen yang akan dilakukan pengamatan menggunakan SEM.

2.9 Transformasi *Martensit*

Martensit dalam baja yang dihasilkan di bawah kondisi laju pendinginan yang cukup cepat cenderung menyebabkan sebagian besar atom karbon yang terlarut dalam FCC- γ -Fe tetap larut dalam BCC dalam fase α -Fe. Sederhananya, martensit adalah larutan padat jenuh dengan atom karbon interstisial dalam α -besi. Martensit merupakan fasa *non-ekuilibrium*, sehingga tidak tampak pada diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C, namun transformasi dari fasa austenit menjadi fasa martensit ditunjukkan pada diagram transformasi isothermal pada Gambar 2.6. Dapat dilihat dari Gambar 2.6 bahwa temperatur transformasi *martensit* hanya berubah sebagai fungsi T, bergantung pada komposisi paduan, dan tidak dengan waktu. Konversi semacam itu disebut konversi athermal. Gambar tersebut menunjukkan bahwa M adalah *martensit*.



Gambar 2.5 Diagram transformasi isothermal untuk besi-karbon paduan

Martensit mulai terbentuk ketika baja yang dikeraskan mencapai suhu yang diperlukan untuk transformasi, diwakili oleh garis horizontal pada diagram TTT, yang disebut M_s , dan laju transformasi martensit meningkat ketika suhu menurun menuju ke arah suhu ruangan. Selain itu, transformasi berakhir pada suhu akhir martensit, disebut M_f , disebut juga $M_{90\%}$, karena transformasi martensit praktis tidak 100% di bawah suhu M_f . Perubahan suhu M_s bergantung pada komposisi baja, dan perubahan mikrostruktur *austenit* pada sebagian besar baja komersial bersifat kontinyu karena suhu menurun selama pendinginan kontinyu, menunjukkan dalam buku mereka bahwa paduan Fe-C dengan karbon 1,2-1,4%, kandungan austenit yang tertahan mencapai 30-40%, persentase ini diukur dengan teknik difraksi sinar-X pada suhu kamar. Bahkan dalam paduan yang mengandung karbon sesedikit 0,3-0,4%, beberapa austenit tetap ada. Selain itu, elemen penstabil austenit meningkatkan jumlah austenit yang tertahan pada tingkat dan suhu karbon tertentu.

2.10 Pengujian OM (*Optic Miscroscope*)

Mikroskop optik, juga dikenal sebagai "mikroskop cahaya", adalah jenis mikroskop yang menggunakan cahaya tampak dan sistem lensa untuk memperbesar gambar sampel kecil. Mikroskop optik ditemukan pada abad ke-17. Mikroskop optik dasar sangat sederhana, walaupun ada banyak desain yang lebih rumit yang dirancang untuk meningkatkan resolusi dan kontras sampel. Mikroskop cahaya mudah dibuat dan populer karena menggunakan cahaya tampak untuk mengamati sampel secara langsung dengan mata. Saat ini, gambar dapat ditangkap dengan mikroskop optik menggunakan kamera peka cahaya standar untuk membuat mikrograf dan terhubung langsung ke monitor komputer. Perbesaran mikroskop ini mencapai 1000x.

