

**PENINGKATAN KEKUATAN MEKANIK DAN PERAMBATAN
RETAK FATIK BAJA MARTENSIT (9Cr18Mo) MELALUI PROSES
NOVEL QUENCHING TEMPERING**

(Tesis)

Oleh

Wildan Hartoto Putra

2325021002



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

Tesis ini membahas mengenai proses baru *quenching tempering* (NQT) yang dirancang untuk meningkatkan kekuatan mekanik serta ketahanan perambatan retak fatik pada baja *martensit* 9Cr18Mo. Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian eksperimen yang melibatkan pengujian mekanik dan karakterisasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik (OM), scanning electron microscope (SEM) diikuti analisis elemen logam dengan energy spectroscopy (EDS) dan analisis struktur kristal fasa logam dengan difraksi sinar-X (XRD).

Temuan penelitian menunjukkan bahwa perlakuan NQT berhasil mengubah struktur mikro baja dari *martensit* menjadi tempered *martensit* yang lebih stabil dan homogen, dengan terjadinya pembentukan presipitasi karbida sekunder. Kekuatan tarik baja yang telah diperlakukan NQT menunjukkan peningkatan yang signifikan, di mana nilai tegangan luluh mengalami kenaikan dari 528 MPa menjadi 1222 MPa dan tegangan maksimum dari 699 MPa meningkat menjadi 1677 MPa. Meskipun ada peningkatan yang mencolok dalam hal kekuatan, terdapat penurunan dalam elongasi. Ketahanan perambatan retak fatik baja NQT menunjukkan penurunan dikarenakan struktur *martensit* yang keras dan getas. Panjang retak yang terbentuk pada baja NQT sebesar 11,209 mm dengan jumlah siklus 75,263. Sedangkan baja tanpa perlakuan menghasilkan panjang retak 18,179 mm dengan jumlah siklus 290936 .

Analisis menggunakan mikroskop menunjukkan distribusi unsur yang lebih baik dan pembentukan struktur yang lebih konsisten setelah perlakuan, yang berkontribusi pada mekanisme pengerasan presipitasi. Penelitian ini menggarisbawahi bahwa proses *novel quenching tempering* dapat secara efektif meningkatkan sifat mekanik baja *martensit* 9Cr18Mo, tetapi juga memperlihatkan tantangan dalam mencapai keseimbangan antara kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap retak fatik.

Kata kunci: Baja *martensit*, 9Cr18Mo, *novel quenching tempering*, kekuatan mekanik, perambatan retak fatik, mikrostruktur.

ABSTRACT

This thesis discusses a new quenching tempering (NQT) process designed to improve the mechanical strength and fatigue crack propagation resistance of 9Cr18Mo martensitic steel. The research was carried out through a series of experiments involving mechanical testing and microstructural characterization using optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) followed by metallic element analysis by energy spectroscopy (EDS) and metallic phase structure analysis by X-ray diffraction (XRD).

The findings showed that the NQT treatment successfully changed the microstructure of the steel from fresh martensite to a more stable and homogeneous tempered martensite, with the formation of secondary carbide precipitation. The tensile strength of the NQT-treated steel showed a significant improvement, with the yield stress value increasing from 528 MPa to 1222 MPa and the maximum stress increasing from 699 MPa to 1677 MPa. While there was a marked increase in strength, there was a decrease in elongation. The fatigue crack propagation resistance of NQT steel showed a decrease due to the hard and brittle martensitic structure. The crack length formed in NQT steel was 11,209 mm with 75,263 cycles. While the untreated steel produced a crack length of 18,179 mm with a number of cycles of 290936.

Analysis using microscopy showed better elemental distribution and more consistent structure formation after treatment, which contributed to the precipitation hardening mechanism. This study underscores that the novel quenching tempering process can effectively improve the mechanical properties of 9Cr18Mo martensitic steel, but also exposes the challenge of achieving a balance between high strength and resistance to fatigue cracking.

Keywords: Martensitic steel, 9Cr18Mo, novel quenching tempering, mechanical strength, fatigue crack propagation, microstructure.

**PENINGKATAN KEKUATAN MEKANIK DAN PERAMBATAN
RETAK FATIK BAJA MARTENSIT (9Cr18Mo) MELALUI
PROSES NOVEL QUENCHING TEMPERING**

Oleh

Wildan Hartoto Putra

Tesis

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

Pada

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



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

Judul Tesis : **PENINGKATAN KEKUATAN MEKANIK DAN PERAMBATAN RETAK FATIK BAJA MARTENSIT (9CR18MO) MELALUI PROSES NOVEL QUENCHING TEMPERING**

Nama Mahasiswa : **Wildan Hartoto Putra**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2325021002**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2

A handwritten signature in black ink, likely belonging to Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.

Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197212111998031002

A handwritten signature in black ink, likely belonging to Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T.

Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T.
NIP. 195704111986101

MENGETAHUI

Ketua Program Studi S2 Teknik Mesin

A handwritten signature in black ink, likely belonging to Dr. Harmen, S.T., M.T.

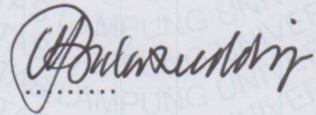
Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP.196906202000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

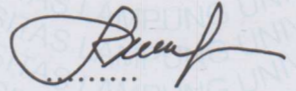
Ketua Penguji

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



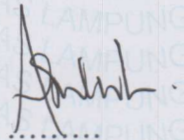
Anggota Penguji

: Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T.



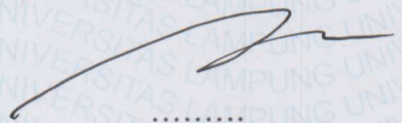
Penguji Utama I

: Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.



Penguji Utama II

: Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.



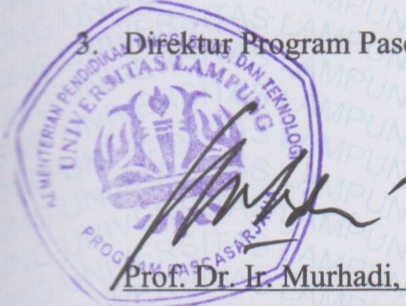
2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



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

NIP. 1964032619890219001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 4 Desember 2025

PERNYATAAN ORISINILITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (Magister) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No 20 Tahun 20010 Pasal 25 Ayat 2 dan Pasal 70)

Bandar Lampung, 4 Desember 2025

Yang Membuat



Wildan Hartoto Putra
NPM 2325021002

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Metro pada tanggal 13 November 1995, yang merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Tri Hartoto dan Ibu Sri Amanti. Penulis memulai pendidikan pertama di Sekolah Dasar (SD) di SD Muhammadiyah Metro dan menyelesaikannya pada tahun 2008, lalu melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Kartikatama Metro dan menyelesaikannya pada tahun 2011. Kemudian Penulis melanjutkan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 5 Metro dan menyelesaikannya pada tahun 2014. Kemudian penulis melanjutkan kuliah di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan menyelesaikan pada tahun 2021.

Selanjutnya pada tahun 2023 penulis tercatat sebagai Mahasiswa Pascasarjana Universitas Lampung pada Program Studi Magister Teknik Mesin yang diterima melalui jalur Seleksi Bersama pada tahun 2024. Penulis melakukan penelitian untuk menyelesaikan Tesis dengan judul **“Peningkatan Kekuatan Mekanik Dan Perambatan Retak Fatik Baja Martensit (9Cr18Mo) Melalui Proses Novel Quenching Tempering”**.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah penulis ucapkan kehadiran ALLAH SWT, karena atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkanNya, penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Tesis dengan mempersembahkan judul “ Peningkatan Kekuatan Mekanik dan Perambatan Retak Fatik Baja *Martensit* (9Cr18Mo) Melalui Proses *Novel Quenching Tempering*” dengan sebaik-baiknya, sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Magister Teknik.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih atas semua bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak, untuk itu dengan segala ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih antara lain kepada:

1. Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T, Ph.D. selaku dosen pembimbing utama tesis ini, yang telah memberikan waktu, arahan, semangat, serta motivasi bagi penulis.
2. Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T. selaku dosen pembimbing kedua tesis ini, yang telah memberikan waktu, arahan bagi penulis.
3. Dr. Asnawi Lubis sebagai dosen pembahas Tesis yang memberikan kritik dan saran yang sangat bermanfaat bagi penulis.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. sebagai dosen pembahas Tesis yang memberikan kritik dan saran dan motivasi bagi penulis.
5. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu dan pembelajaran yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani masa studi diperkuliahan.
6. Staf akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu penulis, sehingga dapat menyelesaikan Tesis ini.
7. Ayah Drs.Tri Hartoto, M.Pd. dan Ibu Dra. Sri Amanti atas segala nasehat yang telah diberikan, atas semua kasih sayang yang tulus, atas segala pengorbanan dan perjuangan untuk memberikan pendidikan yang terbaik untuk anaknya, serta do'a yang tulus untuk mendo'akan anaknya.

