

**PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP
KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK
FATIK**

Skripsi

Oleh:
YOPI NADAMA
(2015021049)



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

**PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP
KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK
FATIK**

Oleh:
Yopi Nadama

Skripsi

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

Pada
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK FATIK

Oleh
Yopi Nadama

Baja SUP9 merupakan baja pegas paduan yang banyak digunakan pada industri otomotif, khususnya pada komponen yang bekerja di bawah beban siklik seperti pegas daun dan pegas koil. Peningkatan performa mekanik material ini dapat dilakukan melalui proses penggeraan dingin, namun pengaruhnya terhadap ketahanan perambatan retak fatik masih perlu dikaji secara mendalam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggeraan dingin terhadap kekuatan mekanik dan ketahanan perambatan retak fatik pada baja SUP9. Metode penelitian meliputi pengujian kekerasan, uji tarik, serta pengujian perambatan retak fatik menggunakan spesimen standar. Selain itu, dilakukan analisis mikrostruktur dan fraktografi menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengamati mekanisme perambatan retak yang terjadi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggeraan dingin pada baja SUP9 meningkatkan nilai kekuatan tarik dan kekerasan material akibat terjadinya pengerasan regangan. Namun, peningkatan kekuatan tersebut disertai dengan perubahan perilaku fatik yang ditunjukkan oleh laju perambatan retak yang berbeda pada setiap kondisi spesimen. Analisis mikrostruktur menunjukkan adanya perubahan distribusi fasa serta deformasi plastis di sekitar ujung retak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggeraan dingin berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan ketahanan perambatan retak fatik baja SUP9, sehingga perlu pengendalian tingkat deformasi yang tepat untuk aplikasi industry.

Kata Kunci : Baja SUP9, Penggeraan Dingin, Uji Tarik, Rambat Retak Fatik.

ABSTRACT

THE EFFECT OF COLD WORKING OF SUP9 STEEL ON MECHANICAL STRENGTH AND FATIGUE CRACK PROPAGATION RESISTANCE

By

Yopi Nadama

SUP9 steel is an alloy spring steel widely used in the automotive industry, especially in components that work under cyclic loads such as leaf springs and coil springs. The mechanical performance of this material can be improved through cold working, but its effect on fatigue crack propagation resistance still needs to be studied in depth. This study aims to analyze the effect of cold working on the mechanical strength and fatigue crack propagation resistance of SUP9 steel. The research methods include hardness testing, tensile testing, and fatigue crack propagation testing using standard specimens. In addition, microstructure and fractography analysis were performed using a Scanning Electron Microscope (SEM) to observe the crack propagation mechanism that occurred. The results showed that cold working on SUP9 steel increased the tensile strength and hardness of the material due to strain hardening. However, this increase in strength was accompanied by changes in fatigue behavior, as indicated by different crack propagation rates in each specimen condition. Microstructural analysis showed changes in phase distribution and plastic deformation around the crack tip. Thus, it can be concluded that cold working has a significant effect on the mechanical properties and fatigue crack propagation resistance of SUP9 steel, so that proper deformation control is necessary for industrial applications.

Keywords: SUP9 Steel, Cold working, Tensile test, ***Fatigue Crack Propagation.***

Judul Skripsi

: PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA
SUP9 TERHADAP KEKUATAN MEKANIK
DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK
FATIK

Nama Mahasiswa

: Yopi Nadama

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2015021049

Program Studi

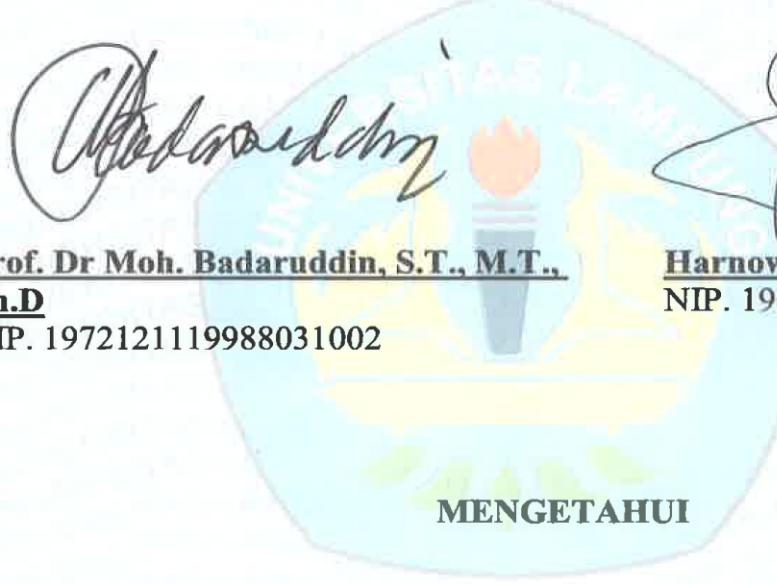
: Teknik Mesin

Fakultas

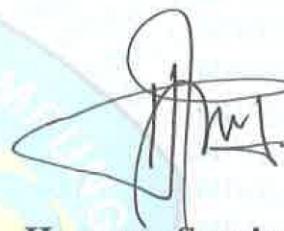
: Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



Koimisi Pembimbing 2



Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T.,M.T.
NIP. 197408162000121001

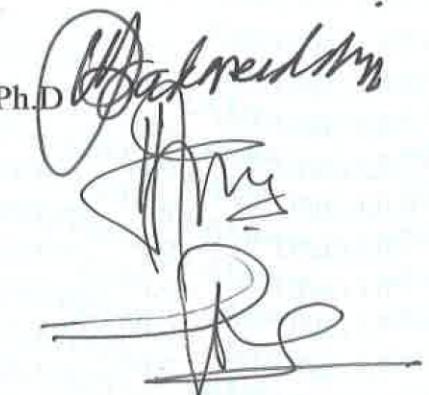
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Tim

: Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D



Anggota Penguji

: Harnowo Supriadi, S.T., M.T.

Penguji Utama

: Zulhanif, S.T., M.T.

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **6 Januari 2026**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi dengan judul “PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK FATIK“ dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat siapapun sebagaimana diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 23 Januari 2026

Yang Membuat Pernyataan



Yopi Nadama
NPM. 2015021049

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lampung Selatan pada tanggal 7 september 2002 sebagai anak pertama dari pasangan Bapak Rajman dan Ibu Desi Narpiyana. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 2 SUKARAJA hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan SMP PEMBANGUNAN KALIANDA yang diselesaikan pada tahun 2017 dan SMK NEGERI 2 KALIANDA yang diselesaikan pada tahun 2020. Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam Mahasiswa Pecinta Alam Universitas Lampung (MAPALA UNILA) sebagai Koordinator Lingkungan Hidup periode 2021 dan Ketua Umum pada tahun 2022. Selain aktif dalam MAPALA UNILA, penulis pernah menjadi panitia dalam kegiatankegiatan pada Jurusan Teknik Mesin.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di PT. PERKEBUNAN NUSANTARA 7 UNIT BEKRI pada Januari 2024 dengan judul laporan **“ANALISIS ENERGI TERMAL STERILIZER PADA PROSES PERKEBUNAN KELAPA SAWIT DI PT. PERKEBUNAN NUSANTARA 7 UNIT BEKRI”**.

Tahun 2025 penulis melakukan penelitian Tugas Akhir di Jurusan Teknik Mesin dengan judul penelitian **“PENGARUH PENERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP KEKUATAN MEKANIK DAN PERAMBATAN RETAK FATIK”**

MOTTO

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

~Q.S Al Baqarah: 286~

"Bersemangatlah atas hal-hal yang bermanfaat bagimu. Minta tolonglah pada Allah, jangan engkau lemah."

~HR. Muslim~

"Nikmati sejuta rasa ramah alam, cinta saudaraku, semua jadi satu MAPALA UNILA"

~M 066 UL~

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, tugas akhir ini dipersembahkan
kepada :

Kedua Orang Tua Saya

Terimakasih papa dan mama untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan
untuk kesuksesan putranya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat
Universitas sebagai Sarjana Teknik Mesin

Adik

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan hingga saya dapat
menyelesaikan pendidikan saya di tingkat Sarjana

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kупанжатkan atas kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunia-nya dan kesehatan yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK FATIK”. Tujuan dari penulis skripsi ini yaitu sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar S1 dan untuk melatih mahasiswa dalam berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih ada banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu penulis meminta kritik dan saran yang dapat membangun dalam pembuatan skripsi ini.

Penulis

Yopi Nadama

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan baik. Sholawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasullah Muhammad SAW, para sahabat, keluarga, serta pengikutnya yang tetap istiqomah hingga akhir zaman. Penulis skripsi yang berjudul “PENGARUH PENGERJAAN DINGIN BAJA SUP9 TERHADAP KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN PERAMBATAN RETAK FATIK” merupakan syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin 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 kerena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada :

1. Prof. Dr Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen pembimbing I yang telah membimbing dan selalu mendampingi penulis dengan sabar dalam proses penyusunan skripsi hingga terselesaikan secara terstruktur.
2. Harnowo Supriadi, S.T., M.T. selaku Dosen pembimbing II yang telah bersedia membimbing dan memerikan serta saran masukan dengan tenang kepada penulis selama proses penggerjaan skripsi ini.
3. Zulhanif, S.T., M.T selaku dosen penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan tanpa pernah menyalahkan penulis dalam menyusun skripsi ini.
4. Ahmad Su'udi, S.T., M.T selaku ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.T., M.Sc selaku ketua prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Seluruh Dosen di Teknik Mesin universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.

7. Orang tua saya Bapak Rajiman dan cinta pertama saya Ibu Desi Narpiyana. terima kasih atas pengorbanan dan tulus kasih yang diberikan kepada penulis, tak kenal lelah mendoakan serta memberikan perhatian dan dukungan hingga penulis mampu untuk menyelesaikan perkuliahan hingga meraih gelar sarjana. Terimakasih selalu berjuang untuk kehidupan penulis.
8. Adiku Erson Airlangga tercinta terimakasih telah menjadi bagian dari perjalanan panjang ini, terimakasih karna selalu mensupport dan meyakini bahwa penulis dapat menyelesaikan laporan ini.
9. Pasangan yang akan menjadi pasangan hidup Elizabeth Tiesta Subiyakto, terimakasih selalu mendukung dan memberikan yang terbaik untuk penulis, selalu menemani penulis dalam suka maupun duka selama proses pembuatan skripsi ini.
10. Rekan Laboratorium Material Teknik Mesin yang sudah bersedia menjadi teman serta membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Keluarga besar MAPALA UNILA yang telah memberikan pelajaran berarti dalam menjalani hidup.
12. Angkatan 30 (TANGGUH) MAPALA UNILA yang selalu memberikan rasa cinta.
13. Teman-teman seperjuangan Kantin Emak yang telah menemani saat suka maupun duka.
14. Seluruh Staff dan karyawan dijurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
15. Seluruh saudara-saudara yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
16. Teman angkatan 2020 Teknik Mesin yang telah memberikan informasi - informasi terkait penyelesaian skripsi ini.