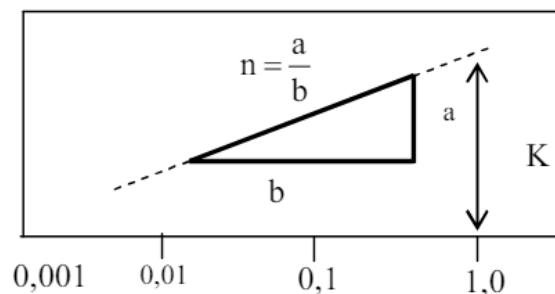
2.11 Baja Pegas Daun JIS SUP9

JIS adalah standar yang digunakan untuk kegiatan industri di Jepang, dikoordinasikan oleh *Japanese Industrial Standards Committee* (JISC) dan diterbitkan oleh *Japanese Standards Association* (JSA), sedangkan SUP9 merupakan grade golongan material berdasarkan kemampuan menahan beban. Baja Pegas daun adalah elemen suspensi penting yang digunakan pada kendaraan penumpang ringan maupun kendaraan berat yang diperlukan untuk meminimalkan getaran vertikal, benturan dan gundukan karena ketidakraturan jalan dan untuk menciptakan pengendaraan yang nyaman. Pegas daun sangat luas digunakan untuk suspensi berbagai jenis mobil dan kereta api. Pegas daun harus menyerap getaran dan benturan vertikal karena ketidakraturan jalan melalui variasi defleksi pegas sehingga energi potensial disimpan pada pegas sebagai regangan energi dan kemudian dilepaskan secara perlahan sehingga meningkatkan kemampuan

penyimpanan energi pegas daun. Salah satu jenis material dasar yang digunakan untuk pegas daun adalah JIS SUP 9. Dalam buku *Material for Spring*, menunjukkan bahwa material JIS SUP 9A mempunyai kekuatan tarik yang tinggi, kekuatan elastis yang baik dan ketahanan terhadap korosi yang lebih baik dari baja karbon lainnya (Yamada, 2007).

2.12 Logaritma Regangan Sejati

Kemampuan logam bertambah keras akibat terjadinya regangan saat pengerjaan dingin merupakan koefisien pengerasan peregangannya (n). Nilai tersebut akan berpengaruh pada proses *stretching* karena proses deformasi yang ditimbulkan. Jika Kurva tegangan-regangan yang sesungguhnya digambarkan secara logaritmik sampai nilai maksimum maka didapatkan bagian kurva yang linier seperti gambar 2.6 berikut :



Gambar 2.6 logaritma regangan sejati

Kemiringan linier garis hasil pemetaan dari harga n dan K merupakan tegangan sejati pada $\epsilon=1$. Jika harga $n=0$ maka spesimen bersifat plastis ideal dan jika $n=1$ berarti spesimen bersifat elastis ideal.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Pengujian

Pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik spesimen dilakukan di Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung. Lalu Pengujian *Optical Microscope* dilakukan di Laboratorium Metalurgi Institut Teknologi Bandung dan Uji SEM dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional Tanjung Bintang Lampung. Pengujian ini berlangsung sejak bulan Oktober 2023 hingga bulan Januari 2024.

3.2 Alat dan Bahan Pengujian

3.2.1 Alat Pengujian

Adapun alat yang dipakai untuk pengujian ini yaitu sebagai berikut :

a. MTS-Landmark 100 kN

Berdasarkan sumber dari buku petunjuk terkait Mesin MTS-Landmark model 370-10 yang digunakan dalam pengujian tarik dan perambatan retak dapat dilihat spesifikasi yang dimiliki mesin tersebut seperti gambar (3.2) Spesifikasi MTS-Landmark. Mesin MTS-Landmark ini digunakan untuk menentukan kekuatan statis untuk uji tarik dan kekuatan dinamis untuk uji perambatan