8. Adikku Daffa Hartoto Putra S.Ds. yang telah banyak memberi bantuan dan saran.
9. Seluruh keluarga Ayah dan Ibu yang telah memberi dukungan dan motivasi terutama mbak rosida rahmawati yang telah menyarankan untuk melanjutkan studi magister dan Muhammad abdilla yang telah memberikan pelukan-pelukan hangat.
10. Seluruh rekan-rekan magister Teknik Mesin angkatan 2023 Universitas Lampung.
11. Dan untuk seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025
Penulis,

Wildan Hartoto Putra
NPM. 2325021002

MOTTO

“Apa yang kamu lakukan sekarang pasti akan dilakukan anakmu pada suatu saat nanti, jadi berpikirlah sebelum kamu melakukan sesuatu” -Tri Hartoto-

“Tidak ada akhir yang menyedihkan bagi mereka yang yakin kepada ALLAH”

-Ustadz Adi Hidayat-

“Perjuanganmu berhasil bukan karena perjuanganmu, tetapi karena doa ibumu didengar ALLAH”

“Coba tulis ulang lagi yang sejatinya kau cari, maka sudahilah sedihmu yang belum sudah, segera mulailah syukurmu yang pasti indah. Berbahagialah”

-FSTVLST-

“Setiap langkah yang ku ambil berjanji menolak mati, aku pantang banting stir aku belajar sampai mahir” -Muria Mahardika-

“Tidak ada satu orangpun yang perlu kita cemburui di zaman yang rusak ini”

-K3bi-

“Now i`m saying BISMILLAH, kita mulai lagilah” -Basboi-

PERSEMBAHAN

Alhamdullilahirabbil'alamin, dengan penuh rasa
syukur kepada ALLAH SWT, Karya ini

Dipersembahkan

kepada:

Kedua Orang Tua

Bapak Tri Hartoto

Dan

Ibu Sri Amanti

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan
demi kesuksesan puteranya sehingga mampu menyelesaikan
pendidikan di tingkat Universitas sebagai Magister Teknik
Mesin

Terimakasih atas segala dukungan motivasi serta masukan dan
saran yang telah diberikan sehingga dapat terselesaikannya
Tesis ini

Seluruh Saudara

Terimakasih telah memberi support agar penulis melanjutkan
magister

Seluruh Teman-Temanku

Terimakasih atas segala dukungan yang telah
diberikan

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahilahirabbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Karunia-Nya dan pertolongannya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tesis ini. Shalawat serta salam semoga senantiasa terlimpah pada Nabi Muhammad SAW, kepada keluarganya, para sahabatnya, serta umatnya hingga akhir zaman, amin. Penyusunan Tesis ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung. Dengan judul “Peningkatan Kekuatan Mekanik dan Perambatan Retak Fatik Baja *Martensit* (9Cr18Mo) Melalui Proses *Novel Quenching Tempering*”.

Selama penelitian dan penulisan Tesis ini banyak sekali hambatan yang penulis alami, namun berkat bantuan, dorongan serta bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya Tesis ini dapat diselesaikan.

Penulis beranggapan bahwa Tesis ini merupakan karya terbaik yang dapat penulis persembahkan. Tetapi penulis menyadari bahwa tidak tertutup kemungkinan di dalamnya terdapat kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi parapembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025

Wildan Hartoto Putra

NPM. 2325021002

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
MENGESAHKAN.....	v
PERNYATAAN ORISINILITAS.....	vi
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	vii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	viii
MOTTO	x
PERSEMBAHAN.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II LANDASAN TEORI	7
2.1 Baja Martensit 9Cr18Mo.....	7
2.2 Sifat Mekanik Baja	8
2.3 Struktur Micro Baja.....	9
2.4 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatent</i>).....	14
2.5 Diagram Fasa Fe –Fe ₃ C	16
2.6 Sub Zero	17
2.7 Uji Tarik	18
2.8 Perambatan retak	20
2.9 Fatik.....	26
2.10 Fatik Siklus.....	27
2.11 X-RD	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Tempat Penelitian.....	29
3.2 Alat	30
3.3 Bahan.....	35
3.4 Prosedur Pengujian.....	38
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	50
4.1 Pengamatan Struktur Mikro	50
4.2 Hasil dan Pembahasan Uji Kekerasan.....	61
4.3 Hasil dan Pembahasan Uji Tarik	64
4.4 Hasil dan Pembahasan Uji Perambatan Retak Fatik	71
4.5 Hasil Uji Komposisi	76
4.6 SEM Fraktografi Uji Tarik	78
4.7 SEM Fraktografi Perambatan retak Fatik.....	83

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	90
5.1 Kesimpulan.....	90
5.2 Saran.....	91
DAFTAR PUSTAKA	92
LAMPIRAN.....	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur mikro ferrite	10
Gambar 2.2 Struktur mikro austenite	11
Gambar 2.3 Struktur mikro cementite	11
Gambar 2.4 Struktur mikro pada fasa pearlit	12
Gambar 2.5 Struktur mikro bainit	13
Gambar 2.6 Struktur mikro pada fasa martensite	13
Gambar 2.7 Diagram fasa Fe –Fe ₃ C	16
Gambar 2.8 Grafik uji tarik	18
Gambar 2.9 Kurva penambahan retak fatik	21
Gambar 2.10 Komponen tegangan	22
Gambar 2.11 Nilai K _I untuk macam geometri retak	23
Gambar 2.12 Modus pergeseran permukaan retak	24
Gambar 2.13 Skematik laju pertumbuhan retak	24
Gambar 2.14 Beban fatik pada perambatan retak	25
Gambar 2.15 Difraksi sinar X pada kristal	28
Gambar 3.1 MTS leandmark 100 kN	30
Gambar 3.2 Clip Gauge on Displacement (COD)	31
Gambar 3.3 Clevis	31
Gambar 3.4 Axial extensometer	32
Gambar 3.5 Mesin wire cutting HE-SV50-W34	32
Gambar 3.6 Jangka sorong	33
Gambar 3.7 Mesin ultrasonic	33
Gambar 3.8 Tiner	34
Gambar 3.9 Aquades	34
Gambar 3.10 Amplas	35
Gambar 3.11 Lakban kertas	35
Gambar 3.12 Baja matensit 9Cr18Mo tanpa perlakuan	36
Gambar 3.13 Baja matensit 9Cr18Mo novel quenching tempering	36
Gambar 3.14 Spesimen uji tarik (A) tanpa perlakuan (B) perlakuan novel quenching tempering	37
Gambar 3.15 Spesimen uji perambatan retak fatik (A) tanpa perlakuan (B) perlakuan novel quenching tempering	38
Gambar 3.16 Proses novel quenching tempering	39
Gambar 3.17 Diagram alir penelitian	49
Gambar 4.1 Struktur mikro baja 9Cr18Mo (A) baja tanpa perlakuan (B) baja quenching tempering	50
Gambar 4.2 Hasil EDS spesimen baja 9Cr18Mo tanpa perlakuan	53
Gambar 4.3 Hasil EDS spesimen baja 9Cr18Mo <i>quenching tempering</i>	54
Gambar 4.4 Hasil XRD baja 9Ce18Mo	57
Gambar 4.5 Jalur retak	59
Gambar 4.6 Perbandingan hasil uji kekerasan baja 9Cr18Mo	61
Gambar 4.7 Spesimen uji tarik (A) tanpa perlakuan (B) perlakuan novel quenching tempering	64
Gambar 4.8 Grafik engineering stress dengan engineering strain Baja 9Cr18Mo 65	