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 pemyempurnaan skripsi ini. Besar harapan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca, Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
MENYETUJUI.....	iii
MENGESAHKAN	iv
PERNYATAAN PENULIS	v
RIWAYAT HIDUP	vi
KATA PENGANTAR.....	ixx
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja	5
2.2 Baja SUP9	6
2.3 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	8
2.4 Temperatur Austenisasi	11
2.5 Pengerajan Dingin	13
2.6 Uji Kekerasan	15
2.6.1 <i>Rockwell</i>	16
2.6.2 <i>Brinell</i>	16
2.6.3 <i>Vickers</i>	17
2.7 Uji Tarik	18
2.8 <i>Fatigue</i>	20
2.9 Perambatan Retak Fatik.....	21
2.10 Perhitungan Laju Perambatan Retak Fatik.....	22
2.11 Laju Pengerasan Regangan (<i>Strain Hardening</i>).....	24
2.12 <i>Stress Intensity Factor (SIF)</i>	26
2.13 Struktur Mikro Baja.....	28
III. METODE PENELITIAN	31

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	31
3.2	Alat yang digunakan.....	31
3.3	Bahan yang digunakan.....	34
3.4	Prosedur Penelitian.....	35
3.5	Pengambilan Data.....	39
3.6	Diagram Alur Penelitian.....	41
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1	Uji kekerasan.....	42
4.2	Data Hasil Uji Tarik	43
4.3	Data Hasil Pengujian Rambat Retak Fatik.....	47
4.4	Analisis Fraktografi <i>Scanning electron Microscope</i> (SEM)	50
4.5	Pengamatan Mikrostruktur Sepanjang Retak Fatik	55
VI.	SIMPULAN DAN SARAN	61
5.1	Simpulan	61
5.2	Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63	
LAMPIRAN.....	65	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ (Isworo, 2020).....	9
Gambar 2. 2 Rentang Temperatur Austenisasi (Isworo, 2020)	11
Gambar 2. 3 Diagram Continuous Cooling Transformation (Isworo, 2020)	12
Gambar 2. 4 <i>Cold Rolling</i> (Aeroengineering.co.id).....	13
Gambar 2. 5 <i>Cold Drawing</i> (Aeroengineering.co.id)	14
Gambar 2. 6 <i>Cold Forging</i> (Aeroengineering.co.id).....	14
Gambar 2. 7 <i>Cold Extrusion</i> (Aeroengineering.co.id)	15
Gambar 2. 8 Proses pengujian kekerasan <i>Rockwell</i> (Kurniawan 2024).....	16
Gambar 2. 9 Metode pengujian kekerasan <i>Brinell</i> (Sinaga, Boangmanalu et al. 2024)	17
Gambar 2. 10 Metode pengujian kekerasan <i>Vickers</i> (www.zwickroell.com)	18
Gambar 2. 11 Kurva Tegangan Regangan (Salindeho et al, 2013)	19
Gambar 2. 12 Laju perambatan retak (Liu & Dirk, 2018)	22
Gambar 2. 13 Kurva <i>Strain Hardening Rate vs True Strain</i> (Xiong et al., 2014)	26
Gambar 3. 1 MTS <i>Landmark</i> 100kN	31
Gambar 3. 2 <i>Clip On Displacement Gages</i>	32
Gambar 3. 3 Clevis	32
Gambar 3. 4 Jangka Sorong.....	33
Gambar 3. 5 <i>Axial Extensometer</i>	33
Gambar 3. 6 <i>Furnace</i>	34
Gambar 3. 7 Baja SUP9.....	34
Gambar 3. 8 Dimensi Spesimen Uji Tarik (ASTM E8, 2000)	35
Gambar 3. 9 Dimensi Spesimen Uji Tarik (ASTM E647, 2004)	35
Gambar 3. 10 Skema Proses Penggeraan Dingin	36
Gambar 3. 11 Prosedur Penelitian	41
Gambar 4. 1 Nilai kekerasan baja SUP9	42
Gambar 4. 2 Kurva Tegangan Versus Regangan BAJA SUP9	44
Gambar 4. 3 Kurva hubungan <i>engineering strain versus strain hardening Rate</i> Baja SUP9	46
Gambar 4. 4 Kurva hubungan siklus dan Panjang retak Baja SUP9	48
Gambar 4. 5 Kurva hubungan faktor intensitas tegangan terhadap Laju Baja SUP9	49
Gambar 4. 6 Hasil analisis <i>Scanning Electron Microscopy</i> (A) CPD 2.500X 0.5 mm, (B) CPD 5.000X 0.5 mm, (C) CPD 2.500X 2.5 mm, (D) CPD 5.000X 2.5 mm, (E) CPD 2.500X 8 mm, dan (F) CPD 5.000X 8 mm	51
Gambar 4. 7 Hasil EDS Baja SUP9.....	52
Gambar 4. 8 Hasil SEM Baja SUP9 area bawah.....	54
Gambar 4. 9 Hasil EDS Baja SUP9 area bawah.....	54
Gambar 4. 10 Mikrostruktur baja SUP9 dengan pembesaran (a) 200x, dan (b) 500x	56
Gambar 4. 11 Struktur Mikro Sepanjang Retakan	58

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data Hasil Uji tarik.....	39
Tabel 3. 2 Data Hasil Perambatan Retak Fatik.....	40
Tabel 4. 1 Hasil uji tarik	45

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Baja merupakan salah satu material paling penting dalam sejarah perkembangan teknologi dan industri manusia. Sejak ditemukannya proses pembuatan baja pada era Revolusi Industri, material ini telah menjadi tulang punggung berbagai aplikasi teknik, mulai dari konstruksi bangunan, pembuatan mesin, hingga komponen kendaraan. Baja adalah paduan besi dan karbon, sering kali diperkaya dengan elemen lain seperti mangan, kromium, atau silikon, untuk mencapai sifat mekanik tertentu seperti kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap korosi. Kemampuan baja untuk diolah melalui berbagai proses metalurgi, seperti pengerasan panas, penggeraan panas, dan penggeraan dingin, menjadikannya material yang sangat fleksibel dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik.

Dalam dunia teknik material, baja diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan komposisi dan kegunaannya. Di antara berbagai jenis baja pegas, baja SUP9 menempati posisi penting karena sifat mekaniknya yang unggul dan penggunaannya yang luas dalam industri otomotif. Baja SUP9 yang dikembangkan sesuai standar JIS G4801, mengandung 0,52-0,60% karbon (C), 0,15-0,35% silikon (Si), 0,65-0,95% mangan (Mn), dan 0,65-0,95% kromium (Cr), memberikan kekuatan tarik hingga 1400 MPa setelah perlakuan panas.

Meskipun penggeraan dingin dikenal dapat meningkatkan kekuatan tarik, dampaknya terhadap ketahanan perambatan retak fatik masih menjadi topik

yang kompleks dan belum sepenuhnya dipahami. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggerjaan dingin dapat memperpanjang umur inisiasi retak dengan meningkatkan batas luluh material, tetapi juga dapat mempercepat laju perambatan retak akibat penurunan keuletan atau munculnya tegangan sisa tarik. Dalam kasus baja SUP9, yang sering digunakan dalam aplikasi kritis seperti pegas kendaraan, pemahaman mendalam tentang efek penggerjaan dingin terhadap ketahanan fatik sangat diperlukan untuk memastikan keandalan dan umur pakai komponen (Hoyos & Botero, 2021).

Studi oleh Purga (2024) pada baja pegas JIS SUP9 yang diberi perlakuan panas *Austempering* mendapatkan nilai *modulus* elastisitas 205,47 GPa. Untuk perambatan retak fatik pada siklus 57000N dengan panjang retak 20,8 mm dan pada struktur mikro menunjukkan fasa perlit, bainit dan ferlit. Sifat getas ketika spesimen tersebut telah diberikan perlakuan panas austempering dengan larutan garam. Beberapa titik spesimen terjadi *cleavage fracture* menyebabkan perlunya tegangan yang cukup tinggi untuk merambatkan retak.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh penggerjaan dingin pada baja SUP9, dengan fokus pada ketahanan terhadap perambatan retak fatik. Dengan menganalisis hubungan antara tingkat deformasi dingin, perubahan struktur mikro, dan perilaku fatik, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami sifat material baja SUP9 secara lebih mendalam. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi panduan praktis bagi industri otomotif untuk mengoptimalkan proses manufaktur, meningkatkan daya tahan komponen, dan mengurangi risiko kegagalan fatik di lapangan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya relevan secara akademik, tetapi juga memiliki implikasi langsung dalam mendukung efisiensi dan keamanan teknologi transportasi modern.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai hasil uji tarik pada baja SUP9 yang telah dilakukan pengerajan dingin.
2. Menganalisis perambatan retak fatik pada paduan baja SUP9.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini yaitu kondisi spesimen adalah *raw material*

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini sebagai berikut :

PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang spesifikasi baja SUP9, kegunaan baja SUP9, tujuan penelitian, Batasan masalah, dan sistematika penulisan.

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang landasan teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu tempat dan waktu penelitian, bahan yang digunakan, peralatan yang digunakan, dan prosedur alur penelitian serta proses pengambilan data.

DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang data pengamatan yang didapat, dan pembahasan dari proses pengujian.

PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan yang diperoleh setelah penelitian, dan saran yang dapat diberikan oleh penulis.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka berisikan sumber dari literatur yang dimasukan dalam laporan ini.

LAMPIRAN

Lampiran berisikan foto-foto yang mendukung laporan ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja adalah paduan logam yang terdiri dari besi (Fe) sebagai elemen utama dan karbon (C) sebagai elemen paduan utama, dengan kandungan karbon yang bervariasi antara 0,02% hingga 2,1% berdasarkan berat, tergantung pada jenis dan tujuan penggunaannya. Keberadaan karbon dalam baja memungkinkan modifikasi sifat mekanik melalui berbagai proses metalurgi, seperti pengerasan panas (*heat treatment*), penggeraan panas (*hot working*), dan penggeraan dingin (*cold working*), menjadikannya salah satu material paling serbaguna dalam aplikasi teknik. Selain karbon, baja sering diperkaya dengan elemen paduan seperti mangan (Mn), silikon (Si), kromium (Cr), nikel (Ni), atau molibdenum (Mo) untuk meningkatkan sifat spesifik, seperti kekuatan, ketahanan terhadap korosi, atau ketangguhan pada suhu rendah.

Baja dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan komposisi kimia dan tujuan penggunaannya. Baja karbon, yang hanya mengandung karbon sebagai elemen paduan utama, dibagi menjadi tiga jenis: baja karbon rendah (<0,3% C) yang lunak dan mudah dibentuk, baja karbon sedang (0,3-0,6% C) yang menawarkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan, serta baja karbon tinggi (>0,6% C) yang keras dan tahan aus tetapi kurang ulet. Baja paduan rendah mengandung elemen paduan dalam jumlah kecil (biasanya <5%), seperti mangan atau silikon, untuk meningkatkan kekuatan tanpa mengorbankan kemudahan pengolahan. Baja paduan tinggi, seperti baja tahan karat, mengandung elemen seperti kromium (>10%) untuk ketahanan terhadap korosi, sedangkan baja perkakas mengandung tungsten atau molibdenum untuk kekerasan ekstrem pada suhu tinggi. Dalam konteks penelitian ini, fokus diberikan pada baja paduan rendah, khususnya baja

pegas, yang dirancang untuk menahan beban siklik dan deformasi elastis berulang (Callister & Rethwisch, 2018).

Proses metallurgi memainkan peran kunci dalam menentukan performa baja. Pengerasan panas, seperti *quenching* dan *tempering*, digunakan untuk mengubah struktur mikro dan meningkatkan kekuatan serta ketangguhan, terutama pada baja pegas atau baja perkakas. Pengeraaan panas (*hot working*), yang dilakukan di atas suhu rekristalisasi (biasanya $>900^{\circ}\text{C}$ untuk baja), memungkinkan pembentukan material tanpa pengerasan regang karena butir kristal langsung mengalami pemulihan dan rekristalisasi. Sebaliknya, pengeraaan dingin (*cold working*), yang dilakukan pada suhu kamar, meningkatkan kekuatan melalui pengerasan regang dengan mengubah struktur mikro tanpa pemanasan, sebuah proses yang akan dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya. Kombinasi proses ini memungkinkan baja disesuaikan untuk aplikasi spesifik, dari struktur bangunan yang memerlukan ketangguhan hingga komponen otomotif yang menuntut elastisitas dan ketahanan fatik. Aplikasi baja sangat luas dan beragam, mencerminkan fleksibilitasnya sebagai material teknik. Dalam konstruksi, baja karbon rendah digunakan untuk balok dan kolom karena kemudahan pengelasan dan biaya rendah. Dalam **industri** mesin, baja paduan tinggi seperti baja perkakas digunakan untuk mata bor atau cetakan karena kekerasan dan ketahanan ausnya. Dalam otomotif, baja pegas termasuk baja SUP9 menjadi pilihan untuk komponen seperti pegas daun, pegas koil, dan poros (Stephens *et al.*, 2001).

2.2 Baja SUP9

Baja SUP9 adalah jenis baja pegas paduan tinggi yang dikembangkan sesuai dengan standar JIS G4801 oleh Japanese Industrial Standards Committee, dirancang khusus untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan tinggi, elastisitas yang baik, dan ketahanan terhadap beban siklik berulang (JIS G4801, 2011). Material ini termasuk dalam kelompok baja pegas, yang

dikenal karena kemampuannya untuk menahan deformasi elastis tanpa mengalami kerusakan permanen yang signifikan, menjadikannya pilihan utama dalam industri otomotif untuk komponen seperti pegas daun (*leaf spring*), pegas koil (*coil spring*), dan batang torsi (*torsion bar*) pada kendaraan berat seperti truk dan bus. Baja SUP9 menonjol karena sifat mekaniknya yang seimbang, yang dicapai melalui komposisi kimia yang dioptimalkan dan perlakuan panas yang tepat, serta potensinya untuk dimodifikasi lebih lanjut melalui proses seperti penggerjaan dingin.