Gambar 3.1 Mesin MTS *Landmark* 100kN

Load Frame Specifications ₁	Diagram Detail	Units	370.10	
			Actuator integral to Base	Actuator integral to Crosshead
Force capacity (rated dynamic force)		kN (kip)	100 (22)	100 (22)
Available actuator ratings ₁ (nominal)		kN (kip)	15, 25, 50, 100 (3.3, 5.5, 11, 22)	15, 25, 50, 100 (3.3, 5.5, 11, 22)
Actuator dynamic stroke ₁		mm (in)	100, 150 , 250 (4, 6 , 10)	100, 150 , 250 (4, 6 , 10)
Min vertical test space - standard height ₂	A	mm (in)	140 (5.5)	70 (2.8)
Max vertical test space - standard height ₃	A	mm (in)	1283 (50.5)	1213 (47.8)
Min vertical test space - extended height ₂	A	mm (in)	363 (14.3)	292 (11.5)
Max vertical test space - extended height ₃	A	mm (in)	1753 (69.0)	1683 (66.3)
Working height ₄	B	mm (in)	922 _{8, 15} (36.3)	922 ₁₅ (36.3)
Column spacing (test space width)	C	mm (in)	533 (21.0)	533 (21.0)
Column diameter	D	mm (in)	76.2 (3.00)	76.2 (3.00)
Base width	E	mm (in)	1018 (40.1)	1018 (40.1)
Base depth	F	mm (in)	698 (27.5)	698 (27.5)
Diagonal clearance - standard height ₅	G	mm (in)	2580 _{8, 11, 15} (101.6)	2649 _{11, 15} (104.3)
Diagonal clearance - extended height ₅	G	mm (in)	3084 _{8, 11, 15} (121.4)	3153 _{11, 15} (124.1)
Overall height - standard height ₆	H	mm (in)	2588 _{8, 12, 15} (101.9)	3028 _{9, 15} (119.2)
Overall height - extended height ₆	H	mm (in)	3058 _{8, 13, 15} (120.4)	3498 _{9, 15} (137.7)
Stiffness ₇		N/m (lbf/in)	467 x 10 ⁶ (2.66 x 10 ⁶)	467 x 10 ⁶ (2.66 x 10 ⁶)
Weight		kg (lb)	635 (1400)	820 (1800)

Gambar 3.2 Spesifikasi Mesin MTS-*Landmark* Model 370-10
(MTS Landmark System Web, 2023)

b. Tungku Pemanas

Tungku atau dapur pemanas ini digunakan untuk menahan spesimen pada temperatur dan waktu yang sudah ditentukan, sedangkan untuk pengujian ini menggunakan temperatur 250° C pada tahap awal sebelum baja dimasukan larutan garam hingga temperatur 800° C.

c. SEM (*Scanning Elektron Microscope*)

Scanning Elektron Microscope merupakan alat yang digunakan untuk obsevasi bentuk patahan pada permukaan baja setelah dilakukannya uji perambatan retak fatik melalui permukaan patahan spesimen yang diuji.

d. OM (*Optical Microscope*)

Optical Microscope merupakan alat yang digunakan untuk mengamati morfologi bentuk perambatan retak fatik pada permukaan patahan spesimen.

3.2.2 Bahan Pengujian

Bahan pengujian yang digunakan dalam penelitian yaitu Baja JIS-SUP9 berbentuk lempengan baru karena merupakan bahan dalam penggunaan suspensi kendaraan dan larutan garam dalam proses *Austempering*

3.3 Dimensi Baja JIS-SUP9

Bahan pengujian JIS SUP9 didapat komersil dengan spesifikasi dari penjual sebagai berikut :

Tabel 3.1 Dimensi Baja JIS-SUP9 sebelum proses mekanik

Panjang	400 mm
Lebar	70 mm
Tebal	7 mm



Gambar 3.3 Baja JIS-SUP9 sebelum proses mekanik

3.4 Prosesdur Pengujian

Prosedur Pengujian meliputi beberapa proses sejak persiapan spesimen hingga proses pengujian dan pengamatan, diantaranya :

3.4.1 Persiapan Spesimen

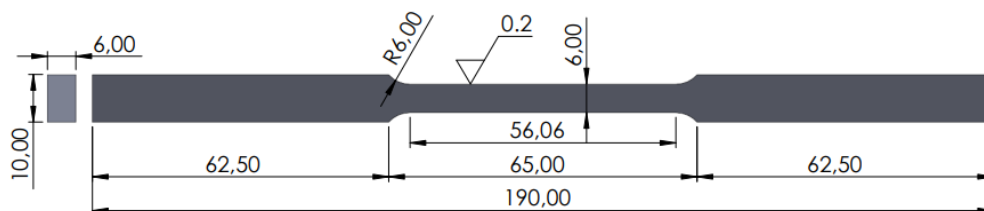
Bahan Pengujian atau material yang digunakan dalam pengujian ini yaitu Baja JIS-SUP9 berbentuk plat yang merupakan bahan baru per daun atau *Leaf Spring*.