Gambar 4.9 Perbandingan uji tarik baja 9Cr18Mo tanpa perlakuan dan quenching tempering	68
Gambar 4.10 Grafik hubungan strain hardening rate dengan true strain	69
Gambar 4.12 Spesimen uji fatik (A) tanpa perlakuan (B) perlakuan novel quenching tempering	71
Gambar 4.13 Grafik hubungan panjang retak dengan siklus	72
Gambar 4.14 Grafik hubungan ΔK dengan da/dN	74
Gambar 4.15 Hasil pengamatan fraktografi specimen baja 9Cr18Mo uji tarik (A) baja tanpa perlakuan (B) baja quenching tempering.....	78
Gambar 4.16 Hasil EDS specimen baja 9Cr18Mo uji tarik tanpa perlakuan.....	80
Gambar 4.17 Hasil EDS specimen baja 9Cr18Mo uji tarik baja quenching tempering.....	81
Gambar 4.18 (A,C,E) SEM permukaan patah specimen perambatan retak fatik tanpa perlakuan dengan panjang retak 0.5, 2.5, 8 mm dari takik (B,D,F) dan SEM permukaan patah specimen perambatan retak fatik quenching tempering dengan panjang retak 0.5, 2.5, 4 mm dari takik	84
Gambar 4.19 Hasil EDS specimen baja 9Cr18Mo perambatan retak fatik tanpa perlakuan	86
Gambar 4.20 Hasil EDS specimen baja 9Cr18Mo perambatan retak fatik baja quenching tempering	87

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil EDS baja 9Cr18Mo.....	55
Tabel 4.2 Hasil uji kekerasan baja 9Cr18Mo	62
Tabel 4.3 Hasil uji tarik baja martensit 9Cr18Mo	66
Tabel 4.4 Hasil uji Komposisi baja 9Cr18Mo	76
Tabel 4.5 Hasil EDS baja 9Cr18Mo uji tarik.....	82
Tabel 4.6 Hasil EDS baja 9Cr18Mo perambatan retak fatik	88

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Baja *martensit* 9Cr18Mo, dengan kombinasi kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi yang baik, material ini sering digunakan sebagai material pilihan dalam berbagai aplikasi industri. Industri yang membutuhkan material yang memiliki kekuatan yang baik adalah pembangkit listrik, petrokimia, dan dirgantara (Escrivà-Cerdán et al., 2019). Sifat-sifat baja *martensit* 9Cr18Mo yang baik ini menjadikannya sangat cocok untuk komponen yang beroperasi di lingkungan yang membutuhkan kekuatan yang baik, di mana material sering mengalami beban siklik dan kondisi korosif. Meskipun memiliki sifat yang baik, baja ini masih rentan terhadap inisiasi dan perambatan retak fatik di bawah beban berulang, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan komponen. Wang et al., (2019)

Perambatan retak fatik, adalah fenomena di mana retakan kecil secara bertahap tumbuh di bawah beban berulang, merupakan perhatian utama dalam aplikasi yang melibatkan beban siklik. Kegagalan akibat perambatan retak fatik tidak hanya menimbulkan risiko keselamatan yang signifikan tetapi juga mengakibatkan kerugian ekonomi yang besar karena *downtime* yang tidak direncanakan. Oleh karena itu, meningkatkan ketahanan perambatan retak fatik baja 9Cr18Mo sangat penting untuk memastikan keandalan dan memperlama umur pakai komponen.

Untuk meningkatkan kekuatan baja 9Cr18Mo, berbagai metode telah dilakukan. Wang et al., (2019) melakukan perlakuan panas konvensional melibatkan *quenching* pada 1050°C diikuti tempering pada 200°C. Metode lain yang digunakan adalah thixoforging, di mana baja dipanaskan hingga kondisi semi-padat sekitar 1300°C, lalu ditempa.

Dibandingkan dengan perlakuan panas konvensional, thixoforging menghasilkan sifat mekanik dan ketahanan korosi yang lebih baik, terutama di bagian permukaan komponen. Fengbin et al., (2013) melakukan penelitian dengan perlakuan panas melalui dua tahap. Pertama, dilakukan perlakuan panas konvensional berupa *quenching tempering*. Kemudian, untuk meningkatkan sifat permukaan, dilakukan implantasi ion - baik nitrogen (N) maupun titanium (Ti). Proses implantasi ion ini dilakukan dengan 2×10^{17} ion/cm², energi plasma 60 keV, selama 2 jam pada suhu sekitar 80°C. Metode ini terbukti efektif dalam meningkatkan kekerasan nano dan ketahanan aus baja 9Cr18Mo. Khususnya, implantasi ion nitrogen menunjukkan peningkatan yang paling signifikan dibandingkan dengan sampel yang hanya melalui *quenching tempering*. Peningkatan sifat mekanik ini disebabkan oleh pembentukan fasa-fasa baru di permukaan baja, seperti larutan padat lewat jenuh nitrogen, nitrida logam, dan fasa keramik. Dong et al., (2018). Melakukan penelitian dengan perlakuan panas *vacuum carburization* dilakukan pada suhu 925°C selama 4 jam dalam kondisi vakum tinggi. Kemudian, baja yang sudah diimplantasi dengan ion ganda Ti dan N menggunakan implantor MEVVA pada suhu ruang. Proses implantasi ini menggunakan (2×10^{17} ion/cm²) dengan energi 45 kV. Kombinasi kedua proses ini menghasilkan lapisan permukaan yang mengandung fasa keramik TiN dan TiC berukuran nano, yang secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan (35% lebih tinggi) dan ketahanan korosi baja. Metode pengerasan gabungan ini terbukti lebih efektif dalam meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi dibandingkan dengan perlakuan panas konvensional.

Meskipun metode-metode tersebut telah menunjukkan hasil yang positif, masih terdapat beberapa keterbatasan. Proses *triple smelting* membutuhkan biaya yang tinggi dan tidak secara langsung meningkatkan sifat mekanik (He et al., 2018). Implantasi ion dan carburizing hanya meningkatkan sifat pada lapisan permukaan yang tipis, sementara kegagalan bearing sering terjadi pada daerah sub-permukaan (Dong et al., 2018).

Quenching tempering merupakan metode perlakuan panas yang umum digunakan untuk baja *martensit*. Namun, proses konvensional seringkali tidak dapat menghasilkan kombinasi kekuatan mekanik dan ketahanan fatik yang optimal untuk aplikasi bearing berkinerja tinggi. Oleh karena itu, pengembangan proses *novel quenching tempering* yang dioptimalkan khusus untuk baja 9Cr18Mo menjadi penting untuk diteliti.

Mengingat tuntutan industri dan potensi peningkatan performa yang ditawarkan oleh proses *quenching tempering* yang dimodifikasi, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan proses *novel quenching tempering* (NQT) yang secara khusus disesuaikan untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan perambatan retak fatik baja *martensit* 9Cr18Mo. Dengan menyelidiki secara sistematis pengaruh berbagai parameter proses pada mikrostruktur, sifat mekanik, dan perilaku perambatan retak fatik, penelitian ini berusaha untuk mencapai keseimbangan optimal antara kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan fatik.

Hasil yang diharapkan adalah pengembangan baja 9Cr18Mo dengan peningkatan kekuatan mekanik untuk menahan beban berat, ketangguhan yang cukup untuk mencegah patah getas, dan ketahanan perambatan retak fatik yang unggul untuk memperpanjang umur komponen. Peningkatan ini akan berkontribusi pada peningkatan keandalan, efisiensi, dan keselamatan di berbagai industri yang bergantung pada penggunaan baja 9Cr18Mo, seperti pembangkit listrik, petrokimia, dan dirgantara.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

- 1.2.1** Bagaimana pengaruh proses *novel quenching tempering* terhadap mikrostruktur baja *martensit* 9Cr18Mo terhadap kekuatan mekanik dan ketahanan perambatan retak fatik baja 9Cr18Mo?

