

**KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE
API 5L PSL -1 GRADE B**

SKRIPSI

Oleh

TRI KUSUMA WARDANI

NPM 2015021002



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

**KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE
API 5L PSL -1 GRADE B**

Oleh

TRI KUSUMA WARDANI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2024

ABSTRAK

KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE API 5L PSL -1 GRADE B

Oleh

TRI KUSUMA WARDANI

Pipa baja API 5L Grade B merupakan pipa yang digunakan dalam transportasi minyak bumi dan gas alam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik perambatan retak fatik pada material pipa baja API 5L-B. Uji tarik (ASTM 8) dan uji perambatan retak fatik (ASTM E647) menggunakan spesimen *Compact Tension* (CT). Parameter pengujian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu $P_{max} = 3,566$ kN, $P_{min} = 0,357$ kN, $\sigma_{yield} = 399.251$ MPa dan $f = 10$ Hz. Pengukuran panjang retak menggunakan metode *compliance* serta data panjang retak dan jumlah siklus dianalisis menggunakan metode *polynomial incremental* untuk menentukan laju perambatan retak fatik (da/dN) dan faktor intensitas tegangan (ΔK). Plot data da/dN vs ΔK dilakukan untuk menentukan koefisien persamaan Paris pada daerah perambatan retak stabil-stage II. Nilai konstanta $m = 3,607$ dan nilai konstanta $C = 1,176 \times 10^{-12}$. Pengamatan mikrostruktur material menggunakan mikroskop optik menunjukkan fasa ferit dan perlit. Pengamatan SEM pada permukaan patahan menunjukkan pola patahan intergranular. Selain itu, permukaan patahan menunjukkan adanya garis striasi, *secondary crack* dan *voids*.

Kata Kunci : Pipa baja API 5L grade B, Perambatan retak fatik, Mikrostruktur, Fraktografi

ABSTRACT

FATIGUE CRACK PROPAGATION CHARACTERISTICS OF TYPE API 5L PSL -1 GRADE B STEEL PIPE

By

TRI KUSUMA WARDANI

API 5L Grade B steel pipe is a pipe used in the transportation of petroleum and natural gas. The purpose of this study is to determine the characteristics of fatigue crack propagation in API 5L-B steel pipe material. Tensile test (ASTM 8) and fatigue crack propagation test (ASTM E647) using Compact Tension (CT) specimens. The parameters used during the test were $P_{max} = 3,566$ kN, $P_{min} = 0,357$ kN, $\sigma_{yield} = 399.251$ MPa and $f = 10$ Hz. Crack length measurements using the compliance method and data on crack length and number of cycles were analyzed using the incremental polynomial method to determine the fatigue crack propagation rate (da/dN) and stress intensity factor (ΔK). A plot of da/dN vs ΔK data was performed to determine the coefficients of the Paris equation in the stable-stage II crack propagation region. The constant value $m = 3,607$ and the constant value $C = 1,176 \times 10^{-12}$. Microstructural observations of the material using optical microscopy showed ferrite and pearlite phases. SEM observation of the fracture surface showed an intergranular fracture pattern. In addition, the fracture surface showed the presence of striation lines, secondary cracks and voids.

Key words : API 5L grade B steel pipe, Fatigue crack propagation, Microstructure, Fractograf

Judul Skripsi : **KARAKTERISTIK PERAMBATAN
RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE API 5L
PSL -1 GRADE B**

Nama Mahasiswa : **Tri Kusuma Wardani**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015021002**

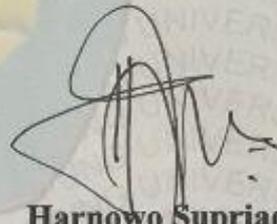
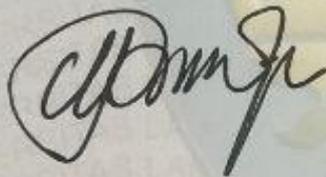
Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2

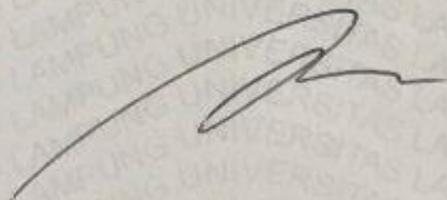
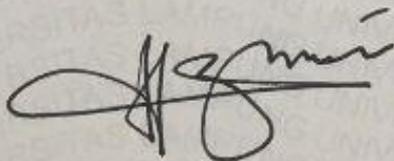


Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.
NIP. 197212111998031002

Harnowo Supriadi, S.T., M.T.
NIP. 196909091997031002

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin



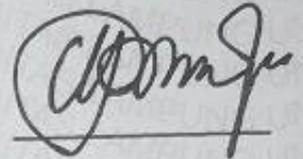
Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197108171998021003

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

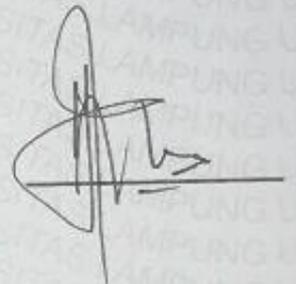
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

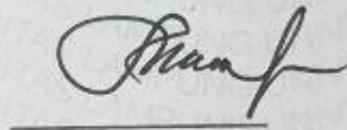
Ketua Penguji : **Prof. Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.**



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **28 Mei 2024**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi dengan judul “KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE API 5L PSL -1 GRADE B” dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana diatur didalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 28 Mei 2024

Yang membuat pernyataan



Tri Kusuma Wardani

NPM. 2015021002

HALAMAN MOTO

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

-Imam Syafi'i-

“Dear me : Most people don't know your story, your struggles, your hustles, your prayers. Most people don't know you are fighting and don't hear this often, just know that I'm proud of you.”

“Gonna fight and don't stop, until you are proud”

“Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja Lelah-lelah itu. Lebarakan lagi rasa sabar itu. Semua yang kamu investasikan untuk menjadikan dirimu serupa yang kamu impikan, mungkin tidak akan selalu berjalan lancar. Tapi, gelombang-gelombang itu yang bisa kamu ceritakan”

-Boy Chandra-

“It's fine to fake it until you make it, until you do, until it true”

-Taylor Swift-

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Hey look, I did it!”

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu wa ta'ala,
karya ini

dipersembahkan kepada :

Kedua Orang Tuaku

Bapak dan Ibu

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

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

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat dan salam semoga selalu tercurahkepada Rasulullah Muhammad SAW, para sahabat, keluarga serta pengikutnya yang tetap istiqomah hingga akhir zaman. Penulisan skripsi yang berjudul “KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE API 5L PSL -1 GRADE B” merupakan syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik padajurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis sangat berharap karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal dapat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari khususnya pada bidang itu sendiri. Skripsi ini dapat terselesaikan karena dukungan dan keterlibatan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak dan Ibu yang selalu menyayangi, memberikan segalanya, mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu kepada penulis agar tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi di Teknik Mesin.
2. Dede, Indra, Nur dan Aprilia sebagai mamas dan mba yang selalu ada untuk membantu semua masalah baik di dalam proses perkuliahan dan di luar perkuliahan.
3. Keluarga Besar Alm. Soegiri Urip sebagai sanak saudara terdekat yang selalu memberikan support kepada penulis.

4. Prof. Dr. Moh. Badaruddin, P.hD. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan selalu mendampingi penulis dengan sabar dalam proses penyusunan skripsi hingga terselesaikan secara cepat dan terstruktur.
5. Harnowo Supriadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan saran serta masukan yang membangun kepada penulis selama proses pengerjaan skripsi ini.
6. Prof. Dr. Sugiyanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan masukan dan saran kepada penulis hingga mampu menyelesaikan skripsi dengan baik.
7. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., P.hd., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
8. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Ahmad Su'udi, S.T., M.T., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
10. Novri Tanti, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang sudah senantiasa membimbing penulis sejak menjadi mahasiswa baru sampai penulis mencapai tahap akhir perkuliahan dan senantiasa membantu penulis ketika penulis menghadapi kesulitan selama berkuliah di jurusan teknik mesin universitas lampung.
11. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas lampung yang telah mengajarkan pengetahuan mengenai Teknik mesin kepada penulis.
12. Muhammad Roid Billy Khansa, sebagai rekan penulis yang selalu membantu serta memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

13. M. Zaky Mubarak, Defid Ferdinand, M. Rifqil Aziz, dan Aldita Umar Fajri yang sudah bersedia menjadi teman serta membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
14. Frizilla Safana dan Meilisa Putri Utami yang selalu menjadi tempat berkeluh kesah dan selalu memberikan semangat kepada penulis saat mengalami kesulitan dalam mengerjakan skripsi.
15. Nanda Syafira, Dea Trisky, Peka, Nadira, dan Wulan sahabat penulis sejak SMP yang selalu memberikan masukan kepada penulis saat mengalami kebingungan dalam menjalankan perkuliahan di Teknik mesin.
16. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
17. Seluruh saudara-saudara yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
18. Teman angkatan 2020 Teknik Mesin yang telah memberikan informasi-informasi terkait penyelesaian skripsi.
19. Terakhir untuk Tri Kusuma Wardani, diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai, terima kasih karena terus berusaha dan tidak menyerah serta senantiasa menikmati setiap proses yang tidak mudah dan penuh tantangan. Sekali lagi terima kasih sudah bertahan sejauh 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 penyempurnaan skripsi ini. Besar harapannya agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca Amin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada 13 Mei 2002 sebagai anak ketiga dari pasangan Bapak Rusdi dan Ibu Sri Wargiyati. Penulis menempuh pendidikan dasar di MI AL-Muhajirin hingga tahun 2014, lalu melanjutkan pendidikan di SMPN 16 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2017 dan SMAS Perintis 2 Bandar Lampung yang diselesaikan tahun 2020.

Pada tahun 2020, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Sekertaris Bidang biro kesekretariatan pada tahun 2021. Selain aktif dalam HIMATEM, penulis juga aktif dalam kegiatan *student internship* di SDGs Center Universitas Lampung pada tahun 2022.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Panjang, Juni 2023 dengan judul laporan “**ANALISA PERHITUNGAN TEGANGAN WIRE ROPE SLING PADA GANTRY LUFFING CRANE KAPASITAS 40 TON**”.