3.4.2 Pembuatan Spesimen Uji

Baja Plat JIS SUP9 berbentuk persegi panjang dengan spesifikasi panjang 400 mm, lebar 70 mm dan tebal 7 mm dibentuk menjadi 2 bentuk yaitu spesimen uji tarik dan spesimen uji fatik.

a. Spesimen Uji Tarik

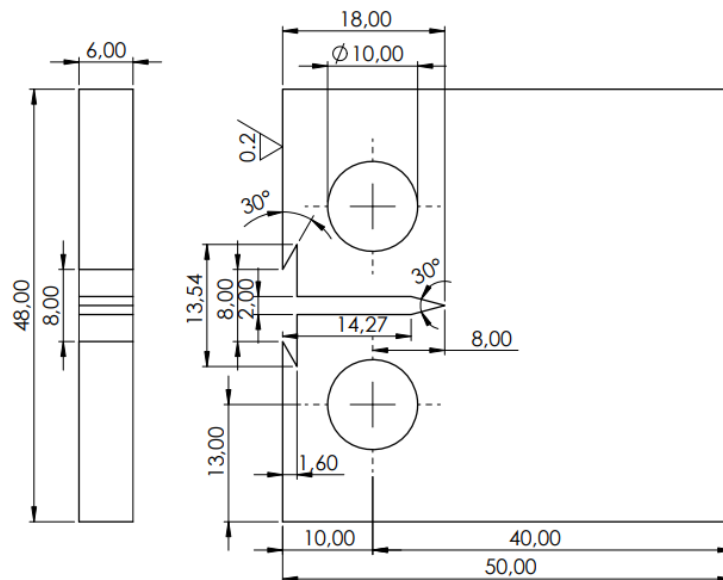
Spesimen Uji Tarik dibentuk pemesinan *Wire Cut* untuk membentuk spesimen dengan ukuran panjang 190mm, lebar 10 mm dan ketebalan 6 mm dilakukan proses sesuai ASTM-E8 seperti gambar berikut :



Gambar 3.4 Spesimen Uji Tarik

b. Spesimen Uji Fatik

Spesimen Uji Fatik dibentuk berdasarkan standar ASTM E647 dengan dimensi ukuran panjang 48 mm, lebar 50 mm dan panjang retak awal 18 mm dengan ketebalan spesimen 6 mm.



Gambar 3.5 Spesimen Uji Fatik

3.4.3 Proses Austempering

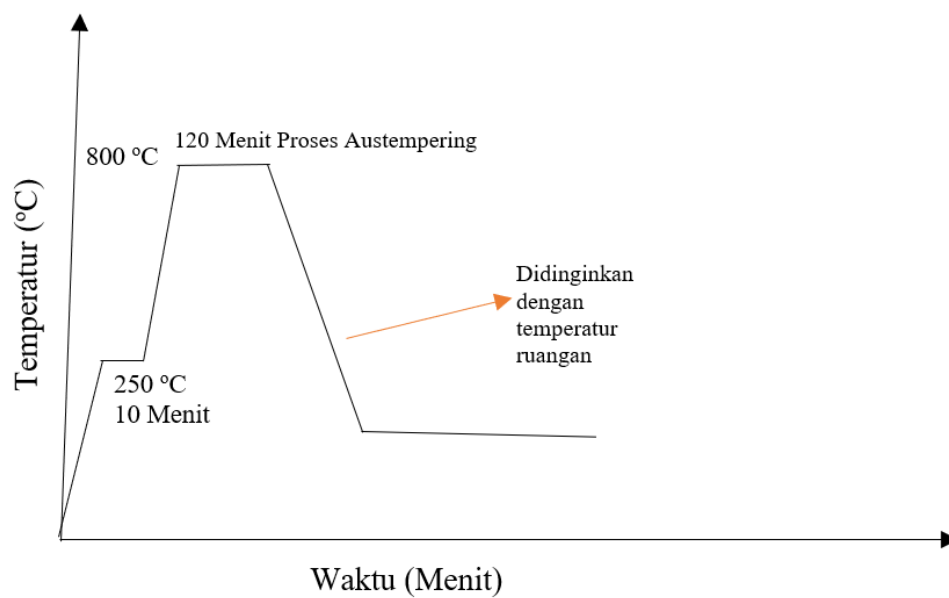
Setelah dilakukan proses permesinan terhadap baja JIS-SUP9 untuk bentuk spesimen uji tarik dan uji fatik maka proses selanjutnya yaitu Proses Austempering yaitu :