- 1.2.2 Bagaimana dampak proses *novel quenching tempering* untuk mencapai sifat mekanik optimal antara kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan retak fatik pada baja 9Cr18Mo?
- 1.2.3 Bagaimana perbandingan performa (kekuatan mekanik dan ketahanan fatik) baja 9Cr18Mo yang diproses dengan metode *novel quenching tempering* (NQT) dibandingkan baja tanpa perlakuan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan:

- 1.3.1 Menganalisis pengaruh proses *novel quenching tempering* terhadap perubahan mikrostruktur baja *martensit* 9Cr18Mo.
- 1.3.2 Menginvestigasi hubungan antara mikrostruktur hasil proses *novel quenching tempering* dengan kekuatan mekanik dan ketahanan perambatan retak fatik baja 9Cr18Mo.
- 1.3.3 Mengevaluasi proses *novel quenching tempering* untuk mencapai keseimbangan terbaik antara kekerasan, dan ketahanan fatik pada baja 9Cr18Mo.
- 1.3.4 Membandingkan kekuatan mekanik dan ketahanan fatik baja 9Cr18Mo yang diproses dengan metode tanpa perlakuan dan NQT.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

- 1.4.1 Meningkatkan kekuatan dan umur pakai baja 9Cr18Mo dalam aplikasi industri.
- 1.4.2 Memberikan panduan praktis bagi industri manufaktur dalam mengoptimalkan proses perlakuan panas untuk meningkatkan kualitas produk.
- 1.4.3 Berpotensi mengurangi biaya produksi dan pemeliharaan melalui peningkatan ketahanan fatik.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- 1.5.1** Penelitian ini fokus pada baja *martensit* 9Cr18Mo dan tidak mencakup jenis baja *martensit* lainnya.
- 1.5.2** Proses *novel quenching tempering* yang diteliti terbatas pada variasi parameter suhu austenitisasi, laju pendinginan, suhu tempering, dan waktu penahanan.
- 1.5.3** Evaluasi kinerja terbatas pada pengujian laboratorium dan tidak mencakup uji lapangan jangka panjang.
- 1.5.4** Analisis mikrostruktur dilakukan menggunakan teknik mikroskop optik, SEM, dan EBSD, tanpa melibatkan teknik karakterisasi lanjutan seperti TEM in-situ.
- 1.5.5** Simulasi komputasional dibatasi pada pemodelan termodinamika dan kinetik transformasi fasa, tanpa melibatkan simulasi mekanika kontinum yang kompleks.
- 1.5.6** Aspek ekonomi dan analisis biaya produksi tidak termasuk dalam lingkup penelitian ini.
- 1.5.7** Penelitian ini berfokus pada industri dan tidak mencakup aplikasi lain dari baja 9Cr18Mo.

Laporan akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian ini.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian yang digunakan, serta pelaksanaan dan pengamatan penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil data penelitian dan pembahasan dari penelitian ini.

BAB V. KESIMPULAN

Bab ini menjelaskan kesimpulan yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan dari penelitian ini.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Baja Martensit 9Cr18Mo

Baja 9Cr18Mo adalah jenis baja tahan karat *martensitik* yang memiliki komposisi kimia unik, dirancang untuk memberikan kombinasi kekuatan tinggi dan ketahanan korosi yang baik. Berdasarkan penelitian Wang et al., (2019), komposisi kimia baja ini dapat diuraikan sebagai berikut: Karbon (C): 0,90% Karbon adalah elemen kunci dalam baja ini. Kandungan karbon yang tinggi memungkinkan pembentukan struktur *martensit* yang keras setelah proses *quenching* (pendinginan cepat). *Martensit* adalah struktur kristal yang terdistorsi, yang memberikan kekerasan dan kekuatan tinggi pada baja, Kromium (Cr): 16,1% Kromium adalah elemen utama yang memberikan sifat tahan karat pada baja ini. Kromium membentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan baja, yang melindunginya dari korosi, Molibdenum (Mo): 0,97% Molibdenum ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan korosi, terutama terhadap korosi sumuran (pitting corrosion). Selain itu, Mo juga meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja pada suhu tinggi, Silikon (Si): 0,47% Silikon meningkatkan kekuatan dan ketahanan oksidasi baja. Ini juga membantu dalam proses deoksidasi selama pembuatan baja, Mangan (Mn): 0,11% Mangan meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Ini juga membantu dalam proses deoksidasi dan desulfurisasi selama pembuatan baja, Fosfor (P): 0,018% dan Sulfur (S): 0,004% Fosfor dan sulfur umumnya dianggap sebagai pengotor dalam baja. Kadar yang rendah ini menunjukkan bahwa baja 9Cr18Mo adalah baja berkualitas tinggi, Nikel (Ni): 0,23% Nikel meningkatkan ketangguhan dan ketahanan korosi baja. Meskipun kadarnya relatif rendah dalam baja ini, nikel tetap berkontribusi pada sifat-sifat akhir baja, Besi (Fe): Sisanya Besi adalah elemen dasar dalam baja, membentuk matriks di mana elemen paduan lainnya terdispersi.

2.2 Sifat Mekanik Baja

Sifat mekanik suatu bahan adalah kemampuan bahan untuk menahan beban yang dikenakan padanya. Beban ini dapat berupa beban tarik, tekan, bengkok, geser, torsional, atau gabungan. Sifat mekanik yang paling penting meliputi:

- 3.2.1 Kekuatan (*strength*) adalah kemampuan suatu bahan untuk dibebani tanpa merusaknya. Ada banyak jenis kekuatan ini, tergantung pada beban kerja. Beban kerja tersebut dapat dilihat antara lain dari kekuatan tarik, geser, tekan, puntir, dan lentur.
- 3.2.2 Kekerasan (*hardness*) dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu bahan untuk menahan goresan, keausan, dan penetrasi. Sifat ini berkaitan erat dengan ketahanan aus (*wear resistance*). Kekerasan ini juga berkorelasi dengan kekuatan.
- 3.2.3 Kekakuan (*daktility*) menunjukkan kemampuan suatu material untuk menyerap tegangan setelah dihilangkan tanpa menyebabkan deformasi permanen. Elastisitas juga menunjukkan seberapa besar deformasi permanen yang akan terjadi. Dengan kata lain, elastisitas menunjukkan kemampuan suatu bahan untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah menerima beban yang menyebabkan deformasi.
- 3.2.4 Keuletan (*stiffness*) menunjukkan kemampuan suatu bahan untuk menyerap tegangan/beban tanpa menimbulkan deformasi atau defleksi. Dalam beberapa kasus, kekakuan lebih penting daripada kekuatan.

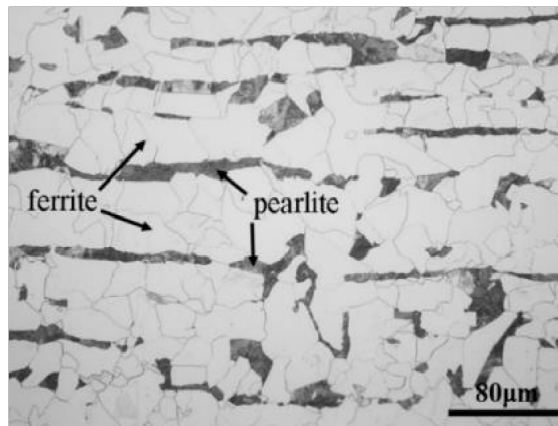
- 3.2.5** Plastisitas (*plasticity*) adalah kemampuan suatu material untuk mengalami serangkaian deformasi plastis permanen tanpa kerusakan. Properti ini sangat penting untuk bahan yang diproses menggunakan berbagai proses pembentukan seperti penempaan, penggulungan dan ekstrusi. Sifat ini sering disebut sebagai daktilitas.
- 3.2.6** Ketangguhan (*toughness*) merupakan kemampuan suatu bahan untuk menyerap sejumlah energi tertentu tanpa menyebabkan kerusakan. Ini juga dapat diberikan sebagai ukuran jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghancurkan benda kerja dalam kondisi tertentu. Sulit untuk mengukur karakteristik ini karena banyak faktor yang mempengaruhi karakteristik ini.
- 3.2.7** Kelelahan (*fatigue*) adalah kecenderungan logam untuk putus karena tegangan berulang (*repeated stress*), dan ukurannya masih jauh di bawah batas kekuatan elastis. Sebagian besar kerusakan komponen mesin disebabkan oleh kelelahan. Oleh karena itu, kelelahan merupakan sifat yang sangat penting, tetapi juga sulit diukur karena begitu banyak faktor yang mempengaruhinya.
- 3.2.8** Keretakan (*creep*) adalah kemampuan mulur ketika dikenai beban yang relatif konstan yang besarnya merupakan fungsi waktu (Saefuloh et al., 2018).