Tahun 2023 penulis melakukan peneitian dengan tema perambatan retak fatik dengan judul penelitian “**KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK FATIK PIPA BAJA TYPE API 5L PSL -1 GRADE B**” dibawah bimbingan Prof. Dr. Moh. Badaruddin,S.T., P.hd. dan Harnowo Supriadi, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja Paduan Rendah.....	5
2.2 Pipa Baja API 5L PSL – 1 L245 Grade B.....	7
2.3 Struktur Mikro Baja.....	8
2.4 Pengujian Tarik	12
2.5 Retak Fatik.....	14
2.6 Perambatan Retak Fatik.....	16
2.7 Compact Tension Specimen (CT)	18
2.8 Stress Intensity Faktor (K).....	22
2.9 Metode Polynomial Incremental	23
III. METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2 Bahan yang Digunakan.....	25
3.3 Alat yang Digunakan.....	26
3.4 Metode Penelitian.....	29

3.5	Prosedur Penelitian.....	34
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1	Data Hasil Pengujian Tarik dan Analisis.....	35
4.2	Data Hasil Uji Perambatan Retak Fatik dan Analisis.....	39
4.3	Analisis Mikrostruktur.....	44
4.4	Analisis <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) Fraktografi.....	47
V.	PENUTUP	50
5.1	Simpulan.....	50
5.2	Saran.....	51
	DAFTAR PUSTAKA	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fe– C	6
Gambar 2.2 Struktur Mikro Pipa Baja API 5L Grade B	8
Gambar 2.3 Struktur Mikro	9
Gambar 2.4 Ferit	10
Gambar 2.5 Perlit	10
Gambar 2.6 Bainit	11
Gambar 2.7 Martensite	12
Gambar 2.8 Kurva tegangan regangan Baja	13
Gambar 2. 9 Skema Pembebanan Fatik	17
Gambar 2.10 Tahap Kegagalan Fatik	18
Gambar 2.11 Geometri specimen CT.....	20
Gambar 2.12 Kurva hubungan COD dengan beban	21
Gambar 3.1 spesimen uji tarik standar ASTM E8	26
Gambar 3.2 spesimen uji fatik ASTM E647	27
Gambar 3.3 Mesin MTS Landmark 100 Kn	28
Gambar 3.4 Jangka Sorong	28
Gambar 3.5 <i>Clip Gage on Displacement (COD)</i>	29
Gambar 3.6 <i>Clevis</i>	30
Gambar 3.7 Kerangka alur penelitian	35
Gambar 4.1 Spesimen uji tarik setelah uji tarik	36
Gambar 4.2 Kurva Engineering Stress Versus Engineering Strain Pipa Baja API 5L-B	37

Gambar 4.3 Kurva hubungan engineering strain versus strain hardening rate Pipa Baja API 5L-B.....	40
Gambar 4.4 Kurva hubungan sikus dan panjang retak Pipa Baja API 5L-B	42
Gambar 4.5 Kurva hubungan faktor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak fatik pipa baja API 5L-B	43
Gambar 4.6 Spesimen pengujian mikrografi	45
Gambar 4.7 Mikrostruktur pipa baja API 5L-B dengan perbesaran 200x.....	46
Gambar 4.8 Mikrostruktur permukaan retak hasil pengujian fatik pipa baja dengan perbesaran (a)50x (b)200x (c)500x	47
Gambar 4.9 Spesimen pengujian SEM	48
Gambar 4.10 Hasil SEM CT03 pipa baja API 5L-B dengan perbesaran a)zona II 2000x b)zona II 5000X c)zona III 2000x d)zona III 500x.....	49
Gambar 4.11 Hasil SEM CT02 pipa baja API 5L-B dengan perbesaran a)500x b)1500x	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Komposisi material pada pipa baja API	5
Tabel 2.2 Nilai compliance coefficient	20
Tabel 4.1 Data Pengujian Tarik Pipa Baja API 5L-B	37

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin berkembangnya teknologi saat ini menyebabkan kebutuhan manusia akan energi menjadi semakin besar. Energi gas alam dan minyak bumi sangat penting bagi kehidupan manusia saat ini. Oleh karena ini dalam proses pemenuhan energi tersebut diperlukan sistem transportasi pemipaan yang efektif dan efisien dalam mengangkut energi hasil alam tersebut. Pipa yang digunakan untuk mengangkut minyak dan gas alam, terutama yang terbuat dari baja, harus memiliki kekuatan dan sifat yang sangat baik dalam kondisi suhu tinggi dan normal (Suryo, 2010).

Baja adalah salah satu material logam yang umum digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan mesin industri maupun alat penunjang proses produksi (Haryadi, 2006). Sifat mekanis baja yang sangat dibutuhkan dalam industri dibandingkan dengan material logam lainnya yaitu kekerasan, keuletan dan ketangguhan. Sifat mekanis pada baja tersebut dapat diketahui dengan melakukan pengujian sesuai dengan standar yang ditetapkan pada material baja seperti uji tarik, uji kekerasan, uji, uji fatik dan lain-lain.

Pipa baja API 5L PSL – 1 L245 Grade B merupakan pipa yang terbuat dari plat baja API 5L L245 dan merupakan jenis baja paduan rendah. Komponen kimia penyusun material API 5L Grade B ini diantaranya yaitu: 0,22% C, 1,2% Mn, 0,025% P, 0,015% S, dan 0,04 Ti. Jenis material ini sangat populer digunakan sebagai konstruksi pembuat pipa baja karena memiliki keunggulan berupa kekuatan tinggi serta ketangguhan material tinggi. Material ini umumnya digunakan pada pipa untuk transportasi minyak bumi dan gas alam. Aplikasi

pipa jenis ini banyak digunakan pada kilang minyak, petrokimia, pembangkit listrik nuklir, pembangkit listrik termal, peralatan boiler dan keperluan teknik lainnya. Pipa dengan material ini juga cocok digunakan sebagai transportasi pemindah fluida yang memiliki sifat mudah terbakar dengan tekanan operasi maksimum diatas 16 bar.

Proses perambatan retak terbagi dalam dua tahap pertumbuhan, yaitu tahap inisiasi retak awal terdiri dari pembentukan retakan pada tegangan geser maksimum. Perkembangan retak tahap kedua terdiri dari pertumbuhan retak dengan arah tegak lurus terhadap tegangan tarik maksimum. Dari aplikasi pipa baja API 5L PSL – 1 L245 Grade B yang begitu vital dan penting maka perlu dilakukan analisis perambatan retak fatik untuk menghindari berbagai kerugian yang mungkin akan terjadi pada saat pengaplikasian pipa.

Fatik atau *fatigue* pada sebuah material dapat disebabkan oleh faktor retakan. Retak pada material umumnya disebabkan oleh beban statis dan beban dinamis. Adanya cacat atau retakan pada material saat diberikan pembebanan biasa disebut kegagalan material. Apabila pada sebuah material terjadi keretakan namun tidak segera ditangani maka retakan tersebut akan bertambah panjang dan dapat mempengaruhi kekuatan struktur dari material tersebut. Analisa perambatan retak merupakan salah satu analisis retak yang berkaitan dengan beban lelah khususnya pada struktur baja yang banyak digunakan dalam konstruksi.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hutabarat menyatakan bahwa Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju perambatan retak fatik tarik dinamis mulai dari spesimen sudut retak 0° , 15° , 30° dan 45° menunjukkan bahwa, berdasarkan bentuk penampang patahan, pengujian tarik dinamis menunjukkan pola yang sama dalam pembentukan retak awal, perambatan retak, dan pola patah. Selanjutnya, laju perambatan retak fatik terhadap bidang normal retak awal (mode I) menurun hingga 8,75%, dan laju perambatan retak fatik terhadap bidang geser (mode II) meningkat hingga 8,29% (Hutabarat, 2005).

Dalam merancang dan membuat suatu konstruksi pipa baja, sifat-sifat material selalu diperlukan agar komponen pipa tersebut dapat berfungsi secara maksimal dan memenuhi kebutuhan fungsional pipa tersebut. Sifat kelelahan (*fatigue*) suatu material sangat penting untuk diperhatikan guna menghindari kerusakan saat pengoprasian pipa pada industri. Salah satu faktor kelelahan yang harus diperhatikan adalah sifat perambatan retak pada material dasar (*crack propagation*) yang akan menyebar keseluruh permukaan material seiring bertambahnya siklus kerja dan waktu jika tidak diantisipasi. Dimana dalam penelitian ini digunakan jenis spesimen pipa baja type API 5L PSL – 1 Grade B. berdasarkan dari pernyataan dan penelitian terdahulu mengenai pentingnya pengujian prambatan retak fatik pada material khususnya pada pipa baja, maka penulis akan melakukan penelitian mengenai **“Karakteristik Perambatan Retak Fatik Pipa Baja Type API 5L PSL -1 Grade B”**.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa perambatan retak fatik pipa baja type API 5L PSL – 1 Grade B.
2. Menganalisa struktur mikro dari hasil patahan spesimen uji pipa baja type API 5L PSL – 1 Grade B.
3. Menganalisis morfologi patahan retak fatik pipa baja type API 5L PSL – 1 Grade B.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen uji tidak diberikan perlakuan panas.
2. Perubahan kondisi pada saat proses permesinan tidak diperhitungkan didalam analisis.
3. Spesimen yang digunakan merupakan potongan pipa baja type API 5L PSL – 1 Grade B yang distandarisasi sesuai standar ASTM dengan sumbu pemotongan pipa -x,-y.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

I. PENDAHULUAN

Bab ini membahas manfaat pipa baja secara keseluruhan, spesifikasi dan unsur kimia pipa API 5L PSL-1 Grade B, tujuan penelitian, batasan masalah, dan prosedur penulisan yang digunakan dalam penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab II menjabarkan tentang landasan teori dari beberapa literatur yang mendukung pembahasan karakteristik perambatan retak fatik pipa baja.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab III ini berisi tentang metode yang dilakukan penulis dalam mengumpulkan informasi, tempat serta waktu pelaksanaan penelitian.