- Larutkan Garam pada cawan Tungku Pemanas dengan temperatur 230-250° C atau selama 120 menit.
- Panaskan Spesimen secara induksi hingga temperatur 250° C untuk mencapai titik Austenit sebelum dicelupkan pada larutan garan pada tungku pemanas.



Gambar 3.6 Proses Pemanasan Spesimen sebelum dilakukan
Austempering dengan Larutan Garam

- c. Setelah mencapai temperatur 250°C spesimen dicelupkan kedalam larutan garam dan panaskan selama 120 menit atau hingga dapat dianggap tempertaur telah mencapai 800°C .



Gambar 3.7. Diagram Proses Austempering

- d. Setelah 120 menit dicelupkan ke dalam larutan garam, keluarkan spesimen tersebut lalu dinginkan dengan temperatur ruangan dengan cara digantung dan lakukan proses yang sama terhadap spesimen yang lain.
- e. Setelah Spesimen dingin lalu bersihkan lapisan permukaan spesimen dengan air mengalir lalu keringkan dan simpan ditempat tertutup dan kering sampai proses uji tarik dan uji fatik.

3.4.4 Proses Uji Tarik

Proses Uji Tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan luluh (σ_y) dan tegangan tarik Baja JIS-SUP9 dan berikut langkah yang dilakukan :

- a. Siapkan Spesimen uji tarik dengan standar ASTM E8 yang sudah dilakukan proses Austempering dan siapkan perangkat komputer yang sudah terhubung dengan alat Mesin MTS Landmark 370-10 kN.
- b. Buka program *Controller 793B* setelah itu klik manual *command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Memasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- d. Kemudian cross head diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah.
- e. Klik manual *command* dan klik *control mood* ke *force*.
- f. Lalu klik auto *offset* untuk *force*. Setelah itu *grip* bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- g. Memasang *extensometer* ke spesimen dengan posisi *zero pin*, dan klik manual *offset* untuk *extensometer*. Lalu lepaskan *zero pin* dari *extensometer*.
- h. Buka *Software MTS Test Suite* (MPE), lalu pilih template untuk uji tarik statis.