2.3 Struktur Micro Baja

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

2.3.1 Ferrite (α - Fe)

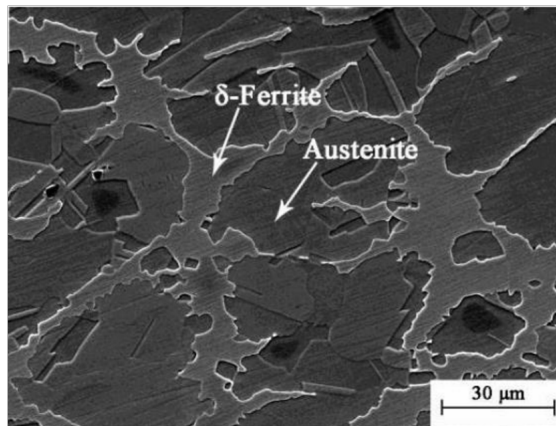
Fasa yang berwarna putih ini disebut juga dengan alpha (α) dan stabil di bawah temperatur 910°C. Daya larut karbon dalam *ferrite* rendah yaitu < 1 atom C per 1000 atom besi, hal ini disebabkan karena ruang antar atomnya kecil dan rapat sehingga daya tampung karbonnya pun terbatas. Pada temperatur ruang, kadar karbonnya sebesar 0,008 % sehingga dapat dianggap besi murni. Kadar karbon maksimum yang dimiliki *ferrite* sebesar 0,025 % pada temperatur 723 °C. Sifat yang dimiliki *ferrite* adalah lunak dan liat sehingga menghasilkan kekuatan tarik kurang dari 340 MPa dan bersifat ferromagnetik. Nilai kekerasan *ferrite* tidak lebih dari 90 HRB dan di atas temperatur 768°C.



Gambar 2.1 Struktur mikro ferrite (Guo et al., 2022)

2.3.2 Austenite (γ -Fe)

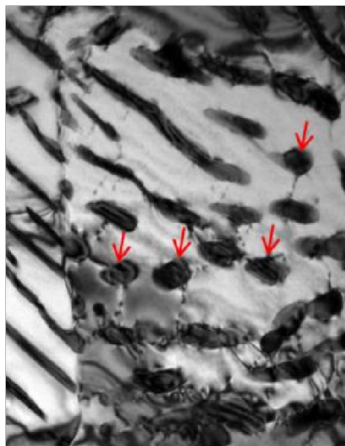
Austenite merupakan campuran dari besi (Fe) dan karbon (C) yang terbentuk pada saat proses pendinginan, namun pada pendinginan selanjutnya *austenite* berubah menjadi *ferrite*, *pearlite* dan *sementite*. Sifat yang dimiliki austenit adalah ketangguhan yang tinggi, lunak dan lentur dengan kadar karbon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



Gambar 2.2 Struktur mikro austenite (Xu et al., 2020)

2.3.3 *Cementite* (besi karbida)

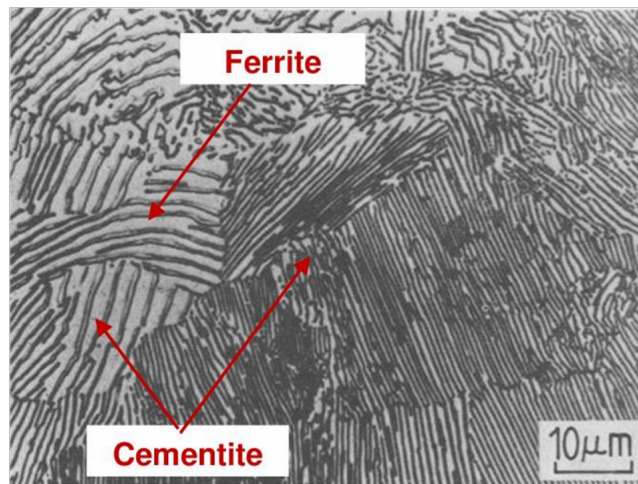
Paduan besi dimana kondisi karbon melebihi daya larut maka akan membentuk fasa kedua yang disebut dengan karbida besi atau *cementite*. Sifat dasar dari *cementite* sangat keras dengan nilai kekerasan 5-68 HRC, sehingga *cementite* dalam *ferrite* akan meningkatkan kekerasan baja. Fasa ini sangat rapuh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



Gambar 2.3 Struktur micro cementite (Xu et al., 2020)

2.3.4 *Pearlite*

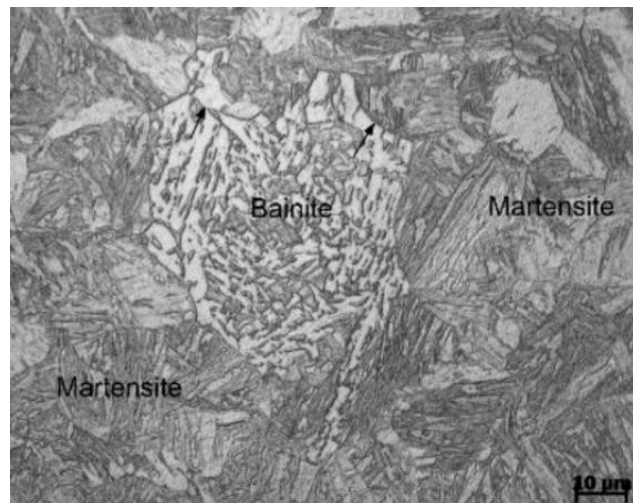
Fasa ini merupakan campuran mekanis dari dua fasa yaitu *ferrite* dengan kandungan karbon 0,025 % dan sementit dengan kandungan karbon 6,67 % dalam bentuk *lamellar* (lapisan) yang terletak rapat berselang seling bersebelahan. *Pearlit* terjadi pada temperatur di bawah 723°C dengan cara menguraikan *austenite* berkomposisi eutecid. Fasa ini memiliki sifat lebih keras dan kuat daripada *ferrite* dengan nilai kekerasan mencapai 10-30 HRC serta kekuatan tarik sekitar 120.000 psi, akan tetapi kurang liat dengan *elongation* sekitar 20 % dalam 2 in.



Gambar 2.4 Struktur mikro pada fasa pearlit (lamellae ferrite dan cementite)
(Kapito et al., 2019)

2.3.5 *Bainit*

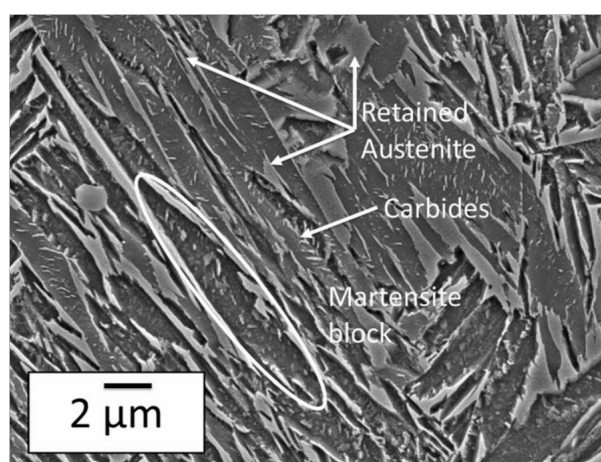
Bainit merupakan fasa yang terbentuk akibat dari transformasi pendinginan yang sangat cepat pada fasa austenit ke temperatur dari 250°C hingga 550°C dan ditahan pada temperatur tersebut. *Bainit* merupakan struktur mikro dari reaksi eutectoid ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) nonlamellar (tidak berupa lapisan) sehingga dapat dikatakan bahwa *bainit* campuran dari fasa ferit dan sementit (Fe_3C). Sifat *bainit* adalah lunak dan memiliki kekuatan tarik sekitar 550-1150 Mpa.



Gambar 2.5 Struktur mikro bainit (Lan et al., 2018)

2.3.6 *Martensit*

Martensit adalah fasa dimana ferit dan *martensit* bercampur dalam bentuk jarum-jarum sementit, bukan dalam lamellar. Fasa ini terbentuk dari 23 meta yang terbentuk dengan laju pendinginan cepat. *Martensit* akan terbentuk jika kandungan karbon dalam baja mencapai 0,6 % sedangkan jika di atas 1% akan terbentuk *martensit* pelat, perubahan tersebut terjadi pada interval $0,6 \% < C < 1,08 \%$ dengan temperatur di bawah 430°C . Sifat *martensit* adalah rapuh dan getas akan tetapi fasa ini juga bersifat keras dengan nilai kekuatan tarik di atas 1150 Mpa.