IV. DATA DAN PEMBAHASAN

Bab IV menjelaskan tentang data hasil pengujian yang sudah dilakukan serta pembahasan dari hasil data yang sudah didapatkan saat proses penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Bab V menjabarkan kesimpulan serta saran yang diberikan oleh penulis dari hasil penelitian yang sudah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan sumber dan literatur yang digunakan oleh penulis sebagai referensi dalam melakukan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Paduan Rendah

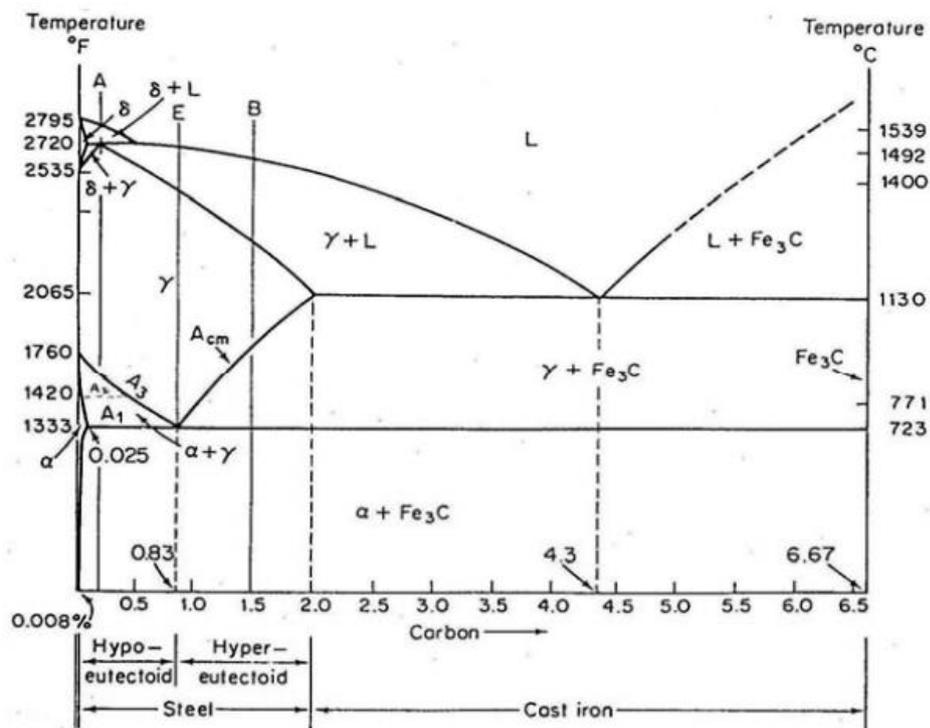
Baja paduan rendah merupakan baja karbon yang diberikan unsur-unsur paduan tambahan guna menciptakan sifat-sifat mekanis yang diinginkan dan tidak dimiliki oleh baja karbon rendah. Baja paduan juga sering mengandung nikel, mangan, dan krom sebagai unsur paduan. Berdasarkan jumlah unsur paduannya, baja paduan dibagi menjadi baja paduan rendah, sedang, dan tinggi. Baja paduan rendah memiliki sifat mekanik yang lebih baik daripada baja karbon dan lebih tahan korosi. (Wardoyo, 2005).

Baja paduan rendah didefinisikan sebagai baja paduan dengan elemen paduannya kurang dari 2,5%, contoh unsur paduannya termasuk Cr, Mn, Ni, S, Si, dan P dan lain-lain. Baja paduan rendah berkekuatan tinggi adalah baja yang kandungan karbonnya berkisar antara 0,02 dan 0,04% hingga 0,2%. Unsur-unsur paduan lain yang ditambahkan seperti Ni, Cr, Cu dan Mo yang sengaja dibatasi hingga total kurang dari 1,5% sedangkan Mn berkisar antara 1 hingga 2% dan Si hingga ~0,5% (Afandi et al, 2015).

Baja paduan rendah pada umumnya memiliki kuat tarik dan kuat luluh yang tinggi serta memiliki ketangguhan, kemampuan bentuk yang baik. Karena berbagai keunggulan sifat baja paduan rendah tersebut diatas, Baja jenis ini telah digunakan dalam banyak aplikasi, seperti konstruksi, pipa untuk minyak dan gas, bejana bertekanan, dan mobil. Material ini sering mengalami perlakuan panas selama proses pabrikan, yang dapat mengubah sifat mekaniknya. Perubahan sifat mekanik ini terjadi sebagai akibat perubahan struktur mikro setelah proses laku panas.

Cara yang dapat dilakukan untuk dapat menggolongkan baja yaitu dengan mengamati perbedaan jumlah karbon yang terdapat dalam campuran logam baja dan unsur paduan lainnya yang terdapat pada baja tersebut. Kadar karbon dalam baja paduan rendah berkisar antara 0,05% - 0,15% sehingga tipe baja ini mudah dilas. Sifat kekuatan pada baja ini bertambah karena ditambahkan unsur paduan lain seperti Mn, Nb, Mo, Cr, V dan lain-lain sehingga terbentuk ferit acicular yaitu struktur yang memiliki kerapatan dislokasi tinggi sehingga efek penguatannya juga tinggi. Baja ini memiliki sifat mekanik *yield strength* sebesar 250-550 MPa dan nilai *ultimate tensile strength* sebesar 415-700 MPa.

Dibawah ini merupakan gambar diagram fasa Fe - C :



Gambar 2.1 Diagram Fe- C (Wardoyo, 2005)

2.2 Pipa Baja API 5L PSL – 1 Grade B

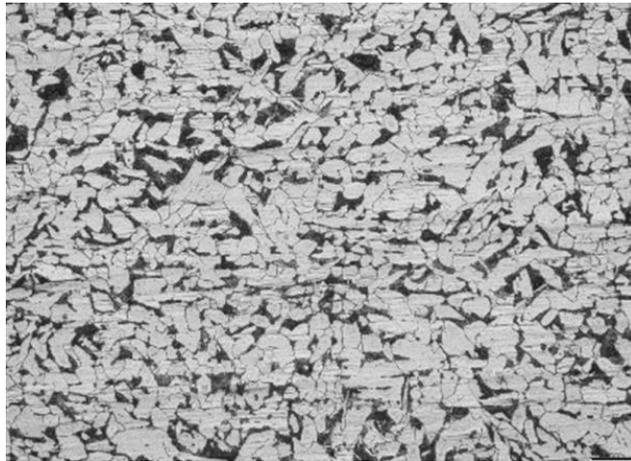
Industri minyak dan gas bumi biasanya menggunakan pipa baja API 5L Grade B untuk sistem perpipaan. Produk utama industri ini adalah minyak mentah dan gas alam. Disamping produk utama tersebut, ada banyak bahan lain yang ikut naik dan melewati saluran pipa baja. Zat-zat tersebut antara lain air, pasir, lumpur, gas CO₂, H₂S dan lain-lain. Saluran pipa Baja API 5L *grade B* ini memiliki bentuk tabung dan banyak dipilih karena dianggap lebih ekonomis serta memiliki sifat mekanik yang dapat memenuhi kriteria fisik kondisi operasi pada industri minyak dan gas bumi (Sudali, 2022).

Pengujian komposisi material pipa baja API 5L Grade B yang dilakukan oleh (Sudali, 2022) menunjukkan perbandingan komposisi material yang diuji dengan standar API. Hasil pengujian tersebut dilampirkan dalam tabel 2.3 dibawah ini :

Tabel 2.1 perbandingan komposisi material pada pipa baja API umum dengan standar API *Specification 5L* (Sudali, 2022).

Unsur Kimia	Pipa Baja Pengujian (wt%)	Standar API (wt%)
C	0,2559	Maks. 0,28
Mn	0,5755	Maks. 1,20
P	0,009	Maks. 0,30
S	0,002	Maks. 0,30
V	0,072	V +Nb+ Ti ≤
Nb	0,0025	0,15
Ti	0,0032	
Cu	0,043	Maks. 0,50
Cr	0,015	Maks. 0,50
Mo	0,005	Maks. 0,15

Struktur mikro yang terdapat pada material pipa baja API 5L *Grade B* yaitu terdiri dari fasa ferit dan fasa perlit. Struktur mikro tersebut menunjukkan bahwa pipa baja ini merupakan jenis baja paduan rendah. Dimana jenis baja ini umumnya sangat cocok digunakan sebagai material pipa yang memiliki sifat ketangguhan dan keuletan tinggi. Gambar struktur mikro pada pipa baja API 5L *Grade B* dapat dilihat dalam gambar 2.2 dibawah ini.



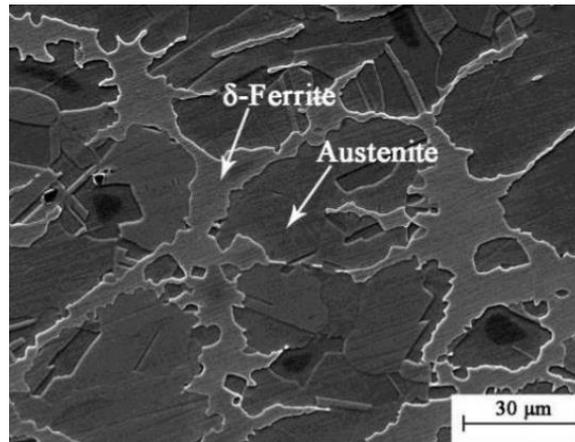
Gambar 2.2 Struktur mikro pipa baja API 5L grade B (Sudali, 2022)

2.3 Struktur Mikro Baja

Struktur mikro adalah representasi dari sekumpulan fasa yang dapat diamati dengan teknik metalografi. Mikroskop merupakan sebuah alat yang bisa digunakan untuk mengetahui struktur mikro dari sebuah logam. Adapun jenis struktur mikro yang terdapat pada baja adalah sebagai berikut:

2.3.1 Austenit

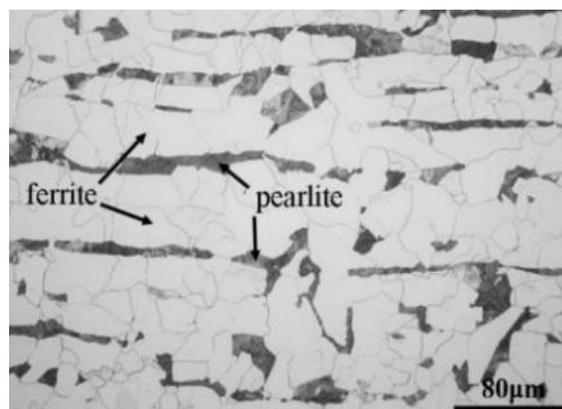
Austenit adalah campuran besi (Fe) dan karbon (C) yang terbentuk ketika suhu turun. Austenit akan berubah menjadi ferit, perlit, dan sementit setelah didinginkan lebih lanjut. Beberapa sifat austenit adalah fleksibel, kuat, dan lunak. Austenite ini memiliki kandungan karbon tertinggi 2,14% yang stabil pada suhu 912°C - 1394°C. Austenit mempunyai nilai kekuatan tarik sebesar 150.000 psi, nilai *elongation* sekitar 10% didalam 2 in, serta nilai kekerasan sekitar 40 HRC (Ainnayah 2022).



Gambar 2.3 Struktur mikro (Xu, Wu et al. 2018)

2.3.2 Ferit (Fe - α)

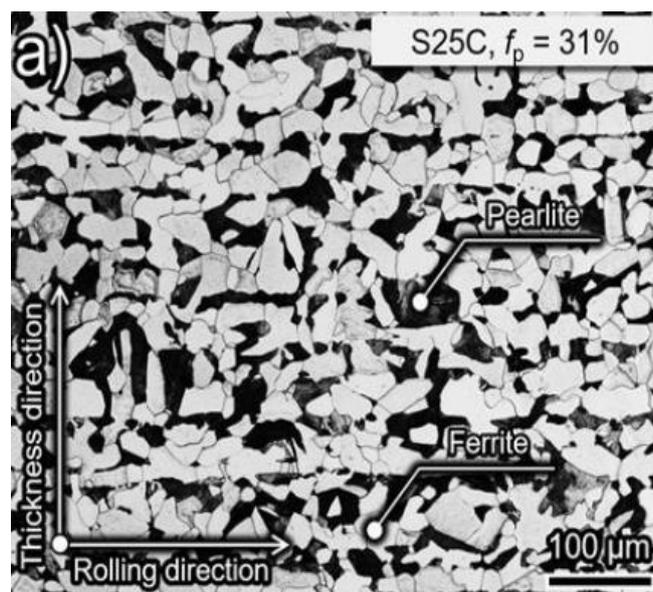
Ferit ini merupakan sel *body centry cubic* atau disebut dengan BCC. Temperature ferit biasanya berada kurang dari suhu 910 °C. ferit memiliki sifat lebih lunak jika dibandingkan dengan sementit. Berdasarkan sifat ferit ini yang lunak dan ulet mengakibatkan material bisa dibentuk dan difabraksi lebih mudah sesuai dengan kebutuhan (Kirono, Diniardi et al. 2010). Fasa pada ferit memiliki warna putih. Ferit akan stabil dalam temperatur tidak lebih dari 910 °C. Pada ferit daya larut atom yang terjadi cenderung rendah yaitu berkisar antara <1 atom C per 1000 atom besi. Hal tersebut dapat terjadi disebabkan oleh kecilnya ruang antara masing-masing atom sehingga daya tampung karbonnya juga relatif kecil dan terbatas.