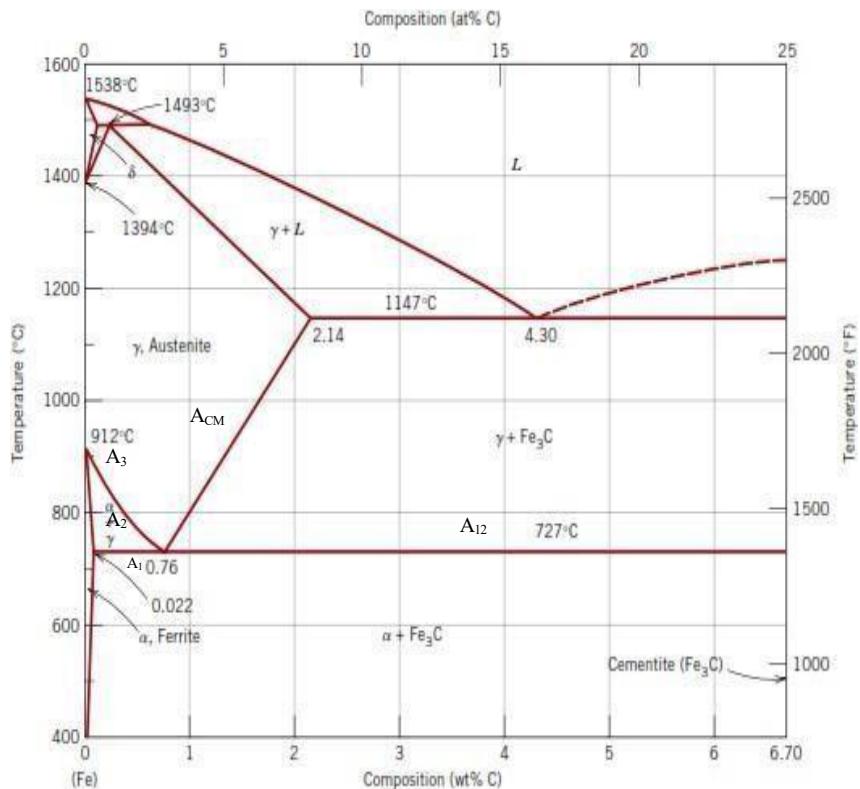
Komposisi kimia baja SUP9 terdiri dari 0,52-0,60% karbon (C), 0,15-0,35% silikon (Si), 0,65-0,95% mangan (Mn), dan 0,65-0,95% kromium (Cr), dengan batasan ketat pada unsur pengotor seperti fosfor ($P < 0,035\%$) dan sulfur ($S < 0,035\%$) untuk mengurangi inklusi non-logam yang dapat menjadi titik lemah dalam struktur material. Kandungan karbon dalam rentang sedang ini memberikan kekerasan dan kekuatan optimal melalui pembentukan fasa martensit selama perlakuan panas, sementara silikon meningkatkan *modulus* elastisitas dan ketahanan terhadap relaksasi tegangan—sifat esensial untuk fungsi pegas. Mangan berperan dalam memperkuat matriks ferit dan meningkatkan ketangguhan, sedangkan kromium tidak hanya memperbaiki kemampuan pengerasan (*hardenability*), tetapi juga memberikan ketahanan terhadap korosi ringan dan keausan permukaan, yang penting untuk komponen yang terpapar lingkungan luar. Kombinasi elemen ini menjadikan baja SUP9 material yang tangguh namun tetap fleksibel untuk aplikasi beban dinamis.

Sifat mekanik baja SUP9 sangat bergantung pada proses perlakuan panas yang diterapkan. Dalam kondisi anil (*annealed*), material ini memiliki kekuatan tarik sekitar 600-800 MPa, kekerasan rendah (sekitar 20-25 HRC), dan keuletan yang baik, sehingga mudah dibentuk atau dipotong untuk proses manufaktur awal. Namun, setelah menjalani *quenching* pada suhu 850-900°C diikuti dengan *tempering* pada suhu 400-500°C, kekuatan tarik meningkat drastis hingga 1200-1400 MPa, dengan kekerasan mencapai 40-

45 HRC dan ketangguhan yang memadai untuk menahan beban siklik. Perlakuan panas ini mengubah sifat material dari kondisi lunak menjadi keras dan tangguh, sesuai dengan kebutuhan pegas kendaraan yang harus menyerap getaran dan mendistribusikan beban tanpa patah. Perbandingan antara kondisi anil dan *tempered* menunjukkan fleksibilitas baja SUP9 dalam menyesuaikan performa mekaniknya untuk aplikasi spesifik, yang menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut tentang efek penggerjaan dingin (Rendisetyo & Wahono, 2020).

2.3 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas pada baja merupakan suatu proses mengubah sifat logam dengan cara mengubah struktur mikro melalui proses pemanasan dan pengaturan kecepatan pendinginan dengan atau tanpa merubah komposisi kimia logam yang bersangkutan. Tujuan proses perlakuan panas untuk menghasilkan sifat logam yang diinginkan. Perubahan sifat logam akibat proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian logam atau sebagian logam. Proses *heat treatment* dibagi menjadi dua kategori yaitu, pelunakan dan pengerasan. Pelunakan adalah proses untuk menurunkan sifat mekanik agar menjadi lunak. Biasanya untuk memudahkan proses permesinan. Pengerasan adalah proses meningkatkan sifat material terutama kekerasan dengan cara pendinginan cepat (*quenching*). diagram fasa Fe-Fe₃C ini dapat digunakan untuk memudahkan memilih temperatur pemanasan dalam proses *annealing*, normalizing maupun proses *hardening*.



Gambar 2. 1 Diagram Fasa Fe-Fe₃ (Isworo, 2020)

Pada gambar 2.1 dapat dilihat ada beberapa simbol yaitu ferrit (α), besi delta (δ) dan austenit (γ) sebagai larutan padat. Ferrit mempunyai struktur kristal BCC (Body Centered Cubic), besi delta (δ) mempunyai struktur kristal FCC (Face Centered Cubic), austenite (γ) mempunyai struktur kristal FCC (Face Centered Cubic). Fasa A₁ merupakan perubahan fase pada baja hypoeutectoid dari austenit (γ) menjadi perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) atau disebut temperatur reaksi eutectoid. Fasa A₂ merupakan perubahan dari titik curie sifat magnetik besi dari *ferromagnetic* ke *paramagnetic*. Fasa A₃ merupakan perubahan dari fasa austenit (γ) ke ferrit (α). Fasa ACM merupakan temperatur perubahan dari fasa austenit (γ) menjadi sementit. Sedangkan pada fasa A₁₂₃ merupakan temperatur perubahan austenit (γ) menjadi perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) untuk baja *hypereutectoid*. Proses *heat treatment* pada baja memiliki beberapa macam diantaranya ialah sebagai berikut :

2.3.1 *Annealing*

Annealing adalah perlakuan panas yang terdiri dari pemanasan dan penahanan pada suhu yang sesuai, kemudian diikuti dengan

pendinginan pada tingkat yang sesuai terutama untuk pelunakan logam. Umumnya pada baja karbon biasa *annealing* menghasilkan struktur mikro ferit-perlit. Baja karbon di *annealing* untuk memudahkan pengerjaan dingin atau permesinan, meningkatkan sifat mekanik. *Annealing* terdiri dari memanaskan logam ke suhu tertentu, menahannya pada suhu tersebut untuk waktu tertentu dan kemudian mendinginkan logam ke suhu kamar, proses pendinginan tergantung pada jenis logam dan karakteristik yang diinginkan.

2.3.2 *Hardening*

Hardening adalah perlakuan panas yang bertujuan untuk mendapatkan kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi. pada proses ini baja dipanaskan pada temperatur 30°C - 50°C. ditahan pada temperatur tersebut kemudian didinginkan secara cepat untuk mendapatkan struktur mikro yang keras. Semakin tinggi kandungan karbon semakin tinggi juga kekerasan yang dihasilkan. Proses perlakuan panas *hardening* biasanya digunakan untuk baja paduan tinggi dan rendah. Proses *hardening* meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja tetapi akan mengurangkan keuletan pada baja. *Hardening* terdiri dari memanaskan baja pada suhu tertentu dan kemudian mendinginkannya dengan cepat (*quenching*).

2.3.3 *Tempering*

Tempering adalah proses perlakuan panas yang telah dikeraskan (*hardening*) untuk meningkatkan ketangguhan dan keuletan. Proses ini melibatkan pemanasan kembali baja pada suhu tertentu di bawah titik kritisnya kemudian didinginkan dengan udara. Tujuan *tempering* adalah mengurangi tegangan sisa yang mungkin terjadi selama proses *hardening*, sehingga mencegah retakan dan meningkatkan kekuatan.

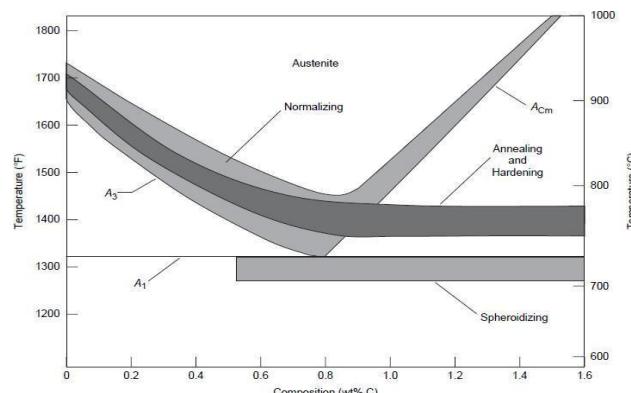
2.3.4 *Normalizing*

Normalizing adalah proses perlakuan panas dimana mencapai temperatur tertentu kemudian didinginkan perlahan dengan menggunakan media pendingin udara. Tujuan *normalizing* adalah

memperoleh struktur yang homogen dan butir-butir kristal yang halus, proses *normalizing* juga dapat meningkatkan atau menurunkan kekuatan dan kekerasan tergantung pada perlakuan panas dan sifat mekanik baja sebelum dilakukan proses *normalizing*.

2.4 Temperatur Austenisasi

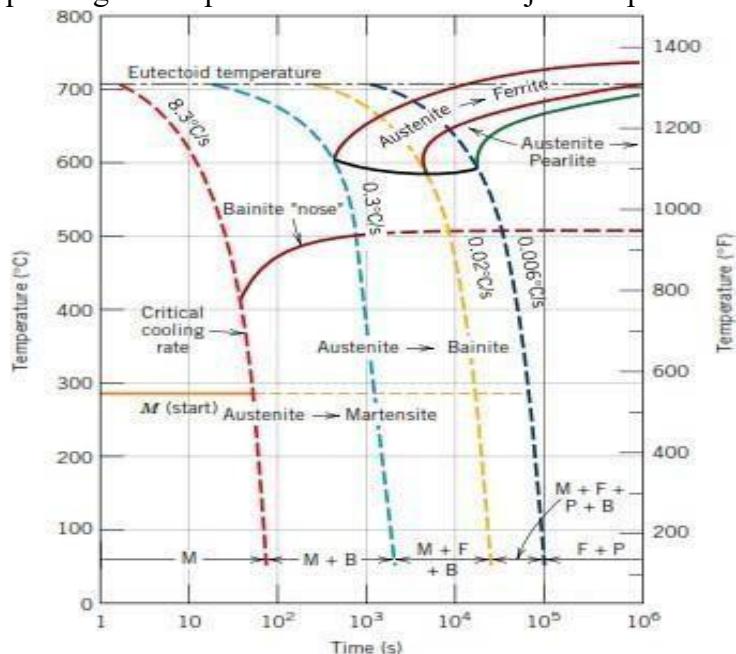
Proses austenisasi adalah tahap pemanasan baja hingga mencapai temperatur di mana struktur mikro baja berubah menjadi austenit. Temperatur austenisasi biasanya berada di atas temperatur kritis, yaitu sekitar 820°C–900°C tergantung jenis baja dan komposisinya. Pada temperatur ini, struktur baja berubah menjadi fasa austenit yang memiliki struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*) dan mampu melarutkan karbon lebih banyak dibandingkan fasa ferrit. Proses ini penting untuk menghasilkan struktur akhir yang lebih keras setelah dilakukan pendinginan cepat (*quenching*), yang mengubah austenit menjadi martensit. Tujuan utama austenisasi adalah mendapatkan struktur mikro yang homogen dan mengoptimalkan sifat mekanik seperti kekerasan dan ketangguhan baja. Setelah austenisasi, baja biasanya didinginkan secara cepat (*quenching*) untuk mengubah struktur austenit menjadi martensit, yang memiliki kekerasan tinggi karena karbon terperangkap dalam kisi kristal *body centered tetragonal* (BCT). Pendinginan yang lambat menghasilkan struktur lain seperti perlit dan ferit yang lebih lunak (Rasyidy, 2017).