Gambar 2.6 Struktur mikro pada fasa *martensit* (Scott et al., 2018)

2.4 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

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

2.4.1 *Austenisasi*

Perlakuan Temperatur austenisasi adalah faktor yang sangat penting untuk mulai transformasi fasa menjadi austenit. Jika temperatur austenisasi yang diberikan rendah, maka tidak memungkinkan seluruh fasa material menjadi austenit sehingga pengerasan tidak tercapai sesuai yang diharapkan.

2.4.2 *Annealing*

Sedangkan proses Annealing adalah suatu proses memanaskan baja di atas temperatur kritisnya 723°C , ketika temperatur yang diharapkan sudah tercapai kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan secara perlahan dengan beberapa waktu lama hingga temperatur merata. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga agar temperatur di bagian dalam dan luar seragam kira-kira sama sampai diperoleh struktur yang diinginkan, proses pendinginan ini menggunakan media pendingin udara luar.

2.4.3 *Quenching*

Proses perlakuan yang lainnya adalah *Quenching*, pada proses ini

memiliki harapan agar baja memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi secara signifikan. Langkah awal yang dilakukan adalah memanaskan logam baja tersebut pada temperatur tertentu. Temperatur yang umumnya digunakan antara 845°-870°C, kemudian jika temperatur sudah tercapai maka dilakukan proses pendinginan pada media pendingin dengan secara cepat. Sehingga nanti akan terbentuk struktur *martensit* ketika baja sudah dingin. Proses *Quenching* dilakukan juga untuk mencegah terjadinya pembentukan struktur perlit serta untuk memudahkan pembentukan struktur bainit atau *martensit*.

2.4.4 *Tempering*

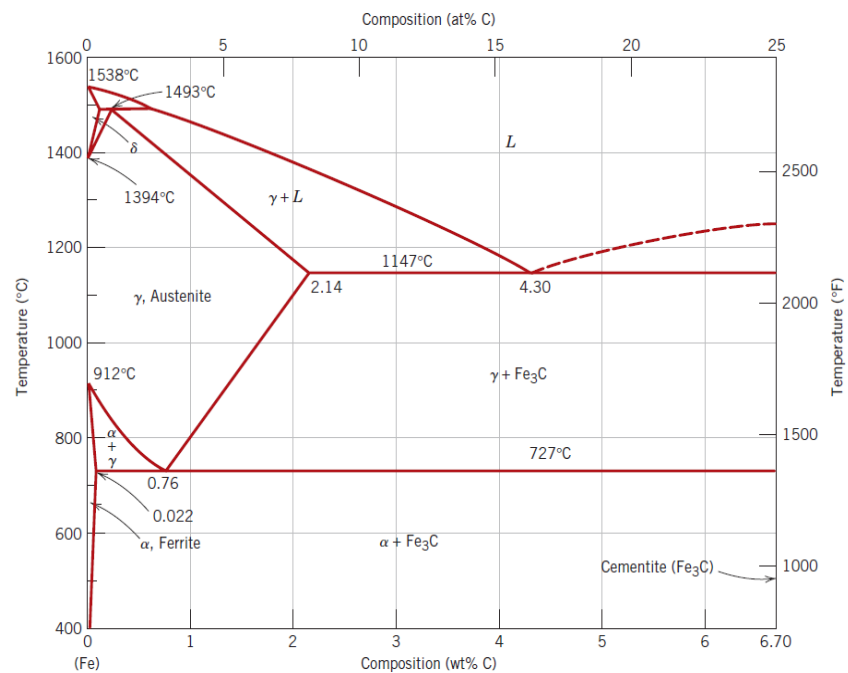
Proses *tempering* bisa diartikan sebagai proses pemanasan logam baja setelah dilakukan proses pengerasan pada temperatur di bawah suhu kritisnya, kemudian dilanjutkan proses pendinginan. Logam baja yang sudah dikeraskan tadi akan memiliki karakter lebih rapuh sehingga tidak cocok jika diaplikasikan pada komponen yang memerlukan tingkat daktiliti tinggi, namun melalui proses *tempering* ini kekerasan dan kerapuhan tersebut bisa diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan.

2.4.5 *Normalizing*

Normalizing adalah salah satu langkah perlakuan panas dengan memiliki harapan agar setelahnya menghasilkan struktur mikro berupa perlit dan ferit yang memiliki bentuk halus. *Normalizing* merupakan proses pemanasan logam sampai mencapai fasa austenite, kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginaan secara perlahan-lahan, media yang digunakan bisa berupa pendingin udara. Hasil pendinginan *normalizing* ini jauh lebih mulus dari *annealing* (Callister, 2017).

2.5 Diagram Fasa Fe –Fe₃C

Diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C digunakan sebagai panduan dasar perlakuan panas besi dan baja, terlihat pada gambar 2.7. Dari gambar tersebut terlihat fasa-fasa pada kondisi tertentu. Fasa-fasa tersebut adalah ferit, cementit (Fe₃C), austenit (g), besi (d) atau fasa-fasa campuran yang keberadaannya berdasarkan pada kondisi temperatur serta kandungan karbon. Diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C menjadi landasan untuk perlakuan panas dari kebanyakan jenis baja. Sumbu horizontal pada sumbu menunjukkan banyaknya kandungan karbon dan terjadi perubahan struktur mikro (Callister, 2017).



Gambar 2.7 Diagram fasa Fe –Fe₃C (Callister, 2017)

Beberapa istilah dalam diagram fasa Fe-Fe₃C dan fasa-fasa yang terdapat pada Gambar 2.7 dijelaskan di bawah ini. Berikut adalah batas-batas temperatur kritis pada diagram Fe-Fe₃C:

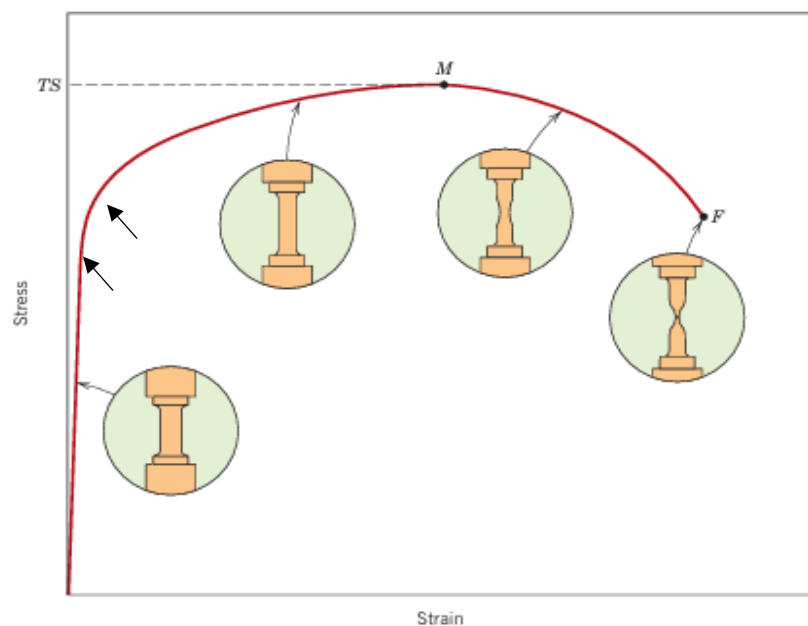
- 2.5.1 A1 adalah temperatur reaksi *eutectoid* yang perubahan fasa γ menjadi $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ *pearlite* untuk baja *hypoeutectoid*.
- 2.5.2 A2 adalah berupa titik *Currie* (pada temperatur 769 °C), dimana sifat magnetik besi berubah dari *feromagnetik* menjadi *paramagnetic*.
- 2.5.3 A3 adalah temperatur dari fasa γ menjadi α (*ferrit*) yang ditandai pula dengan naiknya batas kelarutan karbon seiring dengan turunya temperatur.
- 2.5.4 Acm adalah temperatur transformasi γ menjadi Fe_3C *cementite* yang ditandai pula dengan penurunan batas kelarutan karbon seiring dengan turunya temperatur.
- 2.5.5 A123 adalah temperatur transformasi γ menjadi $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ *pearlite* untuk baja *hypereutectoid*.