Gambar 2.4 Ferit (Guo et al, 2019)

2.3.3 Perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

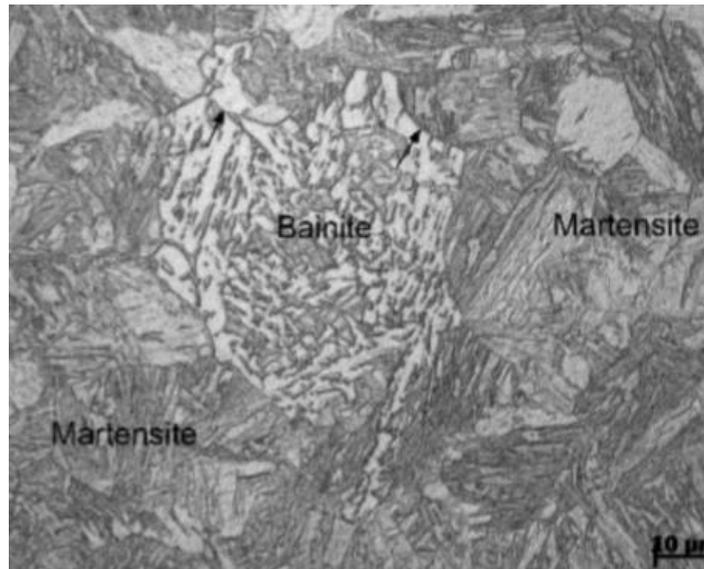
Fasa pada perlit terdiri dari dua campuran mekanis yaitu ferit dengan unsur karbon 0,025% serta sementit dengan unsur karbon 6,67% dalam bentuk lapisan yang saling berseling. Fasa perlit terjadi pada material dalam temperature tidak lebih dari 723°C. Sifat mekanis dari perlit yaitu keras dan kuat jika dibandingkan dengan ferlit. Nilai kekerasan perlit antara 10-30 HRC serta nilai kekuatan tarik sebesar 120.000 psi.



Gambar 2.5 Perlit (Ogawa et al, 2022)

2.3.4 Bainit

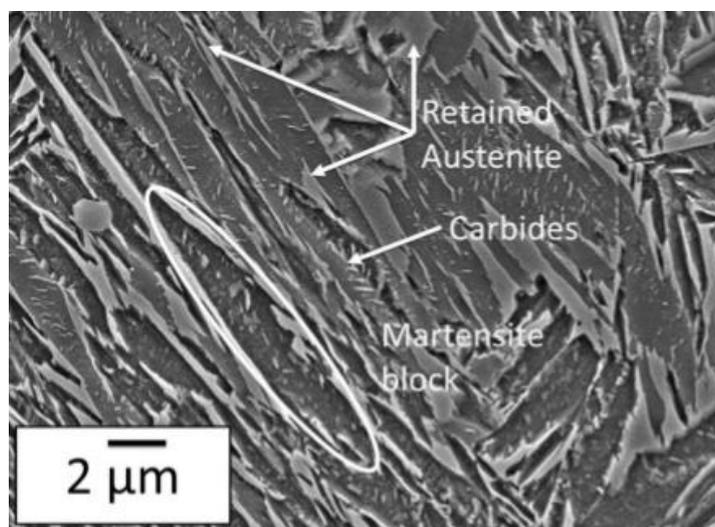
Bainit memiliki bentuk yang menyerupai jarum atau piring, bentuk bainit bergantung pada suhu dan transformasi, bentuk mikro bainit sangat halus dan hanya dapat diamati melalui mikroskop elektron.. Fasa bainit memiliki sifat kurang stabil dan terbentuk dari transformasi pendinginan yang berlangsung cepat pada austenite ke suhu 250°C sampai suhu 550°C dan ditahan pada temperatur 550°C. Kekuatan tarik dari fasa ini berkisar antara 550-1150 MPa.



Gambar 2.6 Bainit (Lan et al, 2018)

2.3.5 *Martensite*

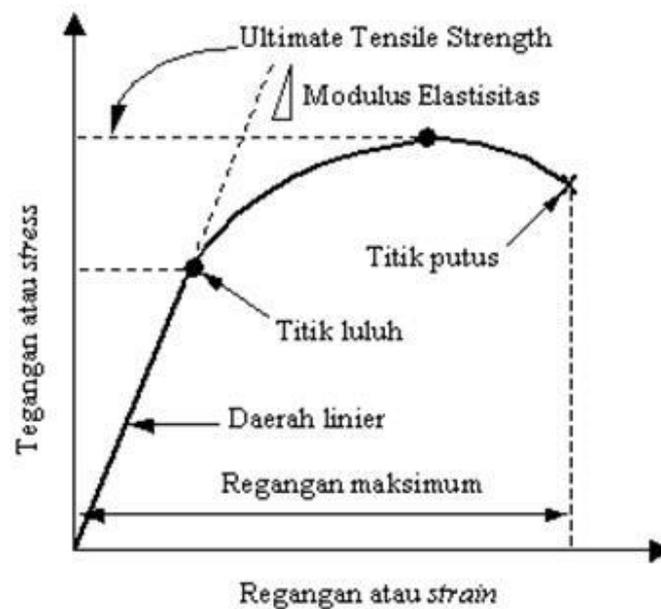
Kondisi ketika ferit dan mertensit bergabung dalam sebuah bentuk jarum sementit disebut dengan martensite. Fasa ini terbentuk dari proses pendinginan cepat. Fasa ini hanya akan terbentuk jika karbon yang ada dalam baja mencapai 0,6%-1% dengan suhu tidak lebih dari 430°C. Sifat dari fasi ini cenderung rapuh dan getas namun cukup keras dengan kekuatan tarik sebesar 1150 MPa atau lebih.



Gambar 2.7 *Martensite* (Allain et al, 2018)

2.4 Pengujian Tarik

Kegagalan pada sebuah material dapat disebabkan oleh pembebanan yang diberikan pada material tersebut diatas batas kekuatan dari material tersebut (Budiman, 2016). Uji tarik dilakukan dengan memberikan beban pada material dan menerapkan gaya dengan arah menjauhi material ke arah yang berlawanan dari titik tengah. Uji tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik suatu material. Pengujian tarik ini umum dilakukan karena merupakan dasar uji coba dan penelitian ketahanan material. Hasil tarikan yang dilakukan pada material yaitu perubahan bentuk pada material. Deformasi yaitu pergerakan partikel kristal bahan sampai ikatan kristalnya terlepas karena kekuatan maksimum yang diberikan (Sardi, 2018).



Gambar 2. 8 Kurva tegangan regangan Baja (Sardi, 2018)

Dalam pengujian tarik hasil akhirnya digambarkan dalam sebuah kurva yang menjelaskan hubungan antara besar gaya yang diberikan pada material dengan perubahan dimensi yang dialami oleh material setelah dilakukan uji tarik. Dari gambar 2. 8 diatas dapat diketahui daerah elastis dan daerah plastis pada bahan. Selain itu dapat ditentukan pula nilai *yield stress* dan *Ultimate*

Tensile Strength (UTS). Besar kekuatan tarik ditentukan dengan tegangan maksimum yang diperoleh dari kurva uji tarik, yang memiliki sifat mekanik pertama yang diketahui. Nilai tarik maksimum diberi simbol u , yang berarti puncak atau akhir.

Uji tarik umum dilakukan untuk referensi dalam melakukan rancangan dasar kekuatan bahan dan sebagai data pendukung untuk spesifikasi material. Pada uji tarik benda uji mendapat gaya tarikan poros yang berkembang terus menerus. Ketika proses pengujian tarik dimulai, pengamatan terhadap perubahan panjang dari bahan juga harus dilakukan. Perubahan Panjang pada specimen dideteksi oleh alat pengukur regangan atau *strain gage*, Ketika pengukur regangan ini mengalami perubahan Panjang dan penampang maka terjadi perubahan nilai hambatan listrik yang dibaca oleh detector dan kemudian di konversi menjadi perubahan regangan.

Tegangan (σ) yang terjadi pada pengujian tarik didapatkan dari hasil membagi beban dengan luas penampang awal specimen uji. Sedangkan regangan (ε) diperoleh dari hasil bagi antara perpanjangan specimen uji setelah pengujian dengan panjang awal specimen uji. Persamaan tegangan dan regangan pada pengujian tarik dapat dijabarkan dalam persamaan dibawah ini.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2.1)$$

Dimana :

σ : Kekuatan tarik (MPa)
 P_{max} : Beban maksimum (kN)
 A_0 : Luas penampang awal (mm²)

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

Diamana :

ΔL : Pertambahan panjang
 L_0 : Panjang awal

Necking pada bahan uji akan terjadi apabila bahan diberi beban melebihi batas toleransi kekuatan tarik dari bahan tersebut. Hal itu menyebabkan luas penampang bahan uji tidak sama pada daerah *necking*. Modulus elastisitas yang terdapat pada persamaan 2.1 merupakan perbandingan tegangan terhadap regangan pada daerah elastis. Jika nilai modulus elastis tinggi maka beban yang diperlukan pada saat proses peregangan bahan uji menjadi semakin besar.

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

Dimana :

σ : Tegangan

ε : Regangan

2.5 Retak Fatik

Kegagalan, juga dikenal dengan istilah fatik dapat disebabkan oleh pembebanan dinamik pada material. Bahkan sekalipun intensitas beban yang diberikan itu lebih rendah dari tegangan luluhnya tetap dapat menyebabkan lelah pada material. Kegagalan tersebut dimulai dengan terbentuknya retakan atau cacat permukaan di dalam struktur material. Retak tersebut dapat terjadi di area yang tidak sempurna atau pada takikan yang sengaja dibuat karena kebutuhan desain. Konsentrasi tegangan muncul di ujung retak, jika konsentrasi tegangan yang lebih tinggi daripada tegangan luluh maka retak akan merambat karena terjadi plastisitas. Kegagalan karena fatik umumnya disebabkan oleh perambatan retak fatik. Pada saat luasan material tidak lagi mampu untuk menahan beban yang terjadi, maka patah akibat fatik dapat terjadi (Widyanto, 2001).