Gambar 2. 2 Rentang Temperatur Austenisasi (Isworo, 2020)

Pada proses *hardening* temperatur pemanasan harus dilakukan sampai daerah austenit (γ) agar dapat melarutkan karbida sampai menjadi larutan austenit yang dapat bertransformasi menjadi martensit diperoleh dari austenit yang didinginkan secara cepat, dan temperatur ditahan selama beberapa waktu tertentu pada temperatur austenisasi agar austenit menjadi homogen, dalam proses *hardening* temperatur austenisasi yang dianjurkan adalah untuk baja hypereutectoid $300^{\circ}\text{C}-500^{\circ}\text{C}$ di atas temperatur kritis A1, dan $200^{\circ}\text{C}-500^{\circ}\text{C}$ di atas temperatur kritis A3 untuk baja *hypoeutectoid*.

Proses pendinginan cepat dilakukan setelah baja atau paduan mengalami



Gambar 2.3 Diagram Continuous Cooling Transformation (Isworo, 2020)

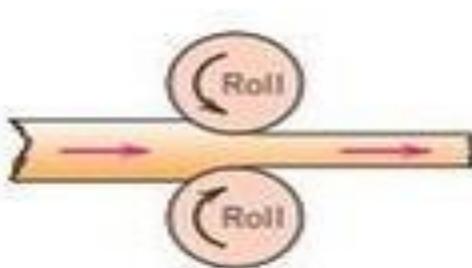
proses *heat treatment* (perlakuan panas) dengan tujuan untuk mencapai terbentuknya struktur martensit. Air, minyak, oli dan air garam merupakan media pendingin yang sering digunakan pada proses perlakuan panas, yang memiliki viskositas lebih rendah akan memberikan laju pendinginan kritis sehingga akan mendapatkan kekerasan yang lebih tinggi. Untuk mempermudah dalam mengidentifikasi struktur yang terjadi setelah perlakuan panas maka dapat dilihat pada diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) yang dapat digunakan untuk memprediksi struktur yang terbentuk, diagram ini menggambarkan hubungan laju pendinginan dengan struktur yang akan terbentuk setelah terjadi transformasi fasa

(Isworo, 2020).

2.5 Pengeraaan Dingin

Pengerjaan dingin (*cold working*) adalah proses deformasi plastis yang dilakukan pada suhu di bawah titik rekristalisasi material. Tujuan utama pengeraaan dingin adalah untuk meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan material melalui mekanisme pengerasan regang (*strain hardening*), yang sangat relevan dalam konteks pengolahan baja pegas seperti SUP9 untuk meningkatkan performa mekaniknya dalam aplikasi beban siklik. Dalam penelitian (Rendisetyo & Wahono, 2020) penggulungan dingin dipilih sebagai metode utama karena kemampuannya untuk memberikan deformasi seragam pada lembaran baja SUP9, yang biasanya digunakan dalam bentuk pelat untuk pembuatan pegas daun. Proses penggulungan dingin melibatkan pengurangan ketebalan material melalui tekanan mekanis menggunakan rol, yang menyebabkan deformasi plastis tanpa pemanasan tambahan. Tingkat deformasi diukur sebagai persentase reduksi ketebalan atau luas penampang. Proses pengeraaan dingin dapat dilakukan melalui berbagai metode ialah sebagai berikut :

2.3.5 Cold Rolling

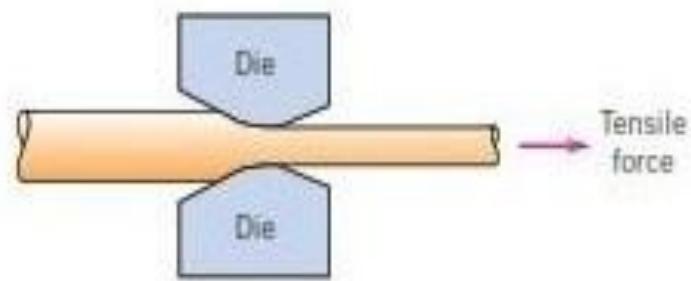


Gambar 2. 4 *Cold Rolling* (Aeroengineering.co.id)

Cold rolling adalah proses pembentukan logam dengan cara

melewatan lembaran logam melalui satu atau sepasang rol pada suhu di bawah temperatur rekristalisasi logam tersebut (biasanya suhu kamar). Tujuan utama proses ini adalah untuk mengurangi ketebalan logam sekaligus memperoleh ketebalan yang seragam dan permukaan yang halus tanpa memanaskan logam seperti pada penggerolan panas.

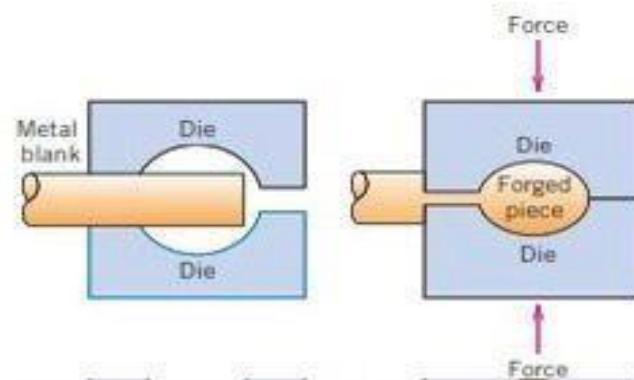
2.3.6 *Cold Drawing*



Gambar 2. 5 *Cold Drawing* (Aeroengineering.co.id)

Cold Drawing adalah proses pembentukan logam secara plastis dengan cara menarik (menarik) sepotong logam melalui satu atau serangkaian cetakan (*die*) pada kondisi suhu dingin, sehingga ukuran penampang logam tersebut berkurang dan panjangnya bertambah.

2.3.7 *Cold Forging*

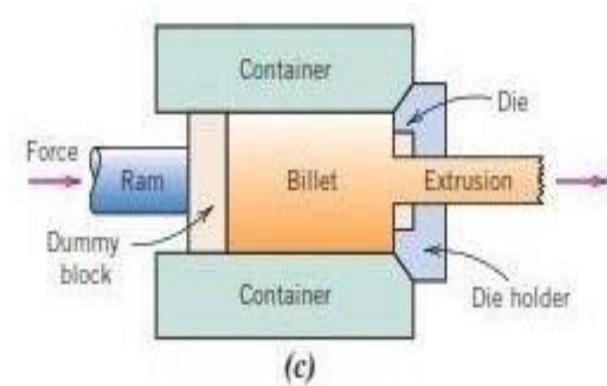


Gambar 2. 6 *Cold Forging* (Aeroengineering.co.id)

Cold forging adalah proses pembentukan logam yang dilakukan

pada suhu kamar atau sedikit di atasnya, tanpa pemanasan hingga meleleh, dengan menggunakan gaya tekan tinggi untuk mendekati atau mengisi rongga cetakan sehingga logam berubah bentuk secara plastis.

2.3.8 *Cold Extrusion*



Gambar 2. 7 *Cold Extrusion* (Aeroengineering.co.id)

Cold extrusion adalah proses pembentukan logam secara plastis dengan menekan material awal (*billet* atau *slug*) pada suhu kamar atau sedikit di atasnya menggunakan *punch* melalui cetakan (*die*) yang diam. Material didorong (*push-through*) hingga mengalir dan membentuk profil tertentu sesuai dengan bentuk die, tanpa pemanasan awal seperti pada *hot extrusion*.

2.6 Uji Kekerasan

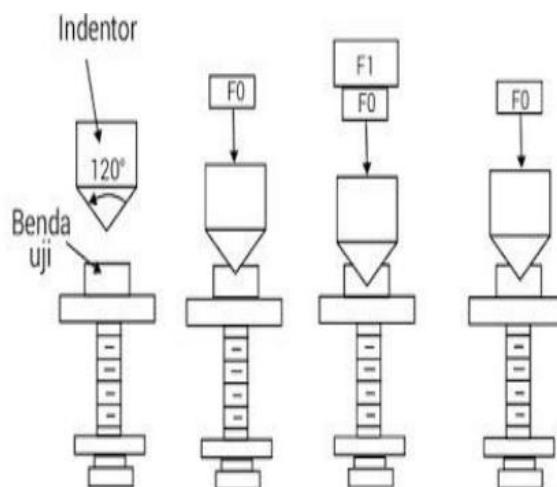
Uji kekerasan merupakan metode penting dalam ilmu material untuk menilai ketahanan suatu material terhadap deformasi permanen, yang berkaitan erat dengan sifat mekanik dan kualitas material. Berbagai metode uji kekerasan telah dikembangkan dan distandarisasi, seperti *Rockwell*, *Brinell*, *Vickers*, *Knoop*, serta metode dinamis seperti *Shore* dan *Leeb*. Setiap metode memiliki prinsip kerja, keunggulan, dan keterbatasan tersendiri, serta aplikasi yang berbeda tergantung pada jenis material dan kebutuhan pengujian (Edward, 2011).

Metode uji kekerasan statik, seperti *Brinell*, *Vickers*, dan *Rockwell*, banyak

digunakan untuk logam, plastik, karet, dan keramik. Metode ini mengukur respons material terhadap beban statis melalui indentasi, dan hasilnya sangat dipengaruhi oleh parameter seperti gaya, waktu tunda, serta kondisi permukaan. Inovasi terbaru meliputi penggunaan pemrosesan citra untuk meningkatkan akurasi pengukuran dan pengembangan sistem pengujian semi-otomatis guna mengurangi variabilitas akibat intervensi manusia (Muzyka, 2024).

2.6.1 *Rockwell*

Hardness rockwell test dilakukan dengan cara menekan permukaan benda uji dengan suatu indenter. Penekanan indenter tersebut dilakukan dengan menekan tekanan pendahuluan (tekanan minor), kemudian ditambah dengan tekanan utama (tekanan mayor), kemudian tekanan mayor dilepaskan sedangkan tekanan minor masih dipertahankan. Indentor yang digunakan berupa bola karbida, kerucut dengan sudut 120 derajat dan radius ujung 0,2 mm.

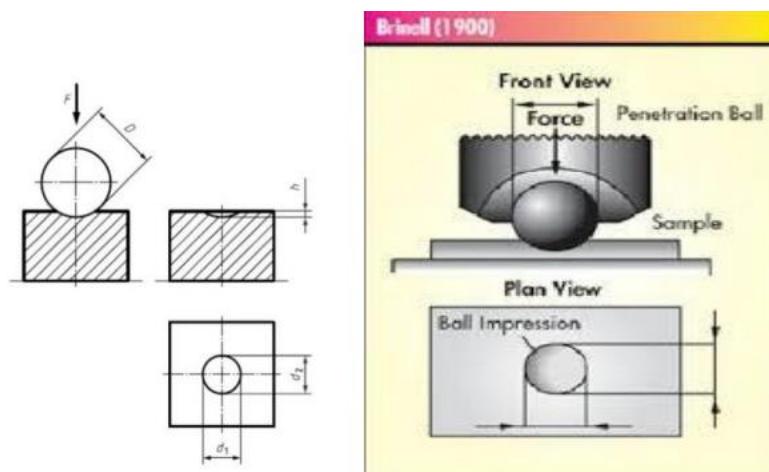


Gambar 2. 8 Proses pengujian kekerasan *Rockwell* (Kurniawan 2024)

2.6.2 *Brinell*

Metode pengujian ini diperkenalkan oleh Johan August Brinell pada

tahun 1900 an ini merupakan pengujian kekerasan dengan melakukan lekukan pada permukaan logam menggunakan indentor. Indentor untuk metode Brinnel berbentuk bola dengan dengan diameter 10mm, 5mm, 2,5 mm, dan 1 mm. Ukuran diameter tersebut merupakan diameter standart internasional. Bola yang digunakan saat pengujian Brinnel dibuat dari 2 bahan yaitu baja yang dikeraskan atau dilapisi chrome, dan baja tungsten carbide.