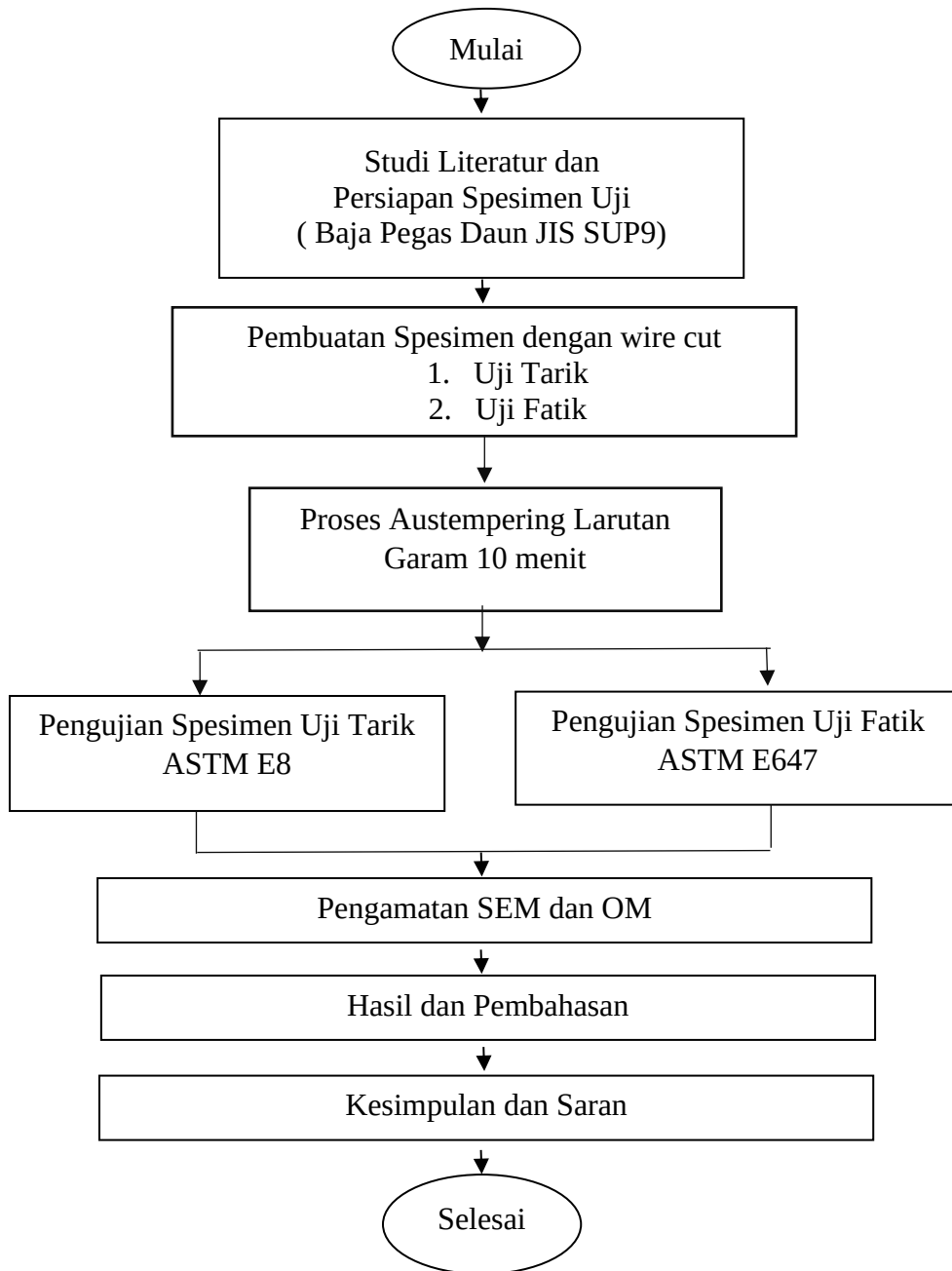
- i. Masukkan data tebal plat, Panjang serta lebar, masukan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s). Setelah data diinput selanjutnya klik *RUN*.

3.4.5 Uji Perambatan Retak Fatik

Berikut Prosedur dalam melakukan Uji Fatik terhadap Baja JIS-SUP9 :

- a. Siapkan Spesimen uji tarik dengan standar ASTM E8 yang sudah dilakukan proses Austempering dan siapkan perangkat komputer yang sudah terhubung dengan alat *Mesin MTS Landmark 370-10 kN*.
- b. Buka program *Controller 793B* setelah itu klik manual *command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Memasang spesimen uji pada *cross head grip* atas. Lalu spesimen uji dicekam.
- d. Selanjutnya *cross head* diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah. Kemudian Klik manual *command* serta *control mood* ke *force*. Lalu klik *auto offset* untuk *force*. Selanjutnya grip bagian bawah dicekam hingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- e. Buka *Software MTS Test Suite* (MPE), lalu pilih template untuk *high cycle fatigue testing*. Masukkan data *Pmaks* dan *Pmin*, siklus total, *incremental cycles* untuk mengatur stop mesin secara otomatis pada setiap jumlah siklus tertentu. dengan tujuan agar retak dapat diamati/diukur dengan menggunakan mikroskop digital portable.
- f. Masukan *initial speed* serta *secondary speed* (mm/s). Setelah data diinput selanjutnya klik *RUN*.