Logam akan patah ketika mengalami tegangan yang besarnya jauh lebih rendah dari tegangan yang diperlukan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik ketika terkena tegangan berulang (σ_u). 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 (Branco, 1999). Tahap terjadinya sebuah retak fatik pada material dibagi menjadi tiga tahap retakan awal (*crack initiation*), tahap perambatan retak (*crack propagation*) dan patah (*final fracture*).

1. Retak awal

Tahap ini adalah awal mula terjadinya retak pada suatu material. Hal ini dapat terjadi karena adanya cacat selama proses fabrikasi atau karena material mengalami pembebanan secara terus menerus.

2. Perambatan retak

Pada tahap perambatan retak ini merupakan lanjutan dari kondisi cacat awal atau retak awal yang dibiarkan secara terus menerus sehingga retakan tersebut menjalar ke bidang material yang lain. Parameter yang menentukan perambatan retak diantaranya adalah ΔK dan K_{max} (Stoychev, 2008). Perambatan retak sejalan dengan pembebanan yang diberikan pada material.

3. Patah

Patah adalah fase paling akhir yang terjadi pada material ketika mendapat pembebanan secara terus menerus. Kegagalan terjadi karena struktur material tersebut mengalami kerusakan atau *crack*. Retak yang terjadi dapat berupa *brittle fracture (cleavage)*, *ductile fracture (rupture)* atau kombinasi dari keduanya.

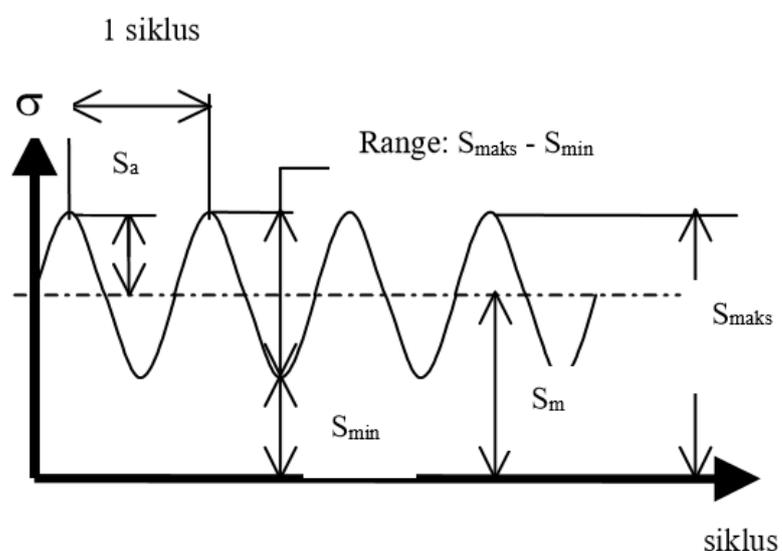
2.6 Perambatan Retak Fatik

Konsep perambatan retak fatik material harus dipertimbangkan ketika melakukan desain aplikasi fatik (*fail-safe design*). Dengan mengetahui nilai perambatan retak fatik yang terjadi pada material, maka kondisi batas amannya dapat diketahui pula (Widyanto, 2001). Hubungan laju perambatan retak fatik dan faktor intensitas tegangan dapat dirumuskan dalam bentuk kurva skematis pembebanan fatik. Dan hubungan diantara keduanya dapat dijelaskan dalam persamaan (2.4).

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.4)$$

$$\Delta K = (S_{max} - S_{min})\beta\sqrt{\pi}\alpha \quad (2.5)$$

Bila material tersebut diberi beban tekan dan nilai laju rambatan retak sama dengan 0, maka jika S_{min} merupakan tegangan tekan maka nilai dari K_{min} nya juga sama dengan 0. Pada kegagalan atau fatik, siklus yang diperlukan dalam proses ini terdiri dari dua tahap diantaranya adalah nukleasi retakan serta perambatan retak hingga panjang retakan sampai pada nilai kritis hingga putus (Thao, 2021). Pengujian perambatan retak fatik dilakukan untuk mengukur hubungan antara panjang retak dengan jumlah siklus.



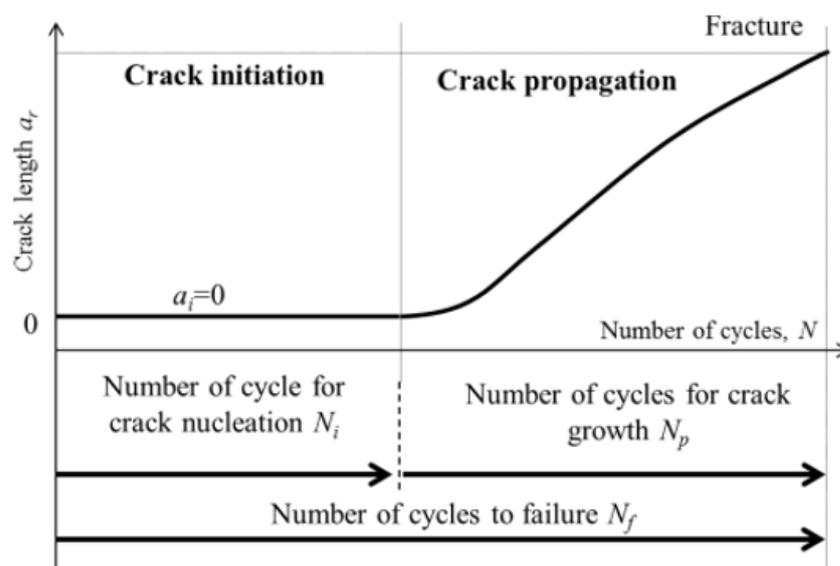
Gambar 2. 9 Skema pembebanan fatik (Widyanto, 2001)

Laju perambatan retak (da/dN) dan faktor intensitas tegangan (K) dianalisis menggunakan metode polinomial incremental yang didasarkan pada standar ASTM E647. Hal tersebut dihitung berdasarkan data panjang retak dan jumlah siklus. Selanjutnya, nilai (da/dN) dan (K) diplot dalam kurva logaritmik untuk menghasilkan konstanta material (C) dan konstanta eksponensial (m), yang keduanya dikenal sebagai konstanta Paris. Secara umum, bagian kurva yang dipertimbangkan untuk perhitungan (m) adalah bagian linier yang memiliki tingkat perambatan yang teratur. Laju perambatan retak fatik diukur dengan konstanta Paris (m), yang menunjukkan seberapa cepat retak tersebut merambat. Semakin besar konstanta Paris (m), semakin cepat pula laju perambatan retaknya. Persamaan Paris law dapat dilihat dalam persamaan 2.6.

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (2.6)$$

Dimana :

- $\frac{da}{dN}$: Laju perambatan retak (m/cycle)
 ΔK : faktor intensitas tegangan
 C, m : Konstanta material



Gambar 2.10 Tahap kegagalan fatik (Thao, 2021)

Ketika tegangan pada ujung retakan suatu struktur lebih besar dari kekuatan material maka terjadi perambatan retakan. Ketika retakan itu terjadi maka akan menghasilkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retakan. Hal itu pada akhirnya menyebabkan tegangan yang lebih besar.

Perambatan retak pada logam dikategorikan menjadi tiga area perambatan retak. Daerah I menunjukkan ambang kelelahan faktor intensitas beban siklis yang berubah-ubah, atau ΔK_{th} , dimana laju perambatan retak sangat kecil meskipun struktur diberi beban yang berubah-ubah. Di Daerah II, laju perambatan retak lebih tinggi daripada di Daerah I, dan di Daerah III, laju perambatan retak terjadi lebih signifikan daripada di Daerah I (Li et al., 2014).

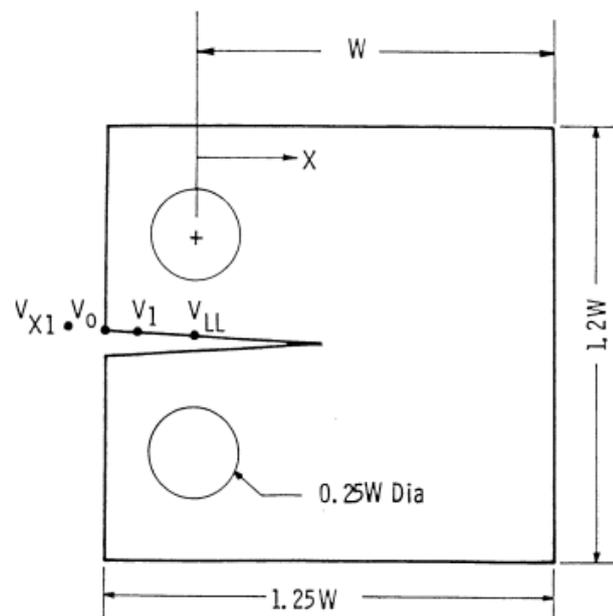
Amplitudo putaran beban konstan dari spesimen dengan lubang dan retak dalam dikenal sebagai perambatan retak. Untuk mendapatkan nilai perambatan rata-rata retak, pengambilan data diukur baik secara visual maupun numerik. Menurut Sanyoto (2008), perambatan retak rata-rata adalah fungsi dari faktor jangkauan intensitas tegangan ΔK . Persamaan analisis tekanan elastis linier digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik.

2.7 Compact Tension Spesimen (CT)

Metode pengukuran retak dengan COD gege umumnya dikenal dengan teknik *compliance*. Metode *compliance* ini menggunakan jenis spesimen model *compact tension* (CT). Pada pengujian FCG diberikan beban secara konstan dengan rasio beban tertentu menggunakan gelombang sinusoidal sejati dengan frekuensi 10 Hz. Panjang retak fatik pada spesimen uji diukur menggunakan *crack on opening displacement* (COD) dengan metode *compliance* (ASTM E647, 2000). Teknik *compliance* yang digunakan untuk mendeteksi perambatan retak subkritis telah banyak digunakan dalam pengujian mekanika perpatahan material. Hal tersebut didasari karena pada

pengukuran dua besaran yang paling mendasar dalam pengujian fatik yaitu beban yang diberikan dengan defleksi spesimen. Teknik ini juga sangat tepat untuk akuisisi data otomatis dan mudah digunakan.

Menurut standar ASTM E647 posisi COD yang ditentukan pada pengujian fatik dibagi menjadi empat lokasi. Skematik geometri spesimen CT seperti pada gambar 2.11. Pada gambar geometri spesimen CT terdapat beberapa simbol yang digunakan untuk menunjukkan kesesuaian yang dinormalisasi di beberapa lokasi penempatan COD pada spesimen.