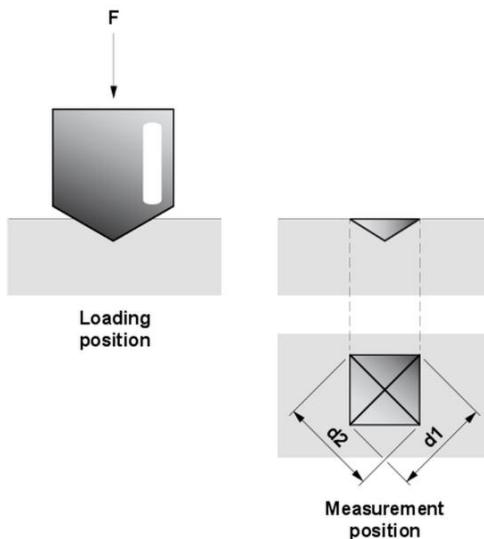


Gambar 2.9 Metode pengujian kekerasan *Brinell* (Sinaga, Boangmanalu et al. 2024)

2.6.3 *Vickers*

Uji Vickers pada aluminium adalah metode untuk mengukur tingkat kekerasan aluminium dengan menekan indentor piramida intan ke permukaan spesimen di bawah tekanan tertentu, kemudian menghitung angka kekerasan Vickers (HV) berdasarkan panjang diagonal lekukan yang terbentuk. Indentor yang digunakan dalam metode uji Vickers adalah piramid intan dengan alas berbentuk bujur sangkar, yang sisi-sisi berhadapannya bertemu di puncak dengan sudut $\alpha = 136^\circ$. Ini diterapkan pada spesimen dengan kekuatan uji (dengan standar mulai dari 10 g) dan ditahan sesuai dengan waktu penahanan. Uji mikro Vickers secara spesifik adalah versi uji Vickers yang menggunakan gaya yang sangat kecil (misalnya 1 gf hingga 1000 gf) untuk mengukur kekerasan material pada skala

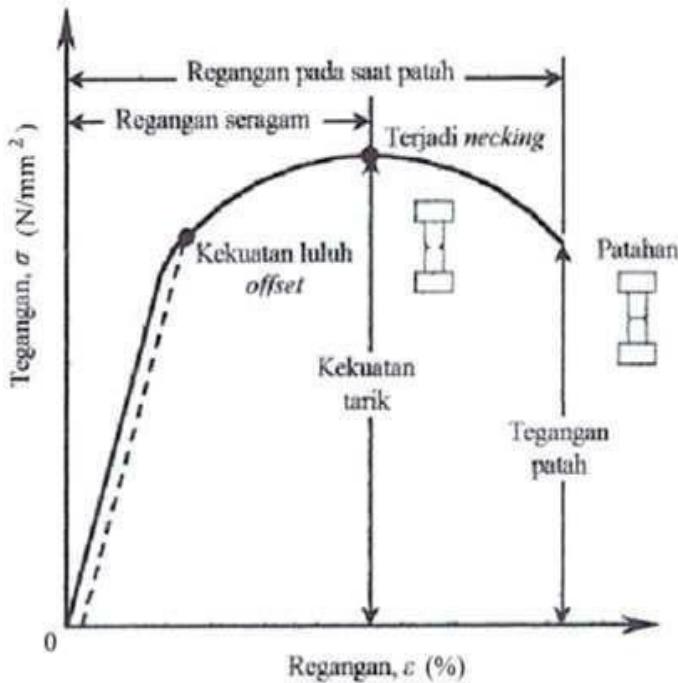
mikroskopis, serta untuk memeriksa area-area kecil dalam sampel yang tipis atau berlapis. Uji Mikrovickers dinormalkan oleh standar seperti ASTM E384 dan ISO 6507-1.



Gambar 2. 10 Metode pengujian kekerasan *Vickers*
(www.zwickroell.com)

2.7 Uji Tarik

Uji tarik (*tensile test*) merupakan salah satu metode pengujian material yang paling umum digunakan dalam bidang teknik material dan industri manufaktur. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik mekanik suatu material, khususnya dalam merespons gaya tarik yang diberikan secara aksial. Dalam uji tarik, spesimen bahan ditarik secara perlahan hingga mengalami kerusakan atau patah, dengan tujuan untuk memperoleh parameter-parameter penting seperti kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), batas mulur (*yield strength*), *modulus* elastisitas (*Young's modulus*), nilai regangan total (*elongation*), serta persentase reduksi luas penampang (*reduction of area*). Selama pengujian, gaya tarik (*tensile load*) diterapkan secara bertahap menggunakan mesin uji tarik standar. Data yang diperoleh berupa besarnya gaya tarik dan perubahan panjang spesimen, yang kemudian digunakan untuk menyusun kurva tegangan-regangan (*stress- strain curve*). Kurva ini menjadi dasar untuk memahami perilaku elastis dan plastis dari material.



Gambar 2. 11 Kurva Tegangan Regangan (Salindeho et al, 2013)

Kurva tegangan diperoleh dengan cara membagi beban dengan luas awal penampang lintang benda uji tersebut. Tegangan tarik (σ) dihitung dengan membagi gaya tarik yang diberikan (F) terhadap luas penampang awal spesimen (A), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Dimana :

σ : Tegangan Tarik (N/m^2 atau Pa)

F : Gaya yang diberikan pada benda uji (N)

A : Luas penampang awal benda uji (m^2)

Sementara itu, regangan (ϵ) diperoleh dari perubahan panjang spesimen (ΔL) terhadap panjang awal (L_0), sebagaimana dijelaskan dalam Persamaan (2.2):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Dimana :

ϵ : Regangan

ΔL : Perubahan Panjang (mm)

- Lo : Panjang Awal Spesimen (mm)
 L : Panjang Akhir Spesimen (mm)

Modulus elastisitas (E), sebagai parameter yang menyatakan kekakuan material dalam domain elastis, dihitung dengan membandingkan tegangan terhadap regangan pada fase linier elastis dari kurva tegangan-regangan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Dimana :

- E : *Modulus* Elastisitas
 σ : Tegangan
 ε : Regangan

2.8 *Fatigue*

Kelelahan (*fatigue*) pada material adalah fenomena kegagalan struktur yang disebabkan oleh beban berulang (*cyclic loading*) meskipun besarnya beban berada di bawah batas elastis material. Proses kelelahan ini secara bertahap menurunkan ketahanan mekanik suatu bahan melalui pembentukan retakan mikroskopis yang lambat laun tumbuh menjadi retakan makroskopis dan menyebabkan kegagalan struktural. *Fatigue* dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti fluktuasi beban, variasi temperatur, serta perubahan geometri atau cacat mikro pada struktur. Fenomena ini sangat penting untuk dikaji, terutama pada struktur yang mengalami beban dinamis seperti komponen mesin, pesawat, dan jembatan. Proses kelelahan material umumnya terdiri atas tiga tahap utama yaitu Inisiasi Retak (*crack initiation*) Terjadi ketika tegangan siklik menyebabkan kerusakan lokal pada mikrostruktur material, biasanya pada permukaan atau titik konsentrasi tegangan. Perambatan Retak (*crack propagation*) Retakan kecil mulai berkembang dengan arah dan pola tertentu, tergantung pada kondisi beban dan struktur mikro material. Kegagalan Akhir (*final fracture*) Setelah retak mencapai ukuran kritis, material mengalami kegagalan mendadak yang ditandai dengan patahnya spesimen secara keseluruhan. Pada saat luasan material tidak mampu lagi menahan beban yang terjadi, maka patah akibat fatik dapat terjadi.

Ketika suatu logam terkena tegangan berulang, logam tersebut akan patah pada tegangan yang jauh lebih dari tegangan yang diperlukan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik. Salah satu aspek dalam mekanika kelelahan yaitu *crack* atau retak. Retak pada umumnya digunakan untuk menganalisis mekanisme perambatan retak yang terjadi pada material ketika diberikan beban berulang secara terus menerus. Perambatan inilah yang biasanya dijadikan acuan untuk dapat menentukan umur kelelahan sebelum terjadi kegagalan struktur material

2.9 Perambatan Retak Fatik

Perambatan retak *fatigue* adalah fase lanjutan dari fenomena kelelahan di mana retakan yang telah terinisiasi berkembang secara progresif akibat beban berulang. Analisis perambatan retak bertujuan untuk memprediksi umur sisa struktur dan dilakukan dengan pendekatan *fracture mechanics*. Salah satu parameter penting dalam studi ini adalah laju perambatan retak, dinyatakan sebagai da/dN , yaitu pertambahan panjang retak per satu siklus pembebanan. Persamaan Paris digunakan untuk menggambarkan hubungan antara laju perambatan retak dengan faktor intensitas tegangan (ΔK), sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2.4)

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

Dimana :

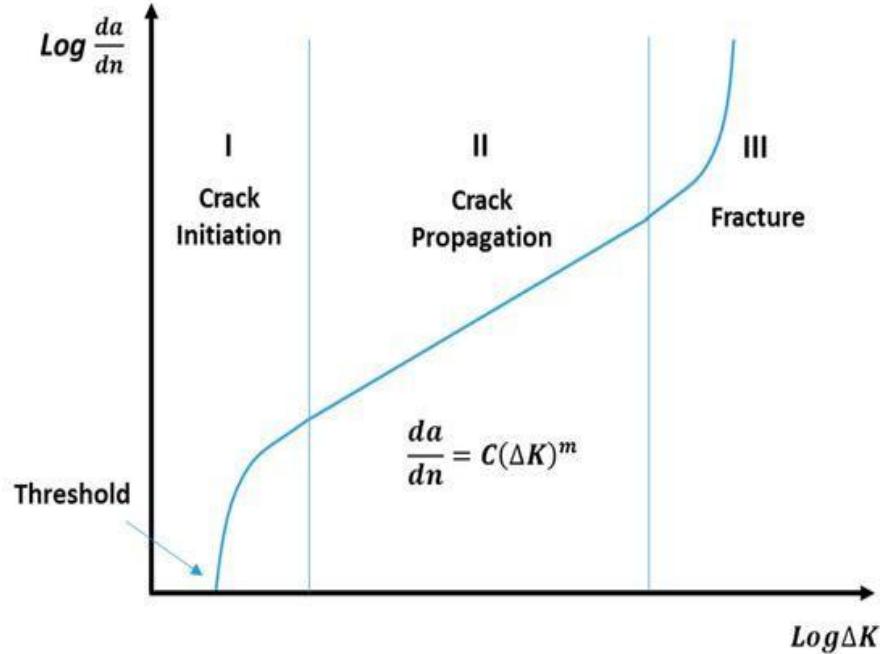
$\frac{da}{dN}$: Laju Perambatan Retak

C : Konstanta Material

ΔK : Faktor Intensitas Tegangan

m : Material Konstan

Perambatan retak fatik sangat penting untuk diperhatikan dalam desain



Gambar 2. 12 Laju perambatan retak (Liu & Dirk, 2018)

teknik dan struktur, karena material yang mengalami perambatan retak fatik bisa gagal secara tiba-tiba meskipun beban yang diberikan tidak terlalu besar. Kurva perambatan retak umumnya terbagi menjadi tiga daerah. Daerah I menunjukkan perambatan retak sangat lambat dan ΔK masih di bawah ambang batas (*threshold*). Daerah II menunjukkan perambatan retak berlangsung stabil dan mengikuti persamaan Paris. Daerah III menunjukkan perambatan cepat menuju kegagalan akhir.

2.10 Perhitungan Laju Perambatan Retak Fatik

Perambatan retak akibat beban berulang (fatik) merupakan fenomena penting dalam studi ketahanan material, khususnya logam, terhadap beban dinamis. Laju perambatan retak fatik (*fatigue crack growth rate*) atau da/dN mengacu pada pertambahan panjang retak (da) per satu siklus beban (dN), dan merupakan salah satu parameter krusial dalam mengevaluasi umur pakai komponen mekanik. Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan laju ini, namun dua pendekatan yang umum dan banyak diadopsi adalah metode *secant* dan metode *polynomial incremental*.

Kedua metode ini dijelaskan dalam standar uji ASTM E647 tentang “*Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*” (ASTM, 2020).

2.10.1 Metode *Secant*

Metode *secant* merupakan pendekatan sederhana yang digunakan untuk menentukan nilai laju perambatan retak fatik berdasarkan dua titik data berurutan. Prinsip dasar metode ini adalah menghitung kemiringan dari garis lurus (*secant line*) yang menghubungkan dua titik pada kurva panjang retak terhadap jumlah siklus beban. Persamaan umum yang digunakan dalam metode ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$(da/dN)_a = (a_i h_1 - a_i)/(N_i h_1 - N_i) \quad (2.5)$$

Metode *secant* menawarkan kemudahan dalam perhitungan, namun memiliki kekurangan dalam hal ketelitian, terutama ketika data bersifat fluktuatif atau tidak linier. Oleh karena itu, metode ini umumnya digunakan pada tahap awal analisis atau ketika data retak bersifat terbatas.