2.6 Sub Zero

Proses sub zero sebuah proses perlakuan panas yang melibatkan pendinginan baja hingga suhu jauh di bawah titik beku, ada beberapa tahap yang dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanis baja. Pertama, komponen baja dikeraskan dan ditemper untuk mencapai sifat dasar yang diinginkan. Selanjutnya, komponen didinginkan ke suhu di bawah nol, menggunakan nitrogen cair, dengan suhu berkisar antara -70°C hingga -196°C. Komponen kemudian ditahan pada suhu tersebut selama periode waktu tertentu, memungkinkan perubahan metalurgi yang diinginkan terjadi, terutama transformasi austenit yang tertahan menjadi *martensit*. Setelah periode penahanan, komponen dipanaskan kembali secara bertahap hingga mencapai suhu ruangan. Langkah terakhir adalah *tempering* pasca-perlakuan, biasanya pada suhu antara 150°C dan 180°C, yang bertujuan untuk menstabilkan struktur *martensit* baru dan mencegah tegangan sisa yang dapat menyebabkan keretakan atau deformasi. Proses ini memastikan bahwa komponen baja mencapai peningkatan optimal dalam kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap kelelahan.

2.7 Uji Tarik

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



Gambar 2.8 Grafik uji tarik (Callister, 2017).

Panah pertama: Daerah elastis, di mana baja akan kembali ke bentuk aslinya jika beban dihilangkan. Panah kedua: Batas proporsional, di mana hubungan linear antara tegangan dan regangan berakhir. Panah ketiga: Titik luluh, di mana baja mulai mengalami deformasi plastis. Panah ke empat: Daerah plastis, di mana baja mengalami deformasi permanen. M : Tegangan maksimum, kekuatan tarik tertinggi yang dapat ditahan oleh baja. Panah

keempat: Daerah necking, di mana terjadi pengecilan penampang lokal.
Panah kelima: Titik patah, di mana baja akhirnya patah.

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

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

Dimana:

σ :Tegangan tarik (N/m²) (Pa)

F : Gaya (N)

A : Luas permukaan (m²)

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

$$\xi = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad (2.2)$$

Dimana:

ξ : Regangan

ℓ : Panjang batang (m)

ℓ_0 : Panjang semula (m)

$\Delta\ell$: Perubahan panjang (m)

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

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

Dimana:

E : Modulus elastis (GPa)

σ : Tegangan (MPa)

ε : Regangan

2.8 Perambatan retak

Perambatan retak merupakan tahapan kedua dari ketiga tahapan proses kerusakan/kegagalan. Pada tahapan ini, retak tumbuh serta merambat sampai mencapai batas kritis (critical size). Dari data mengenai perambatan retak suatu perkiraan usia fatik (fatigue life) mampu dikembangkan.

Merujuk konsep fracture mechanics, laju dari pertumbuhan retak dijelaskan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat bahan, tegangan operasi dan panjang retak. Melalui persamaan Paris-Erdogan dapat diinterpretasikan bahwa laju perambatan retak sebagai berikut.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (2.4)$$

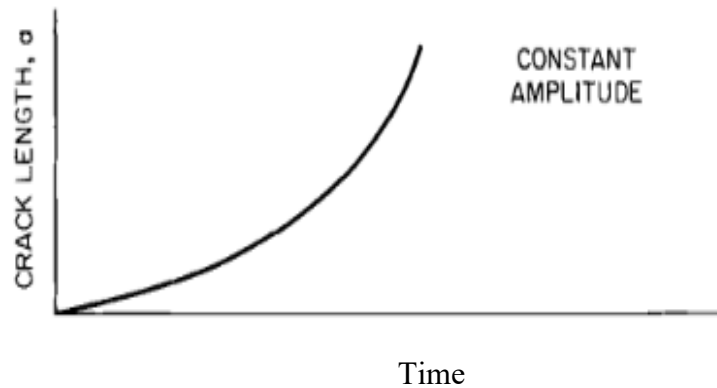
Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

C = Konstanta bahan

m = Nilai eksponensial

Laju dari perambatan retak adalah kegunaan dari faktor pada intensitas tegangan. Retak mulanya berawal dari bidang sangat rapuh, selanjutnya berkembang bersamaan dengan berjalannya siklus pembebanan. Pada suatu percobaan lazimnya perambatan retak mampu diukur dengan visual menggunakan teleskop serta dapat diukur menggunakan alat ultrasonik. Pertumbuhan retak merupakan suatu perubahan panjang retak terhadap siklus. Jika, disaat panjang retak a di plot dengan siklus N , maka dapat ditunjukkan pada Gambar 2.9 sebagai berikut.



Gambar 2.9 Kurva pertambahan retak fatik (Barsom & Rolfe, 1999).

Dengan asumsi bahwasanya panjang retak a pada suatu panjang konstan dan serta hanya tegangan yang bervariasi. Hal tersebut ditunjukkan untuk suatu kalibrasi K sederhana.

$$K = S\sqrt{a} \quad (2.5)$$

Dimana :

K = Faktor intensitas tegangan

S = Tegangan (MPa)

a = Panjang retak (mm)

$$\Delta K = \Delta S\sqrt{a} \quad (2.6)$$

Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

ΔS = Selisih tegangan (MPa)

a = Panjang retak (mm)

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{A}\sqrt{a} \quad (2.7)$$

Dimana :

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

ΔP = Range beban (MPa)

A = Penampang (mm²)

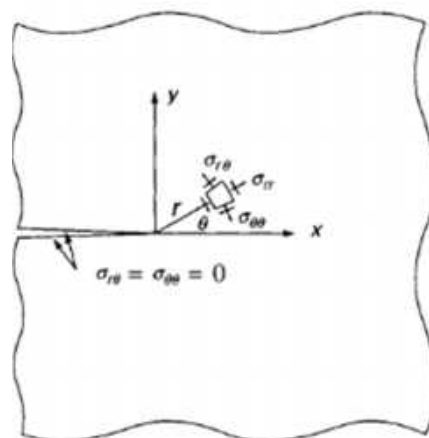
a = Panjang retak (mm)

Guna memprediksi usia fatik dalam suatu bagian yang mempunyai cacat ataupun ketidak-sempurnaan maka dalam konsep mekanika retakan (fracture mechanics) dikembangkan serta dipakai secara luas baik secara eksperimen, numeric dan analitis.

Pada saat melakukan evaluasi suatu struktur yang mempunyai ketidaksempurnaan atau cacat, yang menjadi salah satu dari pendekatannya dengan memperkirakan usia dari perambatan retak. Pada kasus fatik, bahwa digunakan metode linear elastic fracture mechanics (LEFM). Perihal seperti ini dikarenakan kasus fatik terjadi disaat keadaan elastis. Akan tetapi, konsep mekanika retakan dapat digunakan pada keadaan plastis dengan menggunakan metode elastic plastic fracture mechanics (EPFM).

Faktor Intensitas Tegangan pada Linear Elastic fracture mechanics (LEFM), umur atau ketangguhan yang merupakan komponen dari pertumbuhan retak dispesifikan melalui suatu parameter yang dikatakan dengan stress intensity factor, K_I . Nilai K mengemukakan suatu ukuran dari besaran medan konsentrasi tegangan diarea sekitar ujung retak.

Anggap jika suatu struktur yang mempunyai retak dikenai tegangan tarik yang tegak lurus didaerah retak. Seperti pada gambar 2.10 tegangan yang terjadi diujung retak ialah sebagai berikut.