3.5 Diagram Alir



Gambar 3.8 Diagram Alir Penelitian

V. PENUTUP

5.1 SIMPULAN

Berikut adalah beberapa kesimpulan yang bisa diberikan dari penelitian ini, yaitu :

1. Setelah melakukan pengujian terhadap Baja JIS SUP9 didapatkan bahwa spesimen yang diberi perlakuan panas *Austempering* dapat menaikkan tegangan luluh hingga 8,8% sebesar 652,29 MPa melebihi tegangan luluh yang didapatkan pada raw material sebesar 599,58 MPa. Sedangkan tegangan ultimate mengalami peningkatan sebesar 10,46% dari 984,13 MPa menjadi 1087,16 MPa. Namun *Elongasi* total pada spesimen yang diberi perlakuan panas hanya 1,63% dari sebelumnya mencapai 17,6%, hal ini menunjukkan bahwa dengan proses *austempering* pada temperatur 250°C dapat menurunkan nilai keuletan baja JIS SUP9.
2. Persamaan empiris untuk memprediksi kekuatan fatik baja JIS SUP9 dilakukan dengan pendekatan Paris, dimana nilai da/dN atau pertumbuhan retak yang terjadi pada spesimen sumbu X-Y sebesar $223,69 \times 10^{-9} \text{ MPa.m}^{1/2}$, sedangkan nilai da/dN pada sumbu Y-X atau tegak lurus terhadap arah pengerolan didapatkan nilai sebesar $78,35 \times 10^{-9} \text{ MPa.m}^{1/2}$.
3. Pengamatan struktur mikro menunjukkan spesimen yang sudah diberi perlakuan panas memiliki fasa bainit dan ferit, dimana ferit penampakan permukaan lebih halus cerah dan bainit terlihat berwarna gelap, hal tersebut dapat menaikkan sifat

mekanik baja termasuk kemampuan menahan beban fatik. Sedangkan melalui Scanning Elektron Microscope pada permukaan spesimen dapat dilihat awal retak dimulai sisi pinggir spesimen dan terjadi konsentrasi tegangan tinggi karena pembebanan siklik serta terdapat cleavage fracture menandakan bahwa terjadi retakan rekahan getas.