2.10.2 Metode *polynomial*

Untuk meningkatkan akurasi dalam estimasi laju perambatan retak, metode *polynomial incremental* dapat digunakan. Metode ini melibatkan pendekatan deret polinomial terhadap sekumpulan data retak dalam rentang siklus tertentu. Sesuai dengan panduan ASTM E647, metode ini memanfaatkan pendekatan polinomial orde dua (*second-order polynomial*) terhadap set data yang terdiri dari $(2n+1)$ titik berurutan. Nilai n umumnya berkisar antara 1 hingga 5, tergantung pada kelengkapan data dan kebutuhan resolusi (ASTM, 2020). Persamaan umum yang digunakan untuk fitting polinomial orde dua adalah sebagai berikut:

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right)^2 \quad (2.6)$$

Dimana,

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \leq +1 \quad (2.7)$$

Nilai b_0 , b_1 dan b_2 merupakan parameter regresi yang ditentukan dengan metode kuadrat kecil, minimalisasi kuadrat deviasi antara nilai ukuran retakan yang diamati dan nilai yang ditetapkan pada rentang $a_{i-n} \leq a \leq a_i h_n$. Nilai dari a_i merupakan nilai ukuran retakan yang sesuai pada N_i . Parameter $C_1 = 1/2(N_{i-n} + N_i h_n)$ dan $C_2 = 1/2(N_i h_n + N_{i-n})$ digunakan untuk menskalakan data masukan, sehingga menghindari kesulitan numerik dalam menentukan parameter regresi. Laju pertumbuhan retak pada N_i diperoleh dari turunan parabola diatas, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\frac{(da)}{dN} d_i = \frac{b_i}{C_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \quad (2.8)$$

Analisis data hasil dari pengujian retak fatik dihitung menggunakan metode *polynomial incremental* menggunakan progam komputer *quick basic*. Progam ini menggunakan K-kalibrasi spesimen untuk geometri C(T) spesimen. Progam ini dapat mengetahui informasi hasil specimen, variable pembebanan dan lingkungan dicantumkan dalam keluaran bersama dengan nilai tabulasi dari data mentah dan data yang diproses. Nilai ukuran retakan total A (*Meas*) dan A(*Reg*) masing masing diperoleh dari pengukuran dan dari persamaan regresi. Nilai ΔK dan (da/dN) diberikan dalam satuan yang sama dengan variabel masukan.

2.11 Laju Pengerasan Regangan (*Strain Hardening*)

Laju pengerasan regangan adalah ukuran perubahan yang diperlukan untuk menyebabkan perubahan regangan plastis dalam suatu material. Ini mengidikasikan seberapa cepat material menjadi lebih kuat dan lebih keras saat mengalami deformasi plastis. *Strain Hardening* adalah gejala meningkatnya kekuatan dan kekerasan almuniun akibat regangan atau penggeraan dingin yang dialaminya. Selama regangan berlangsung, selain

terjadi pergerakan dislokasi juga terjadi peningkatan jumlah dislokasi. Bila suatu logam berdeformasi secara plastis, maka tegangan geser yang diperlukan untuk menghasilkan slip akan bertambah besar sejalan dengan bertambahnya regangan geser. Besarnya regangan geser yang diperlukan untuk menghasilkan slip yang disebabkan deformasi plastis terlebih dahulu dikenal sebagai (*strain hardening*). Untuk mendapatkan nilai laju pengerasan regangan diperhitungkan dengan persamaan berikut :

$$\varepsilon' = 1n (1 + \varepsilon) \quad (2.9)$$

dan nilai tegangan sebenarnya dihitung melalui persamaan berikut :

$$\sigma_t = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (2.10)$$

Dimana untuk memperoleh nilai K dan n maka dilakukan plot data *true strain* dan *true stress* maka dihasilkan persamaan :

$$\log \sigma = K \log \varepsilon + n \quad (2.11)$$

Setelah didapat nilai K dan n maka untuk mendapatkan nilai *strain hardening rate* maka digunakan persamaan :

$$\theta = K \varepsilon' - n \quad (2.12)$$

Dimana :

σ : Tegangan Teknik

ε : Regangan teknik

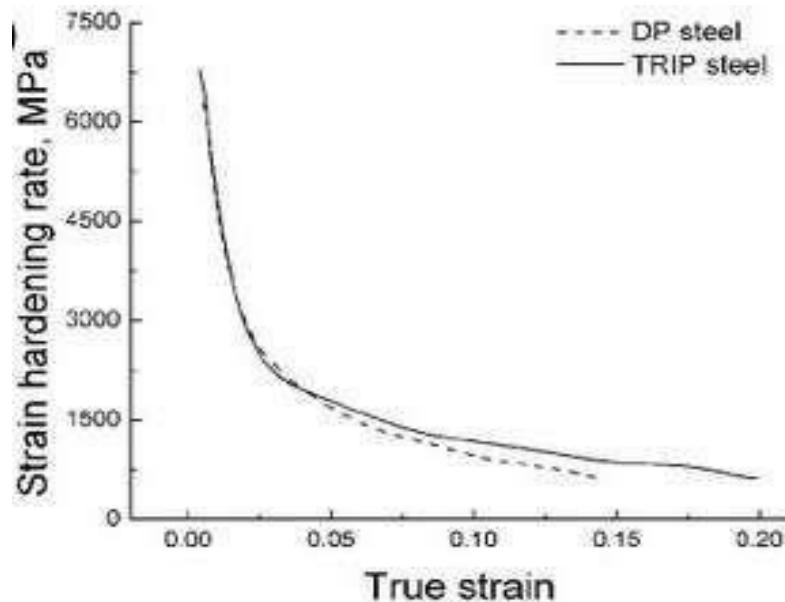
ε' : Regangan sebenarnya

σ : Tegangan sebenarnya

θ : Laju Pengerasan Regangan K : Koefisien kekuatan

n : Koefisien pengerasan regangan

Setelah nilai *strain hardening rate* di plot didapatkan selanjutnya *strain hardening rate* akan di plot dengan nilai *true strain*.



Gambar 2. 13 Kurva *Strain Hardening Rate vs True Strain* (Xiong et al., 2014)

2.12 Stress Intensity Factor (SIF)

Stress Intensity Factor (SIF) adalah parameter penting dalam mekanika retak (*fracture mechanics*) yang digunakan untuk mendeskripsikan besarnya konsentrasi tegangan di ujung suatu retak pada material. Nilai ini memberikan informasi kuantitatif tentang bagaimana gaya luar atau beban menyebabkan distribusi tegangan yang tidak seragam di sekitar ujung retak, dan menjadi dasar dalam menilai potensi propagasi retak akibat beban statis maupun siklik (*fatigue*). Konsep SIF pertama kali dikembangkan oleh Irwin pada pertengahan abad ke-20 sebagai bagian dari pendekatan *linear elastic fracture mechanics* (LEFM). Dalam pendekatan ini, diasumsikan bahwa material bersifat elastis-linier, dan terdapat bidang diskontinuitas (retakan) yang menyebabkan peningkatan lokal tegangan secara signifikan meskipun tegangan makroskopik berada di bawah batas leleh material (Anderson, 2017).

SIF dilambangkan dengan huruf K , dan nilainya tergantung pada geometri

retakan, ukuran spesimen, serta jenis dan arah gaya yang bekerja. Dalam praktiknya, SIF dibedakan menjadi tiga mode utama berdasarkan arah gaya terhadap bidang retak:

Mode I – *Opening Mode* (Mode Tarik), tegangan tarik bekerja tegak lurus terhadap bidang retak, menyebabkan dua permukaan retak saling menjauh. Ini adalah mode yang paling umum dan paling kritis dalam banyak aplikasi teknik.

Mode II – *Sliding Mode* (Mode Geser Dalam), tegangan geser bekerja sejajar terhadap bidang retak dan menyebabkan permukaan retak bergeser ke arah yang sejajar dengan bidang tersebut.

Mode III – *Tearing Mode* (Mode Geser Luar), tegangan geser bekerja secara tegak lurus terhadap permukaan bidang retak dan menyebabkan retak bergeser dalam arah melintang bidang.

Setiap mode memiliki nilai K masing-masing, yaitu KI , KII , dan $KIII$. Untuk kebanyakan kasus rekayasa, retak akibat beban tarik dominan dikaji menggunakan KI karena pembebangan Mode I paling sering ditemui. Nilai *Stress Intensity Factor (SIF)* dapat diperoleh berdasarkan panjang retak fatik pada setiap rentang siklus pembebangan. Faktor intensitas tegangan terhadap panjang retak dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini (ASTM E647, 2000) :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{\frac{3}{2}}} (0,886 + 4,64a - 13,32a^2 + 14,74a^3 + 5,6a^4) \quad (2.13)$$

Dimana :

a : a/W nilai ini valid jika $a/W \geq 0.2$

ΔP : Rentan beban

B : Tebal Spesimen

W : Lebar spesimen

$\Delta K = K_{maks} - K_{min}$ adalah nilai faktor intensitas tegangan pada ujung retak. Persamaan sebelumnya diasumsikan bahwa spesimen uji yang digunakan bersifat homogen, elastis, *linear*. Namun persamaan tersebut tidak diperhitungkan pengaruh potensial dari tegangan sisa atau penutupan retak pada nilai ΔK yang dihitung.

2.13 Struktur Mikro Baja

Struktur mikro baja adalah representasi visual dari fase-fase kristalin dan distribusi partikel dalam skala mikroskopis yang menentukan sifat mekanik dan fisis material tersebut. Baja, yang merupakan paduan utama antara besi (Fe) dan karbon (C), memiliki struktur mikro yang bervariasi tergantung pada komposisi kimia, perlakuan panas, dan kondisi proses pembuatannya. Struktur mikro ini sangat memengaruhi sifat-sifat mekanis baja, seperti kekuatan, keuletan, ketahanan aus, dan ketahanan terhadap perambatan retak. Struktur mikro baja terdiri atas berbagai fase utama, yaitu:

2.13.1 Ferrit (α -ferrite)

Ferrit adalah fase padat dari besi dengan struktur kubik berpusat badan (*body-centered cubic*/BCC) yang stabil pada suhu di bawah 912°C. Ferrit memiliki kelarutan karbon yang rendah (maksimum sekitar 0,02% pada suhu kamar) dan bersifat lunak serta ulet. Ferrit memberikan keuletan tinggi namun kekuatan tarik rendah pada baja (Callister & Rethwisch, 2018).

2.13.2 Perlit (*Pearlite*)

Perlit adalah struktur lamelar yang terdiri dari lapisan tipis ferrit dan sementit (Fe_3C) yang terbentuk melalui transformasi eutektik dari austenit saat pendinginan perlahan pada suhu sekitar 727°C. Struktur ini memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik. Kandungan perlit dalam baja meningkat seiring dengan kadar karbon, sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja namun menurunkan keuletan.

2.13.3 Sementit (Fe_3C)

Sementit atau besi karbida adalah senyawa intermetalik yang sangat keras dan getas. Sementit hadir dalam bentuk partikel yang tersebar atau sebagai bagian dari struktur lamelar perlit. Kehadirannya menambah kekerasan dan ketahanan aus baja, tetapi secara signifikan mengurangi keuletan.

2.13.4 Austenit (γ -austenite)

Austenit adalah fase dengan struktur kubik berpusat muka (*face-centered cubic/FCC*) yang stabil pada suhu tinggi, biasanya antara 912°C hingga 1394°C tergantung pada kadar karbon. Austenit mempunyai kekuatan tarik sebesar 150.000 Psi, *elongation* sekitar 10% dan nilai kekerasan 40 HRC (Ainnayah, 2022).

2.13.5 Martensit

Martensit terbentuk dari pendinginan cepat austenit sehingga atom karbon terjebak dalam kisi besi. Struktur ini bersifat supersaturasi karbon dan memiliki bentuk tetragonal berpusat badan (*body-centered tetragonal/BCT*), menghasilkan kekuatan dan kekerasan tinggi namun sangat getas. Kehadiran martensit umum dijumpai pada baja yang dikeraskan (*hardened steel*).