Gambar 2.11 Geometri spesimen CT (ASTM E647, 2000)

Dimana simbol yang terdapat pada gambar geometri diatas memiliki arti sebagai berikut :

$(BEV_0)/P$ = Kesesuaian pada permukaan depan spesimen, lokasi yang ditetapkan adalah 0

$(BEV_1)/P$ = Kesesuaian pada 1576W dari garis beban ke arah permukaan depan spesimen, lokasi yang ditetapkan adalah 1

$(BEV_{LL})/P$ = Kepatuhan garis beban, lokasi yang ditetapkan adalah LL

$(BEV_{X1})/P$ = Kesesuaian pada jarak $345W$ dari garis beban ke arah retakan ujung, lokasi yang ditetapkan X_1

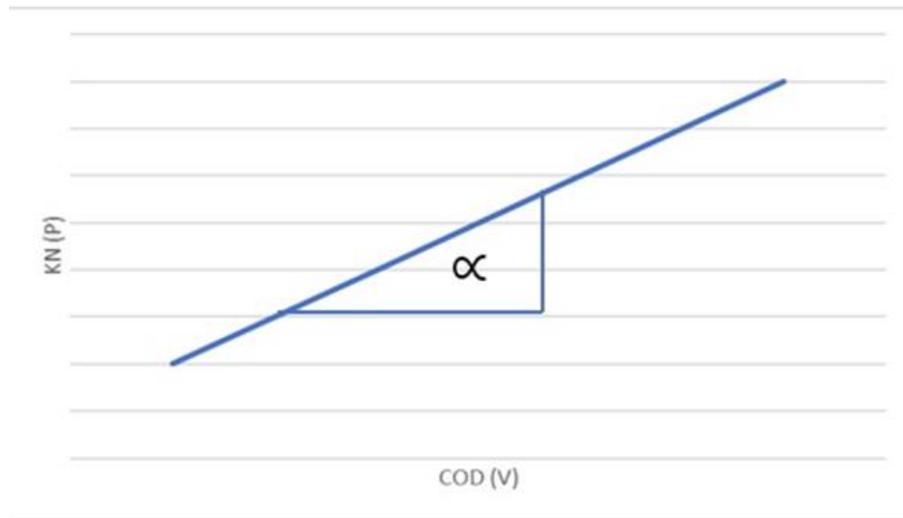
Dimana E merupakan modulus young, β ketebalan dari spesimen, V perpindahan, P beban, dan W merupakan lebar spesimen. Menurut Newman, kepatuhan yang dinormalisasi pada lokasi 0,1, LL dan 2 untuk panjang retak yang dipilih antara $a/w = 0,20$ dan $0,80$ nilai tersebut didapat dari tabel kesesuaian dan sumbu rotasi X_0/W sebagai fungsi perpanjangan retak untuk spesimen CT (Saxena et al, 1978).

Tabel 2.1 Nilai *compliance coefficient* (ASTM E647, 2000)

Meas.	X/W	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Location							
C(T) Spesimen							
V _{X1}	-0.345	1.0012	-4.9165	23.057	-323.91	1798.3	-3513.2
V ₀	-0.250	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6
V ₁	-0.1576	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3
V _{LL}	0	1.0002	-4.0632	11.242	-106.04	464.33	-650.68

Menurut sudut pandang LEFM atau *linear elastic fracture mechanics* dengan asumsi bahwa tidak adanya mekanisme disipasi energi inelastic yang terjadi kecuali yang terjadi pada ujung retak (Ortega et al, 2014). Ketangguhan retak kritis dapat dilihat sebagai laju pelepasan energi elastis (ERR) per unit pada area baru yang tercipta. Pada kasus spesimen CT Panjang retak dinormalisasi sebagai (ASTM E647, 2000):

$$\frac{\alpha}{w} = 1.0010 - 4.6695U + 18.460U_x^2 - 236.821UU_x^3 + 1214.9U_x^4 - 2143.61U_x^5 \quad (2.7)$$



Gambar 2.12 Kurva hubungan COD dengan beban

Gambar 2.12 merupakan kurva yang menggambarkan hubungan antara COD dengan beban pada pengujian perambatan retak fatik. Di mana harga α merupakan slope yang dijelaskan dalam persamaan $\alpha = \frac{1}{slope} = \frac{1}{P/V}$ maka $C = \frac{V}{P}$ dan nilai U diperoleh dari persamaan :

$$U_x = 1 / \left[1 + (BEV/P)^2 \right] \quad (2.8)$$

Dimana :

- V : Perpindahan antar titik pengukuran
- E : Modulus young
- B : Tebal spesimen
- P : Beban

2.8 *Stress Intensity Faktor* (ΔK)

Stress Intensity Faktor (SIF) merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk melakukan analisis keretakan, menunjukkan tegangan yang terjadi pada ujung retakan. *Stress Intensity Faktor* umum digunakan untuk parameter desain yang dapat digunakan dalam, menentukan umur sisa sebuah struktur yang mengalami kerusakan karena kelelahan. Dengan adanya SIF, nantinya juga dapat menentukan tingkat kelelahan perambatan ulang. *Stress Intensity Faktor* (SIF) digunakan untuk melihat medan tegangan di depan ujung retak. SIF adalah perhitungan numerik yang berhubungan dengan beban dan ukuran cacat pada geometri tertentu (Lin & Smith, 1999). Prinsip dasar mekanik retak adalah medan tegangan di depan ujung retak sebuah spesimen atau komponen struktur dapat dijelaskan dengan satu parameter, tekanan intensitas.

Stress Intensity Faktor atau faktor intensitas tegangan, adalah parameter yang sangat penting untuk diketahui. Parameter ini digunakan untuk menentukan apakah konfigurasi yang retak pada komponen dapat merambat dengan mudah atau tidak. Retak akan lebih mudah merambat seiring dengan nilai harga K. faktor geometri mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap faktor intensitas tegangan.

Parameter faktor intensitas tegangan memengaruhi sebagian besar distribusi tegangan di daerah ujung retak. Nilai K, parameter perambatan retak ujung retak, dipengaruhi oleh hubungan tegangan antara kedua sisi lubang dan tegangan di ujung retak. Nilai K yang lebih rendah menunjukkan bahwa laju perambatan retak juga lebih rendah (Purnowidodo, 2010).

Faktor intensitas tegangan dapat ditentukan dari Panjang retak fatik (a) dalam setiap rentang beban (ΔP). Hal tersebut akhirnya mengakibatkan retak menjalar didalam struktur material. Faktor intensitas tegangan terhadap Panjang retak dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini (ASTM E647, 2000):

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha + 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2.9)$$

Dimana :

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

ΔP : Rentang beban

B : Tebal spesimen

W : Lebar spesimen

Rentang faktor intensitas tegangan pada ujung retak dapat didefinisikan sebagai $\Delta K = K_{maks} - K_{min}$. Dalam persamaan 2.9 di atas diasumsikan bahwa spesimen uji yang digunakan bersifat linear elastis, isotropic dan homogen. Persamaan 2.9 tersebut tidak memperhitungkan potensi pengaruh tegangan sisa atau penutupan retak pada nilai ΔK yang dihitung.

2.9 Metode *Polynomial Incremental*

Setelah didapatkan nilai perbandingan panjang retak dengan jumlah siklus, kemudian laju perambatan retak fatik (da/dN) dicari dengan menggunakan metode *Incremental Polynomial* (ASTM E647, 2000). Metode ini digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik yang terjadi pada spesimen uji. Metode *Incremental Polynomial* ini digunakan dalam perhitungan da/dN yang didalamnya meliputi pas polynomial urutan kedua ke rangkaian $(2n+1)$ titik data yang tersusun berurutan, biasanya n memiliki nilai sebesar 1,2,3,4 atau 5 (ASTM E647, 2000).

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right)^2 \quad (2.10)$$

Dimana,

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C_i}{C_2} \right) \leq +1 \quad (2.11)$$

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

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\alpha_i} = \frac{b_i}{c_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C_i}{C_2^2}\right) \quad (2.13)$$

Analisis data hasil pengujian retak fatik dihitung dengan metode polynomial incremental menggunakan program computer *quick basic 467*. Program ini menggunakan K-kalibrasi spesimen untuk geometri C(T) spesimen. Hasil keluaran yang dihasilkan dari program ini meliputi informasi mengenai spesimen, variable pembebanan dan lingkungan dicantumkan dalam keluaran bersama dengan nilai tabulasi dari data mentah dan data yang diproses. A(Meas.) dan A(Reg.) masing-masing adalah nilai ukuran retakan total yang diperoleh dari pengukuran dan dari persamaan regresi yaitu persamaan (2.10). Kesesuaian persamaan ini ditunjukkan oleh koefisien korelasi berganda, MCC (MCC = 1 menunjukkan kesesuaian sempurna). Nilai ΔK dan da/dN diberikan dalam satuan yang sama dengan variabel masukan.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2023 sampai dengan bulan maret 2024. Penelitian pengujian pipa baja API 5L Grade B ini dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2 Bahan yang Digunakan

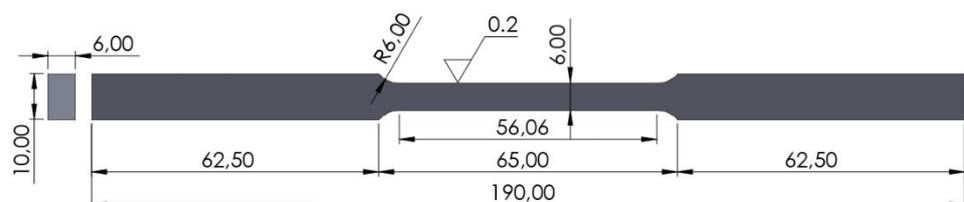
Bahan dan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pipa Baja API 5L Grade B

Pipa baja API 5L Grade B ini dari hasil potongan material pipa baja yang dipotong dengan sumbu -x dan -y.

2. Spesimen Uji Tarik

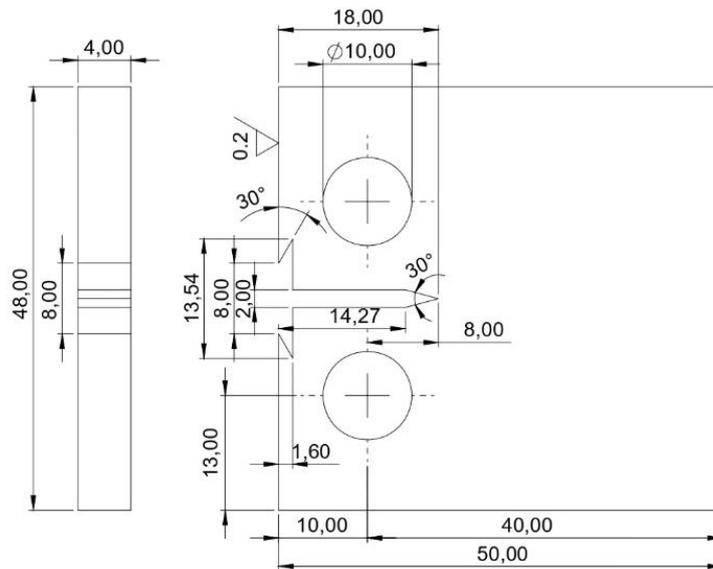
Spesimen yang digunakan untuk pengujian tarik disesuaikan dengan standar ASTM E8, dengan ukuran dan bentuk seperti pada gambar 3.1.