5.2 SARAN

Penelitian dengan judul Analisis Perambatan Retak Baja JIS SUP9 diberikan perlakuan panas Austempering dalam pengerjaannya menggunakan standar ASTM E8 sebagai standar spesimen uji tarik dan ASTM E647 untuk spesimen pengujian fatik mengalami beberapa kendala yang didapat, seperti diperlukannya waktu cukup lama dalam mencari bahan material JIS SUP9 yang digunakan sebagai tambahan untuk pengujian bahan tersebut merupakan bahan per leaf spring bukan sisa ataupun bekas pakai kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Ashby, F. Michael. 2013. Material and Environment. Butterworth-Heinemann : English.
- Badaruddin M, Sugiyanto, Wardono, H, Andoko, Wang, C,J, Rivai A, K. 2019. *Improvement Of Low-Cycle Fatigue Resistance In AISI 4140 Steel By Annealing Treatment. International Journal Of Fatigue*. Vol. 125, 406-407.
- Badaruddin, M, Sugiyanto, Sumardi, S, Asmi, D. 2019. Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment, *International Journal of Fatigue*, 125 406-417.
- Badaruddin, M, Sugiyanto, Sumardi, S, Asmi, D. 2024. "Improvement of the fatigue crack growth resistance in AISI 4140 steel under single- and multi-austempering heat treatments," *Results in Engineering*, vol. 21, p. 101814.
- Callister Jr, Wlliam D. Jr. 2007. *Material Science And Engineering An Introduction-7th Edition*. John Wiley And Sons : New Jersey.
- Cha, Haibo, Ye, Duiyi, Xu, Yuangdong, Xiao, Lei. 2010. *Effects of low-cycle fatigue on static mechanical properties, microstructures and fracture behavior of 304 stainless steel*. Zhejiang University : hangzhou.
- Indratmoko, Andreas Luki. 2023. Pengaruh Perlakuan Panas Single dan Doubel Quenching-Tempering terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja JIS SUP9A. Lampung : Universitas Lampung.
- Karr, Ulrike, Sandaiji, Yusuke, Tanegashima, Ryota, Murakami Shago, Schonbauer, Bernd, Fitzka, Michael, Mayer, Herwig. 2020. Inclusion initiated fracture in spring steel under axial and torsion very high cycle fatigue loading at different load ratios. Kobe Steel Ltd. : Hyogo, Jepang.
- Korda, A, A, Mutoh, Y, Miyashita, Y, Sadasue, T. 2006. In situ observation of fatigue crack retardation in banded ferrite–pearlite microstructure due to crack branching, *Scripta Materialia*, 54-1835-1840.

- Krolicka, A, Lesiuk, G, Kuziak, R, Radwanski, K, Janik, Aleksandara. 2021 , "Comparison of fatigue crack growth rate: Pearlitic rail versus bainitic rail," International Journal of Fatigue, vol. 149, p. 106280.
- Mizhar, S., & Suherman, S. 2011. Pengaruh Perbedaan Kondisi Tempering Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Dari Baja AISI 4140. Jurnal Dinamis, *Volume II*, No. 8 Hal. 23 ISSN 0216-7492.
- Mousalou, H, Yazdani, S, Avishan, B, Ahmadi, Naghi, Parvini, Chabok, Ali, Pai, Yutao. 2018. Microstructural and Mechanical Properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-temper austempering process, Materials Science and Engineering. Vol. 734, 329-337.
- Pratowo, Bambang. 2018. Analisa Keuletan Baja Karbon Rendah Setelah Dilakukan Perlakuan Panas *Austempering*. Universitas Bandar Lampung. Lampung.
- Razak.A.H, & Tangkemanda.A. 2017. *Quenching* Bertingkat Pada Proses Hardening Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140. Politeknik Negeri Ujung Pandang : Makassar.
- Salindeho. R.D, Soukotta, Jan, Peong, Rudy. 2013. Pemodelan Pengujian Tarik Untuk Menganalisis Sifat Mekanik Material. Universitas Sam Ratulangi. Manado. Universitas Sam Ratulangi : Manado.
- Sumiyanto & Abdunnaser. 2015. Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon Astm A-36. Bina Teknika, Volume II Nomer 2, 155-170.
- W. Huang, H. Zhong, L. & Lei, G. Fang. 2022. Microstructure and mechanical properties of multi-pass forged and annealed 42CrMo steel, Materials Science and Engineering: A, 831 (2022) 142191.
- Yamada, Yuya, Suzuki, NN, Hanada, T, Ichimura, Yoshinobu, Kumeta, H, Fujioka, Yako, Ohsumi, Yoshinori, Inagaki, Fuyuhiko. 2007. The crystal structure of Atg3, an autophagy-related ubiquitin carrier protein (E2) enzyme that mediates Atg8 lipidation. *J Biol Chem* 282(11):8036-43.
- Zhao, Leijie, Qian, Lihe, Meng Jiangying, Zhou, Qian. 2022 , "Below-Ms austempering to obtain refined bainitic structure and enhanced mechanical properties in low-C high-Si/Al steels," Scripta Materialia, vol. 112, pp. 96-100.