2.13.6 Bainit

Bainit adalah struktur hasil transformasi austenit yang terjadi pada laju pendinginan sedang, berada di antara pendinginan perlitik dan martensitik. Struktur ini merupakan kombinasi dari ferrit dan sementit, dengan morfologi acak atau jarum-jarum halus. Bainit menawarkan kekuatan tinggi dengan keuletan yang lebih baik dibandingkan martensit. Struktur mikro baja SUP9 bervariasi sesuai dengan perlakuan yang diberikan. Dalam kondisi anil, struktur terdiri dari ferit. Fasa besi murni yang lunak dan ulet bercampur dengan perlit, yaitu lapisan lamellar dari ferit dan sementit (Fe_3C) yang memberikan kekuatan tambahan. Proporsi perlit yang lebih tinggi pada baja SUP9 dibandingkan baja karbon rendah mencerminkan kandungan karbonnya yang sedang, yang meningkatkan kekerasan tanpa mengorbankan keuletan sepenuhnya. Setelah *quenching*, struktur berubah menjadi martensit fasa berlapis jarum yang sangat keras tetapi rapuh akibat pendinginan cepat yang mencegah difusi karbon dan membentuk kisi kristal tetragonal yang tegang. Proses *tempering* kemudian melunakkan martensit ini menjadi martensit temper, dengan presipitasi karbida halus yang meningkatkan ketangguhan dan mengurangi kerapuhan. Analisis metalografi

menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron pemindai (SEM) dapat mengungkapkan distribusi butir dan fasa ini, yang menjadi dasar untuk memahami bagaimana penggeraan dingin memengaruhi struktur mikro baja SUP9 lebih lanjut.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian tugas akhir ini dilaksanakan pada bulan April 2025. Pengujian deformasi dingin, pengujian tarik, dan pengujian perambatan retak fatik dilakukan di Laboratorium Material Teknik Universitas Lampung.

3.2 Alat yang digunakan

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut :

3.2.1 MTS Landmark 100 kN

Mesin MTS *Landmark 100 kN* digunakan untuk pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik.



Gambar 3. 1 MTS Landmark 100kN

3.2.2 Clip On Displacement Gages

Clip On Displacement Gages digunakan untuk mengukur perambatan retak fatik sesuai dengan ASTM.



Gambar 3. 2 *Clip On Displacement Gages*

3.2.3 *Clevis*

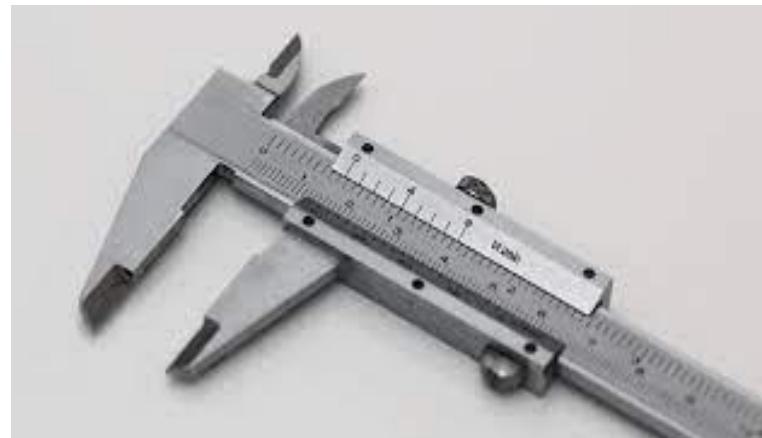
Clevis digunakan untuk mencekam spesimen uji perambatan retak fatik pada mesin MTS Landmark 100kN.



Gambar 3. 3 Clevis

3.2.4 Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur panjang sebelum dan sesudah pengujian tarik dan pengujian fatik.



Gambar 3. 4 Jangka Sorong

3.2.5 *Axial Extensometer*

Ekstensometer aksial adalah jenis sensor perpindahan yang digunakan untuk mengukur pemanjangan atau pemendekan suatu material atau struktur ketika diberi beban aksial. Extensometer aksial banyak digunakan dalam pengujian tarik, tekan, dan lentur material seperti logam, komposit, plastik, dan keramik.



Gambar 3. 5 Axial Extensometer

3.2.6 *Furnace*

Furnace adalah tungku pembakaran atau tanur yang berfungsi untuk memanaskan material hingga suhu sangat tinggi.



Gambar 3. 6 Furnace

3.3 Bahan yang digunakan

Adapun Bahan yang digunakan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut :

3.3.1 Spesimen Baja SUP9

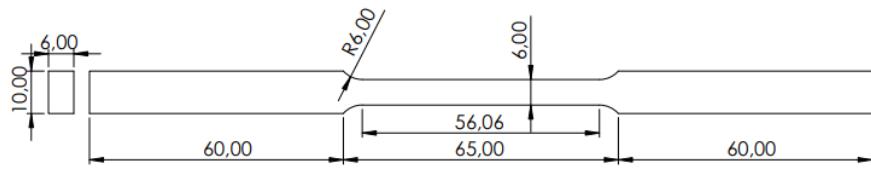
Baja yang dipakai pada tugas akhir ini akan dilakukan proses deformasi dingin.



Gambar 3. 7 Baja SUP9

3.3.2 Dimensi spesimen uji tarik

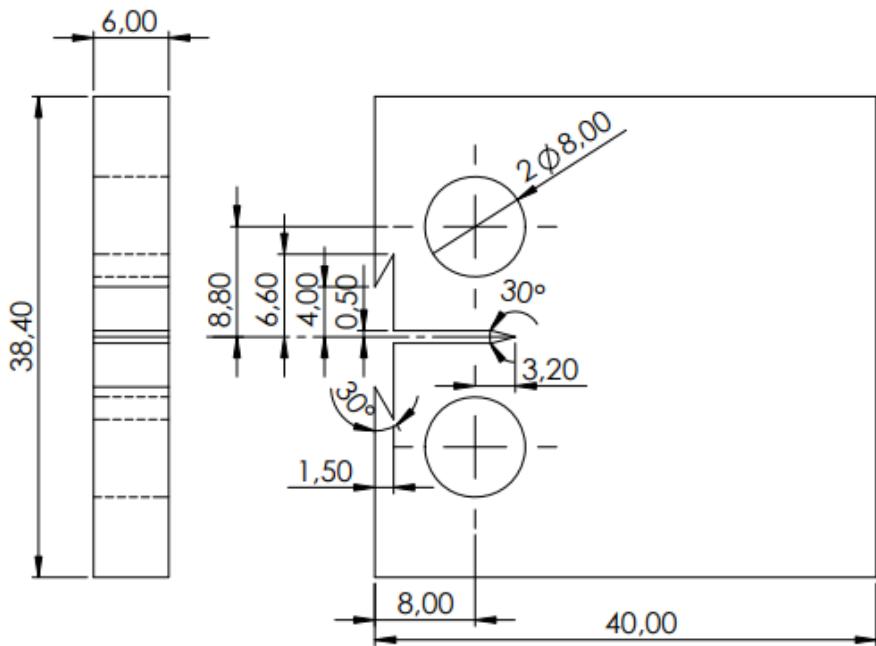
Spesimen uji tarik menggunakan standar berdasarkan ASTM E8



Gambar 3.8 Dimensi Spesimen Uji Tarik (ASTM E8, 2000)

3.3.3 Spesimen Uji Perambatan Retak Fatik

Spesimen uji perambatan retak fatik menggunakan spesimen Compact Tension (CT) standar ASTM E647.



Gambar 3.9 Dimensi Spesimen Uji Tarik (ASTM E647, 2004)

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan, ialah sebagai berikut:

3.4.1. Persiapan Spesimen Uji

Material yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah Baja SUP9

3.4.2. Pemotongan Spesimen Uji

Spesimen uji dibuat sesuai dengan standar dimensi ASTM E8 untuk

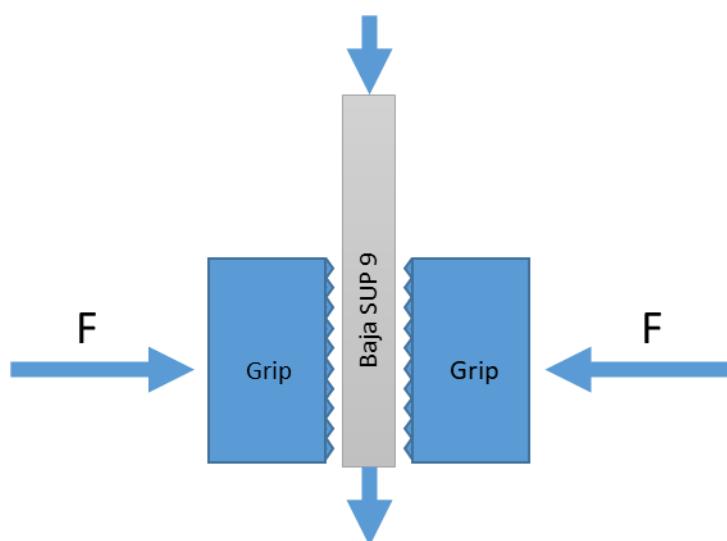
spesimen uji tarik dan ASTM E647 untuk spesimen uji fatik.

3.4.3. Proses Heat Treatment

1. Menyiapkan spesimen.
2. Menyiapkan furnace dengan suhu 830°C .
3. Memasukan spesimen ke dalam *furnace* selama 60 menit.
4. Lalu setelah 60 menit spesimen diturunkan ke suhu 675°C didalam *furnace*.
5. Setelah suhu spesimen didalam *furnace* telah mencapai 675°C kemudian ditahan selama 6 jam.
6. Setelah 6 jam spesimen yang ditahan di dalam *furnace* dilakukan proses *annealing*.

3.4.4. Pengeraaan Dingin

1. Spesimen di proses *cold working* menggunakan mesin MTS Landmark 100 kN.
2. Menyiapkan mesin yang akan digunakan untuk proses *cold working*.
3. Pemberian *cold working* dengan 18 MPa. Setiap tekanan dilakukan selama 20 detik dengan 4 kali pengulangan.



Gambar 3. 10 Skema Proses Pengeraaan Dingin

3.4.5. Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik dilaksanakan terlebih dahulu untuk memperoleh data nilai tegangan luluh (σ_y) baja SUP9. Adapun prosedur pengujian tarik ialah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji.
2. Menghidupkan *chiller* dan HPU (*hydraulic power Unit*).
3. Menghidupkan MTS *Landmark* 100 kN serta temperatur kontroler.
4. Membuka program kontroler 793B pada *computer*
5. Pada station manager klik ceklist pada *exclusive Control* kemudian pada *manual command ceklist* pada *Enable Manual Command*.
6. Pada station manager di *controls detector* ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *interlock* ke *disable* lalu klik *reset* pada *interlock 1* di *station manager*.
7. Lalu klik HPU *power low* dan tunggu sampai 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 terakhir klik HSM *power high*.
8. Pada *manual command* setelah posisi *actuator* terdeteksi, lalu klik posisi *actuator* sedikit untuk membuka katup, setelah posisi *actuator* aman terhadap *cross head* grip atas aman, maka selanjutnya menaikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
9. Pada *detector*, ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *disable* ke *interlock*.
10. Membuka software MTS *Test Suite* (MPE), memilih *template* uji tarik statis.
11. Memasang spesimen uji pada *cross head* grip atas kemudian cekam spesimen.
12. Kemudian *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam grip bawah dengan kedalaman 45 mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk grip spesimen.

13. Meluruskan grip bawah sesuai dengan grip atas. Kemudian, pada *manual command* klik *control mode* dan ganti *displacement* ke *force*, dan grip bagian bawah dicekam.
14. Kemudian, mereset pada *interlock 1 station manager* dan *un ceklist enable manual command* pada *manual command*.
15. Mengklik *new test run* pada software MTS *Test Suite*, dan mengatur *setup variables tensile test* yaitu dengan memasukkan data panjang spesimen, *gauge length*, dan diameter serta memasukkan data *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
16. Mengklik *klik ok* dan *run test*.

3.4.6. Pengujian Perambatan Retak Fatik

Prosedur pengujian perambatan retak fatik ialah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen uji sesuai standar ASTM E647.
2. Menghidupkan *chiller* dan *HPU (Hydraulic Power Unit)*.
3. Menghidupkan MTS *Landmark 100 kN* dan temperatur kontroler.
4. Menghidupkan lampu penerang pada MTS *Landmark 100 kN*.
5. Membuka program *station manager*.
6. Pada *station manager* klik *ceklist* pada *exclusive Control* lalu pada *manual command ceklist* pada *Enable Manual Command*.
7. Pada *station manager* di *controls detector* ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *interlock* ke *disable* lalu klik *reset* pada *interlock 1* di *station manager*.
8. Lalu klik *HPU power low* dan tunggu sampai 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 terakhir klik *HSM power high*.
9. Pada *manual command* setelah posisi *actuator* terdeteksi, lalu klik posisi *actuator* sedikit untuk membuka katup, setelah posisi *actuator* aman terhadap *cross head* grip atas aman, maka selanjutnya menaikkan *actuator* ke posisi nol (*zero*).