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

3. Spesimen Uji Perambatan Retak Fatik

Spesimen yang digunakan dalam pengujian retak fatik disesuaikan dengan standar ASTM E647. Dengan ukuran lebar spesimen 40,00 mm, tebal 4 mm, retak awal 8 mm, dengan sudut takik sebesar 30° .



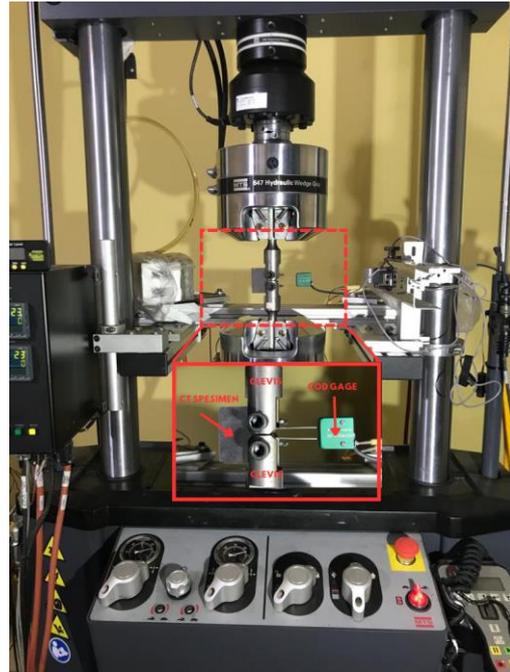
Gambar 3.2 spesimen uji fatik (ASTM E647, 2000)

3.3 Alat yang Digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mesin MTS Landmark 100 kN

Mesin MTS Landmark 100 kN digunakan dalam pengujian Tarik dan pengujian fatik pada spesimen. Mesin ini terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 3.3 Mesin MTS Landmark 100 kN

2. Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

Jangka sorong ini digunakan sebagai alat ukur Panjang spesimen uji sebelum pengujian maupun setelah pengujian dilakukan untuk mengetahui perubahan ukuran pada spesimen.



Gambar 3.4 Jangka Sorong

Table 3.1 Spesifikasi jangka sorong (*Vernier Caliper*)

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

3. *Clip on Displacement (COD) Gage*

Clip on Displacement (COD) Gage merupakan alat yang digunakan untuk mengukur variasi celah diantara takik pada spesimen saat pengujian fatik dilakukan, metode pengukuran Panjang retak COD ini menggunakan metode compliance. Alat ini terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



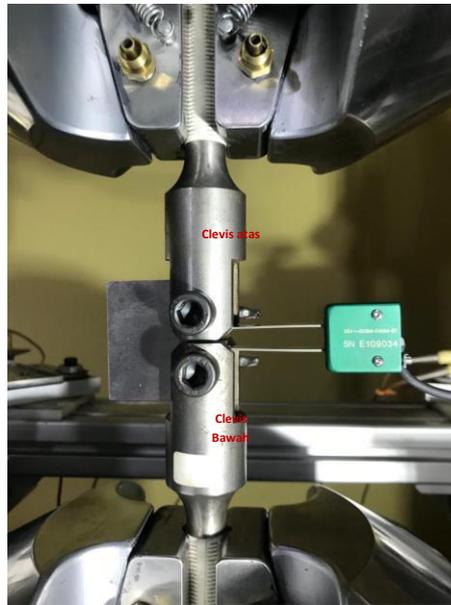
Gambar 3.5 *Clip on Displacement (COD) Gage*

Table 3.2 Spesifikasi *Clip on Displacement (COD) Gage*

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

4. Clevis

Clevis merupakan alat yang digunakan pada mesin MTS Landmark 100 kN untuk mencekam spesimen uji dalam pengujian perambatan retak fatik, alat ini terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 3.6 Clevis

3.4 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini dibagi menjadi beberapa langkah yaitu :

3.4.1 Persiapan Spesimen Uji

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa baja type API 5L Grade B.

3.4.2 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan spesimen pengujian dilakukan dengan mengikuti standarisasi dimensi pengujian baja yaitu standar ASTM E8 untuk spesimen uji tarik statis dan ASTM E647 untuk spesimen uji fatik. Pembentukan spesimen dilakukan dengan proses permesinan *Vertical Machining Center (CNC Milling Machine)*. Pembentukan

spesimen uji dilakukan oleh PT. *Metalin'Go Technology Engineering, Manufacture and machinery* beralamat di Jalan Cilemehabang T1-6A RT/RW 08/09 Jayamukti, Jababeka 2, Cikarang Pusat.

3.4.3 Tahap Pengujian

a. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan terhadap spesimen untuk mengetahui nilai tegangan luluh (σ_y) pada baja. Berikut merupakan langkah yang dilakukan untuk melakukan pengujian tarik :

1. Menyiapkan spesimen uji yang sudah memenuhi standar ASTM E8.
2. Menghidupkan *chiller* serta *Hydraulic Power Unit* atau HPU.
3. Menghidupkan mesin MTS Landmark 100 kN.
4. Memilih program *controller 793B* lalu pilih manual *command*, klik *displacement mode*, dan naikkan *actuator* pada posisi nol.
5. Memasang spesimen uji pada *cross head grip* atas kemudian cekam spesimen.
6. Kemudian turunkan *cross head grip* sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam *grip* bawah.
7. Menekan manual *command* dan tekan *control mood* ke *force*.
8. Memilih *auto offset* untuk *force*, kemudian cekam *grip* bawah sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak mengalami perubahan.
9. Memasang *extensometer* pada spesimen dengan posisi *zero* pin kemudian tekan manual *offset* untuk *extensometer* dan *zero* pin dilepas dari *extensometer*.
10. Memilih program MTS *Test Suite* (MPE), pilih template untuk uji tarik statis.
11. Masukkan data spesimen meliputi Panjang, lebar dan tebal.
12. Masukkan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).

13. Setelah semua data sudah di input kemudian klik RUN.

b. Pengujian Perambatan Retak Fatik

Prosedur yang dilakukan dalam pengujian fatik ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen uji fatik sesuai dengan standar ASTM E647 pada baja.
2. Menghidupkan *Chiller* dengan menekan tombol merah terlebih dahulu kemudian tombol hijau pada *chiller* lalu buka katup salah satu pompa yang akan digunakan dan terakhir naikkan saklar.
3. Menghidupkan HPU (*Hydraulic Power Unit*) dengan menekan tombol on/off kemudian pada panel kontroler HPU klik *main display-set up-main controler*.
4. Menghidupkan mesin MTS Landmark kN100 dan temperature kontroler serta hidupkan juga lampu penerangan pada mesin.
5. Membuka Program *station manager* kemudian klik project lalu FCG kemudian pilih file *Pre-Crack 2022* dan *configuration file* tanpa *extenstometer* yaitu *Axial Basic* selanjutnya klik *open*.
6. Pada *station manager* klik cklist 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. Pilih HPU *power low* kemudian menunggu sampai lampu kuning pada tombol berhenti berkedip. Selanjutnya klik HPU *power high* dan tunggu beberapa detik selanjutnya lakukan hal yang sama pada HSM *power low* dan terakhir HSM *power high*.

9. Setelah posisi *actuator* terdeteksi pada *manual command* klik posisi *actuator* sedikit untuk membuka katup. Setelah posisi *actuator* aman terhadap *cross head grip* atas selanjutnya naikkan *actuator* ke posisi nol.
10. Mengubah *upper action* dari *disable* ke *interlock* pada *detector*.
11. Pada program *MTS Test Suite* pilih template untuk *fatigue crack growth testing*.
12. Memasang spesimen uji pada *cross head grip* atas kemudian spesimen di cekam.
13. Menurunkan *cross head* sampai ujung bawah spesimen masuk ke *grip* bawah.
14. Meluruskan *grip* bawah sesuai dengan posisi *grip* atas, kemudian pada *manual command*, klik *control mode* dan ganti *displacement* ke *force* dan *grip* bagian bawah dicekam.
15. Mereset pada *interlock 1 station manager* dan *unchecklist enable manual command* pada *manual command*.
16. Pilih *new test run* pada software *MTS Test Suite*, dan mengatur *setup variables fatigue crack growth testing* yaitu dengan memasukkan data dengan memasukkan data tebal spesimen, *compliment koefisien* C₀-C₅ sesuai standar ASTM E467 dengan posisi COD pada V₀, F_{max} dan F_{min}, total *cycles* 1000000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament*, dan beban uji fatik menggunakan kontrol beban yang sudah ditentukan dari nilai *yield strength* yang diperoleh dari hasil uji tarik.
17. Pada *fatigue crack growth testing* pilih *FCG pre crack* parameter kemudian masukan *FCG end level 1* yaitu beban maksimal 3,566 dan *end level 2* yaitu beban min 0,357.
18. Pada *precrack test* delta K masukan nilai *crack lenght deck* 9,2 mm.