10. Pada *detector*, ubah *upper action* pada *axial displacement* dari *disable* ke *interlock*.
11. Membuka *software MTS Test Suite* (MPE), memilih *template* untuk *fatigue crack growth test*.
12. Pasang spesimen pada *cross head* grip atas dengan rapih kemudian spesimen dicekam.
13. Kemudian *cross head* diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam grip bawah dengan kedalaman 45 mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk grip spesimen.
14. Meluruskan grip bawah sesuai dengan grip atas, lalu pada *manual command*, klik *control mode* dan ganti *displacement* ke *force* dan grip bagian bawah dicekam.
15. Kemudian reset pada *interlock 1 station manager* dan *un-ceklist enable manual command* pada *manual command*.
16. Klik *new test run* pada *software MTS Test Suite*, dan mengatur *setup variables tensile test* yaitu dengan memasukkan data-data *Fmax* dan *Fmin*, siklus total, *incremental cycles* untuk mengatur *stop* mesin secara otomatis pada setiap jumlah siklus tertentu agar retak dapat diamati atau diukur dengan menggunakan alat mikroskop digital portabel.
17. Setelah menginput semua data lalu klik *Run Test*.

3.5 Pengambilan Data

Adapun data yang diperoleh dari hasil pengujian ialah sebagai berikut :

3.5.1. Uji Tarik

Tabel 3. 1 Data Hasil Uji tarik

Spesimen	Tegangan (MPa)	Energi		Modulus elastis (%)	Elongasi total (%)
		Plastis	Elastis		
Baja SUP9	Luluh <i>Ultimate</i>				

3.5.2. Uji Perambatan Retak Fatik

Tabel 3. 2 Data Hasil Perambatan Retak Fatik

No	Jumlah Siklus	Panjang Retak (mm)	
		compliance	pengukuran
1	1000		
2	1200		
dst			

3.5.3. Pengamatan Struktur Mikro

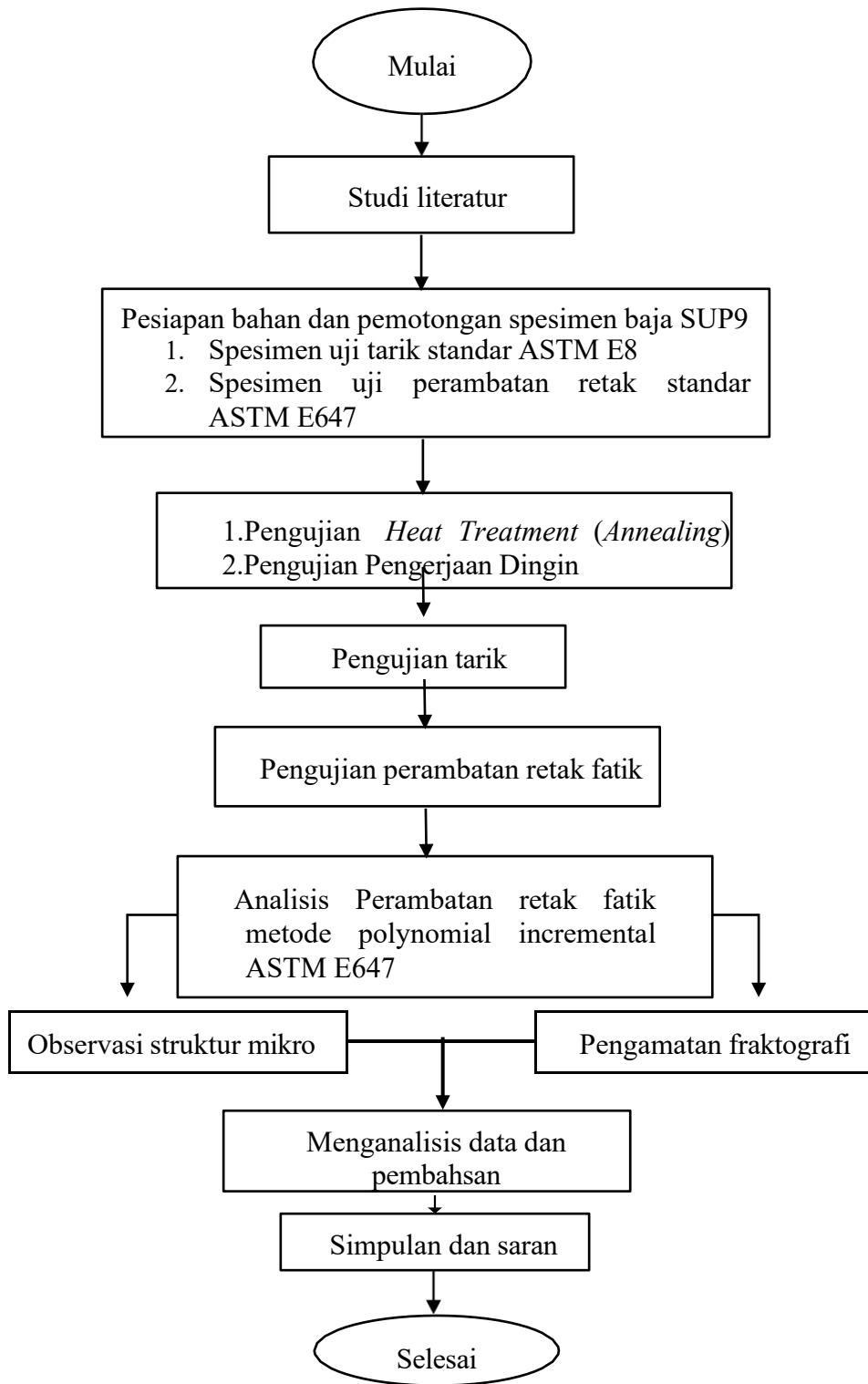
Analisis struktur mikro untuk mengetahui fasa-fasa perubahan yang terjadi setelah dilakukan uji perambatan retak fatik pada baja SUP9

3.5.4. Pengamatan *Scanning electron Microscope* (SEM)

Analisis SEM untuk mengetahui jenis patahan pada spesimen perambatan retak fatik.

3.6 Diagram Alur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan ialah sebagai berikut:



Gambar 3. 11 Prosedur Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang didapatkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada *raw material*, kekuatan tarik *ultimate* mencapai 716,941 MPa dengan kekuatan luluh sebesar 360,367 MPa, *modulus Young* (E) 200,213 GPa, dan elongasi rendah hanya 8,16%, yang mengindikasikan sifat material yang keras dan getas akibat struktur mikro halus dari proses fabrikasi awal. Setelah perlakuan *annealing* pada SPEC1, SPEC2, dan SPEC3, terjadi peningkatan kekuatan tarik ultimat rata-rata menjadi sekitar 721 MPa (dengan standar deviasi rendah 2,839 MPa), menandakan stabilitas proses heat treatment yang meredistribusikan tegangan internal tanpa mengorbankan kekerasan secara signifikan. Namun, kekuatan luluh justru menurun drastis menjadi rata-rata sekitar 338 MPa (standar deviasi 16,356 MPa), disertai penurunan *modulus Young* ke 211 GPa (standar deviasi 8,442 GPa), yang mencerminkan pemulihan struktur kristal selama *annealing* sehingga meningkatkan plastisitas material. Peningkatan elongasi paling mencolok, dari 8,16% menjadi rata-rata 20,88% (standar deviasi 6,379%), mengonfirmasi keberhasilan *annealing* dalam memperbesar kemampuan deformasi sebelum patah, ideal untuk aplikasi pegas seperti pada baja SUP9 yang memerlukan ketangguhan.
2. Perambatan retak fatik pada baja SUP9 berhasil dianalisis secara kuantitatif dan kualitatif dengan tingkat akurasi >97 %. Hukum Paris $da/dN = C(\Delta K)^m$ berhasil ditentukan dengan nilai: SPEC3 : $C = 7,85 \times 10^{-13}$, $m = 3,74 \rightarrow$ umur *fatigue* terpanjang 49.000 siklus. SPEC2 : $C = 2,28 \times 10^{-12}$, $m = 3,45$ umur *fatigue* tercepat 37.500 siklus. SPEC1: $C = 1,42 \times 10^{-12}$, $m = 3,64$ umur *fatigue* 44.000 siklus.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya yaitu :

1. Untuk pengujian selanjutnya diperlukan variasi pada perlakuan permukaan material awal lainnya seperti *quenching*, *double quenching* ataupun *tempering*.
2. Diperlukan pengujian dengan spesimen material yang berbeda seperti baja ASTM A36 untuk menjadi pembanding dari penelitian ini.
3. Pengujian selanjutnya diharapkan dapat dilakukan di universitas lampung sepenuhnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ainnayah, R. A. 2022. "PENGARUH AUSTEMPERING BAJA AISI 4140 TERHADAP PERAMBATAN RETAK FATIK."
- Anderson, TL. 2005. Mekanika Fraktur: Dasar-dasar dan Aplikasi (Edisi ke-3). CRC Press.
- ASTM E8. (2000). *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM Internasional.
- ASTM E647. (2004). *Metal Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of ASTM Standard* (Vol. 03.01). ASTM International.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. 2018. Materials science and engineering: an introduction (Vol. 9, pp. 96-98).
- Edwards, J. (2011). Hardness Testing. Testing of the Plastic Deformation of Metals.
- Hoyos Restrepo, MF, & Botero Botero, LF 2021. Implementasi sistem perencana akhir di konstruktur sektor Kolombia: Caso de estudio. *Kecerdasan. Revista chilena de ingeniería* , **29 (4)**, 601-621.
- Isworo, H., & Najib, R. 2020. Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Dan Media Pendingin Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja ST 41 Metode Hardening. *SJME KINEMATIKA* Vol. 5 No. 1. 37-50.
- Liu & Dirk, J. P. 2018. *Crack Propagation Mechanisms for Creep Fatigue: A Consolidated Explanation of Fundamental Behaviours from Initiation to Failure*. *Metals* 2018, 8,623.
- Muzyka, M. (2024). Experimental Determination of the Optimal Hardness Testing Method Depending on the Material's Physical and Mechanical Properties. *Strength of Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00608-w>.
- Nugroho, R., & Hartono, A. 2020. Perambatan Retak Fatigue pada Struktur Baja: Studi Kasus pada Sambungan Welded Joint . Materi Jurnal Rekayasa, 12(1), 45-53.
- Purga, A. K., Moh Badaruddin., Sugiyanto. 2024. Analisis Perambatan Fatik Baja Pegas JIS SUP9 yang diberi perlakuan panas Austempering. Artikel

- Teknik Mesin dan Manufaktur. Volume 5 Nomor 2 (2024).
- Rasyidy, K. Y. 2017. *Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Proses Pendinginan Terhadap Strukturmikro dan Sifat Mekanik Baja Paduan 05CrMnSi* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Rendisetyo, R., & Wahono, D. L. E. 2020. Pengaruh Suhu Awal Media Pendingin Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Impact pada Baja Karbon Medium yang Diperlakukan Quenching. *Jurnal Teknik Mesin dan Pembelajaran*, 3(1), 27- 33.
- Salindeho, R. D., Soukota, J., & Poeng, R. 2013. Pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material. *JURNAL POROS TEKNIK MESIN UNSRAT*, 2(2).
- Syaifudin, A., & Sulistyo, A. 2018. Analisis Kegagalan *Fatigue* pada Material Baja Karbon Rendah Penggunaan Platform Lepas Pantai . *Jurnal Teknik Mesin*, 15(2), 123-131.
- Totten, GE (Ed.). 2006. *Perlakuan panas baja: metallurgi dan teknologi* . CRC press.
- Withers, PJ, & Bhadeshia, HKDH 2001. Tegangan sisa. Bagian 1–teknik pengukuran. *Ilmu material dan teknologi* , 17 (4), 355-365.
- Xiong, Z., Kostryzhev, A., Stanford, N., & Pereloma, E. V. (2014). Microstructures and mechanical properties of DP and TRIP steels after laboratory simulated strip casting. *International Symposium on Steel Science*. 119-122.