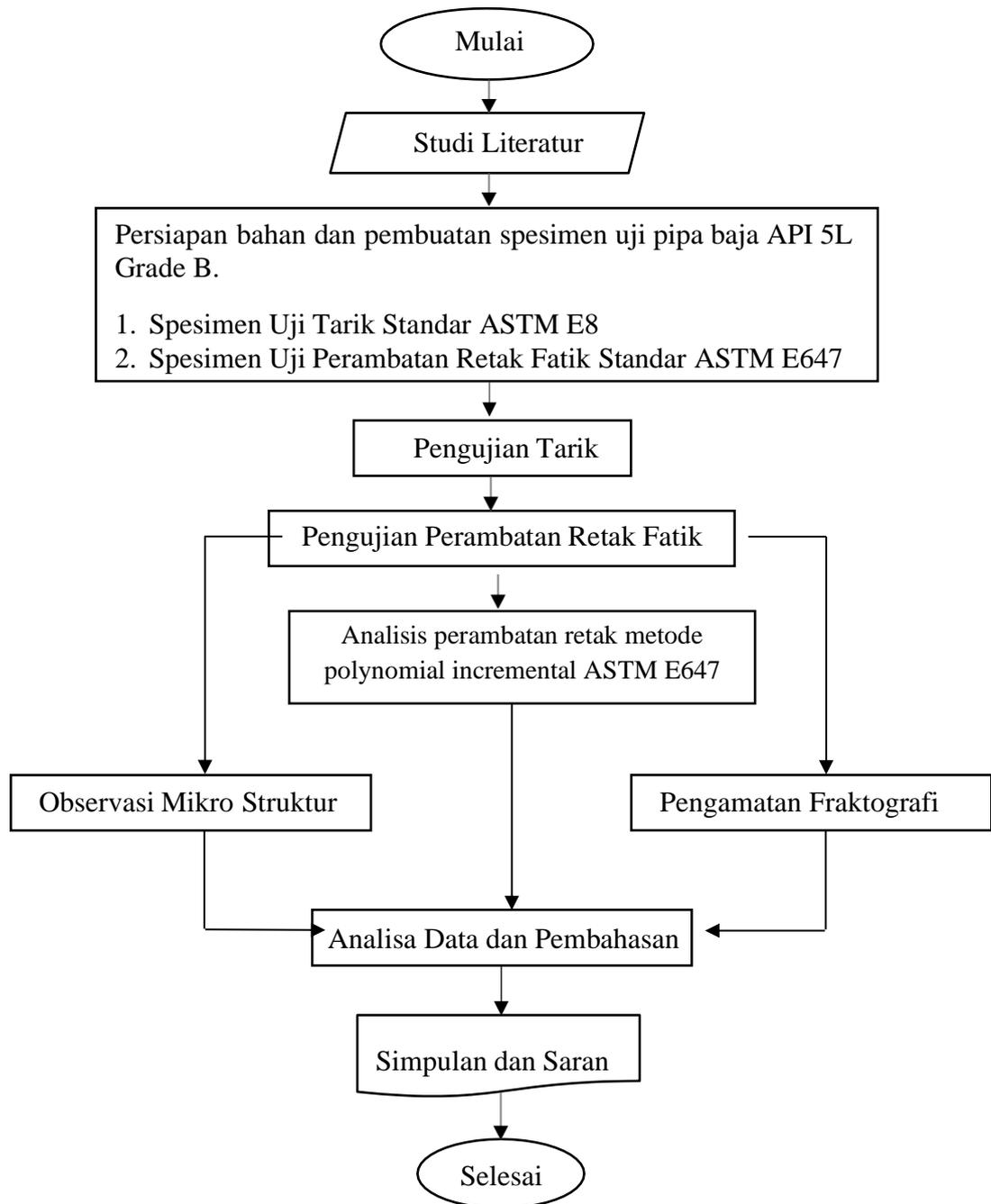
19. Langkah terakhir klik OK dan *Run Test* untuk pengujian FCG pre crack.
20. Kemudian tunggu sampai FCG *crack lenght* nya mencapai nilai yang ditentukan yaitu 9,2 mm.
21. Setelah *test precrack* dilakukan dan patahan sudah mencapai retak precrack yang ditentukan kemudian mulai FCG test.
22. Klik *new test run* pada software *MTS Test Suite*, dan mengatur *set up variables fatigue crack growth testing* yaitu memasukan data tebal spesimen, *compliment koefisien C₀-C₅* sesuai standar ASTM E467 pada posisi COD V_0 , F_{max} dan F_{min} , total cycles 1000000, frekuensi 10 Hz, *cycle increament*, *final crack lenght* dan beban uji fatik menggunakan control beban yang sudah ditentukan dari nilai *yield strength* yang diperoleh dari hasil uji tarik.
23. Kemudian klik OK dan *Run Test*.

c. Analisa Mikrostruktur dan SEM Fraktografi

Analisa mikrostruktur dan pengamatan fraktografi ini dilakukan untuk mengetahui sifat struktur mikro dari material yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, fraktografi fasa-fasa dan SEM dilakukan untuk mengidentifikasi jenis patahan yang terjadi pada spesimen uji.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut :



Gambar 3.7 Kerangka alur penelitian

IV. PENUTUP

5.1 Simpulan

Adapun simpulan dari hasil penelitian perambatan retak fatik Pipa Baja API 5L Grade B adalah sebagai berikut :

1. Pengamatan perambatan retak pada material pipa baja API 5L Grade B ini dilakukan tanpa proses perlakuan panas (*non heat treatment*) dan tanpa perlakuan permukaan pada material. Laju perambatan retak terjadi secara cepat sampai mencapai batas patah statis sampai pada siklus 96.443 dengan panjang retak sebesar 25.5211 mm sebelum mengalami patah.
2. Laju perambatan retak dianalisis menggunakan metode polynomial incremental dan menggunakan pendekatan persamaan paris law sehingga didapatkan hasil sebagai berikut :
$$da/dN = 1.176 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.607}$$
3. Hasil observasi metalografi diketahui bahwa pipa baja API 5L-B tersusun atas fasa ferit (berwarna terang) dan fasa perlit (berwarna gelap) yang merupakan jenis mikrostruktur dari baja paduan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa tidak terjadi perubahan fasa karena suhu tinggi yang mendukung terjadinya patah lelah pada material atau *fatigue failure*.
4. SEM pada daerah patahan permukaan pipa baja API 5L-B menghasilkan pola patahan intergranular. Pada permukaan patahan terdapat striasi, retakan sekunder dan *voids*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, untuk mendukung penelitian selanjutnya maka penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan dengan variasi perlakuan panas atau perlakuan permukaan untuk mendapatkan data perbandingan hasil pengujian perambatan retak fatik dan struktur mikro dari material tersebut.
2. Pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan pengujian komposisi material untuk mengetahui informasi secara lengkap mengenai material yang di uji.
3. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat dilakukan variasi pengujian lain seperti pengujian kekerasan pada material agar dapat mengetahui informasi secara lengkap mengenai sifat mekanik dari pipa baja ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, Y. K., et al. (2015). "Analisa Laju Korosi pada pelat baja Karbon dengan Variasi ketebalan coating." *Jurnal Teknik ITS* 4(1): G1-G5.
- Ainnayah, R. A. (2022). "Pengaruh Austempering Baja AISI 4140 Terhadap Perambatan Retak Fatik". Skripsi Sarjana, Universitas Lampung.
- Allain, S. Y. P., Aoued, S., Poulon, A. Q., Goune, M., Danoi, F., Hell, J. P., Bouzat, M., Soler, M dan Geandier, G. 2018. In Situ Investigation of the Iron Carbide Precipitation Process in a Fe-C-Mn-Si Q&P Steel. *Metals*, Vol.11, No.7 , p.1087.
- ASTM E647. 2000. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", West Conshohocken.
- ASTM E8M. 2004. "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM International, West Conshohocken.
- Badaruddin, M. 2023. *Fatik Siklus Rendah dan Perambatan Retak Fatik*. Lampung: Deepublish.
- Budiman, H. (2016). Analisis pengujian tarik (tensile test) pada baja st37 dengan alat bantu ukur load cell. *J-ENSITEC*, 3(01).
- Branco, C. 1999. Fatigue performance of tungsten inert gas (TIG) and plasma welds in thin sections. *International Journal of Fatigue*, 21(6), 587–601.
- Guan, M dan Yu, H. (2013) A Comparison Between Ferrite-Pearlite and FerriteBainite Microstructures. *Material Science & Engineering A* 559, pp.875881.
- Haryadi, G. D. (2006). "Pengaruh suhu tempering terhadap kekerasan, kekuatan tarik dan struktur mikro pada baja K-460." *ROTASI* 8(2): 1-8.
- Hutabarat, U. (2005). Studi perambatan retak fatik pada pipa baja karbon rendah (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Kirono, S., et al. (2010). "Analisis Perubahan Dimensi Baja AISI 1045 Setelah Proses Perlakuan Panas (Heat Treatment)." *Sintek Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 4(2).

- Lan, L., Chang, Z and Fan, P. 2018. Exploring the Different in Bainite Transformation with Varying the Prior Austenite Grain Size in Low Carbon Steel. *Metals*, Vol.8, No.12, p.988.
- Li, S., Kang, Y., & Kuang, S. 2014. Effects Of Microstructure On Fatigue Crack Growth Behavior In Cold-Rolled Dual Phase Steels. *Materials Science And Engineering: A*, 612, 153–161.
- Mulyono, P. R. (2017). Perancangan Sistem Proteksi Katodik Anoda Tumbal Pada Pipa Baja API 5L GRADE B Dengan Variasi Jumlah Coating Yang Dipasang Di Dalam Tanah. Surabaya. Skripsi: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ortega, A., Maimí, P., González, E. V., & Ripoll, L. (2014). Compact tension spesimen for orthotropic materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 63, 85-93.
- Purnowidodo, A. (2010). Evaluasi Faktor Intensitas Tegangan pada Ujung Retak dengan Lubang Penghambur Rambut Petak. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 1(1), 1-7.
- Salindeho, R. D., Soukotta, J., & Poeng, R. (2013). Pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material. *JURNAL POROS TEKNIK MESIN UNSRAT*, 2(2).
- Sanyoto, B. L dan Berata, W. 2008. Laju Perambatan Retak Plat Alumunium 2024 T3 Dengan Beban Fatigue Unaksial Pada Rasio Dan Jarak Diameter Lubang Berbeda. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM*, Vol.2, No.2, Hal.82-91.
- Sardi, V. B., Jokosisworo, S., & Yudo, H. (2018). Pengaruh normalizing dengan variasi waktu penahanan panas (Holding Time) baja ST 46 terhadap uji kekerasan, uji tarik, dan uji mikrografi. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1).
- Saxena, A., & Hudak, S. J. (1978). Review and extension of compliance information for common crack growth spesimens. *International Journal of Fracture*, 14, 453-468.
- Sudali, D. A. and P. T. Iswanto (2022). "Studi komparasi pengaruh penggunaan variasi konsentrasi inhibitor amine oxide terhadap laju korosi pipa baja API 5L grade B di lingkungan fluida drain line." *Jurnal Teknik Mesin Indonesia* 17(2): 102-106.
- Suryo, S. H. (2010). "Laju Korosi dan Kekerasan Pipa Baja API 5L X65 Setelah Normalizing." *ROTASI* 12(2): 25-30.
- Stoychev, S., & Kujawski, D. 2008. Crack-Tip Stresses And Their Effect On Stress Intensity Faktor For Crack Propagation. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(8), 2469–2479.

- Thao, B. P. 2021. Microstructural Faktors Influencing Fatigue Crack Growth Mechanism In Low-Carbon And High-Carbon Steels. (Thesis). Material Science, Nagaoka University of Technology, Japan.
- Wardoyo, J. T. (2005). "Metode peningkatan tegangan tarik dan kekerasan pada baja karbon rendah melalui baja fasa ganda." *Teknoin* **10**(3).
- Widyanto, S. A. Pengaruh Peregangan Terhadap Penurunan Laju Perambatan Retak Material Al-2024 T3. *ROTASI*, 3(1), 39-43.
- Wijaya, R. N. (2022). Karakteristik Perambatan Retak Fatik Pada Baja Paduan AISI 4140.
- Xu, L., et al. (2018). Interpretation of the abnormal high-temperature flow behavior of Fe-Mn-Al duplex lightweight steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing.