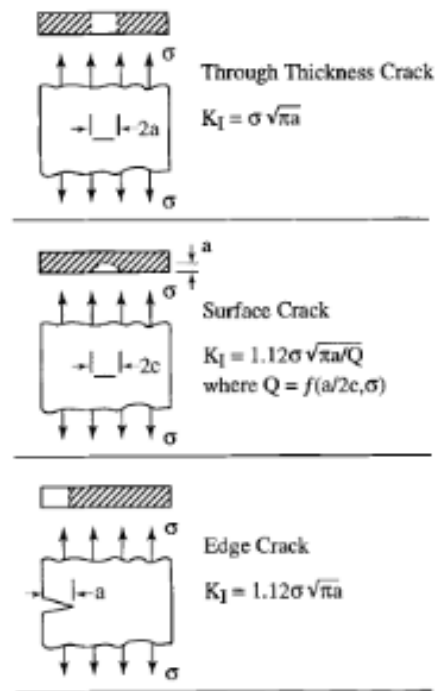
Gambar 2.10 Komponen tegangan

$$sx = \frac{KI}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{q}{2} \left[1 - \sin \frac{q}{2} \sin \frac{3q}{2} \right] \quad (2.8)$$

$$sy = \frac{KI}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{q}{2} \left[1 + \sin \frac{q}{2} \sin \frac{3q}{2} \right] \quad (2.9)$$

$$\tau xy = \frac{KI}{\sqrt{2pr}} \sin \frac{q}{2} \cos \frac{q}{2} \cos \frac{3q}{2} \quad (2.10)$$

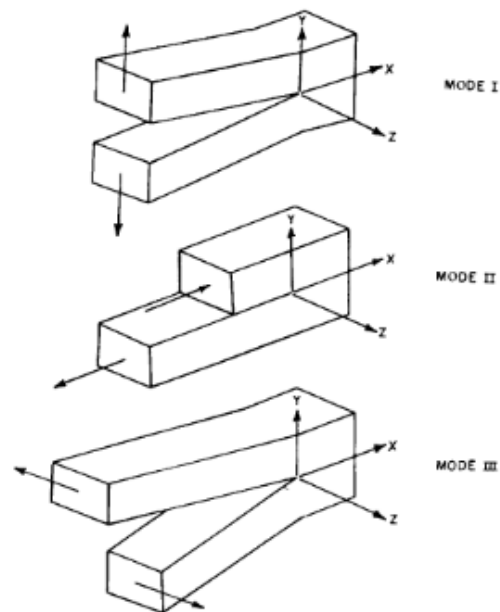
Faktor stress intensity adalah K_I yang merupakan kegunaan dari panjang retak serta tegangan. Akan tetapi memiliki macam-macam variasi terhadap jenis-jenis retak serta beban pada seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.11 Nilai K_I untuk macam geometri retak (Barsom & Rolfe, 1999).

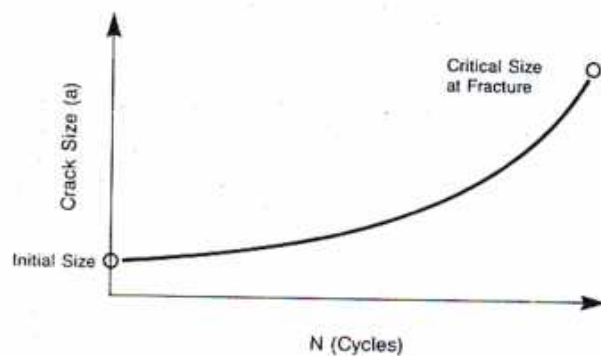
Fracture Toughness (nilai ketangguhan) material merupakan sifat ketangguhan bahan dalam menahan laju retakan. Sifat material pada suatu keadaan statis yang dapat dinyatakan sebagai ultimate strength atau yield strength. Gambaran terpenting dalam memperkirakan laju retak yang memiliki kaitan untuk perkiraan usia fatik, nilai K_{Ic} memiliki tujuan melakukan evaluasi dari ketahanan retak dengan menggunakan cara melakukan perbandingan nilai K_I serta nilai K_{Ic} . Dimana nilai K_I berada

jauh dari K_{ic} maka dapat dinyatakan bahwa suatu konstruksi masih dapat dikatakan aman. Namun, jika terjadi sebaliknya saat nilai K_I mendekati nilai K_{ic} maka dapat dinyatakan suatu konstruksi akan mengalami patah/gagal. Terdapat tiga modus pergeseran permukaan patah yaitu modus I (tarikan), modus II (geseran) dan modus III sebagai robekan seperti ditampilkan pada Gambar 2.12 sebagai berikut.

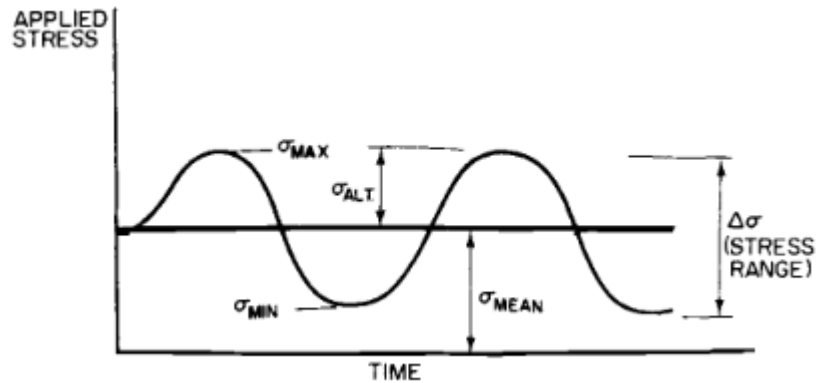


Gambar 2.12 Modus pergeseran permukaan retak (Barsom & Rolfe, 1999)

Fatigue Crack Growth untuk bisa memprediksi laju pertumbuhan retak maka dibutuhkan data laju pertumbuhan retak dari bahan yang diuji secara fatik, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.13 dan 2.14 sebagai berikut.



Gambar 2.13 Skematik laju pertumbuhan retak (Huang et al., 2011).



Gambar 2.14 Beban fatik pada perambatan retak (Barsom & Rolfe, 1999).

Patah terjadi disaat panjang retak yang kritis dimana bahan tidak mampu dan tidak dapat lagi menahan beban yang didapatkan. Patah dapat terjadi saat nilai ketangguhan retak (fracture toughness) K_{Ic} material tercapai. berarti nilai $K_I = K_{Ic}$,

Metode yang akan digunakan pada penelitian ini ialah Incremental Polynomial Method. Metode ini dipakai guna menghitung da/dN dengan pendekatan polinomial. Perhitungan perambatan retak yaitu pada retak sisi tunggal spesimen uji fatik yang berada pada tepi takik. Untuk menghitung intensitas tegangan yang sesuai dengan tingkat pertumbuhan retak sisi tunggal menghitung sebagai berikut.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} (0,866 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (2.11)$$

Dimana :

ΔK = Faktor intensitas tegangan

ΔP = Perubahan beban (kN)

B = Tebal (mm)

w = Lebar (mm)

α = a/W

2.9 Fatik

Fatigue adalah kerusakan pada material yang ditimbulkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (ultimate tensile strength) (σ_u) maupun tegangan luluh (yield). Apabila suatu logam diberikan tegangan berulang maka logam tersebut akan patah pada tegangan yang jauh lebih rendah daripada dengan tegangan yang diperlukan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik (Amiruddin & Lubis, 2018).

Crack atau retak merupakan mekanika kelelahan yang dipakai untuk menganalisis ketika perambatan retak diberikan beban berulang. Perambatan retak inilah yang nantinya digunakan untuk menentukan umur kelelahan sebelum terjadi kegagalan struktur (Barsom & Rolfe, 1999). Mekanika kelelahan dibagi menjadi beberapa tahap yaitu tahap awal terjadinya retakan (crack initiation), tahap perambatan retak (crack propagation) dan patah (final fracture).

2.9.1 *Crack Initiation* (retak awal)

Tahap ini merupakan tahap awal retak yang terjadi pada suatu material. Retak ini timbul karena adanya cacat pada saat fabrikasi atau dapat juga terjadi karena adanya pembebanan secara terus-menerus pada suatu material.

2.9.2 *Crack propagation* (Perambatan retak)

Tahap ini material mengalami perambatan retak setelah retak awal terjadi karena pembebanan berulang yang bekerja pada material. Perambatan retak ditentukan oleh dua parameter fracture fatigue, yaitu ΔK dan K_{max} (Stoychev & Kujawski, 2008). Perambatan retak berbanding lurus dengan jumlah pembebanan. Saat pembebanan normal, perambatan retak terjadi sangat lambat. Dari perhitungan perambatan retak ini dapat diketahui suatu prediksi umur lelah struktur (fatigue life).

2.9.3 *Final Fracture*

Tahap ini merupakan tahap paling akhir yang terjadi pada suatu material. Pada struktur terjadi kerusakan yang mengakibatkan kegagalan. Pada tahap ini, perambatan retak terjadi sangat cepat. Retak yang terjadi adalah brittle fracture (cleavage), ductile fracture (rupture) atau gabungan dari keduanya.

2.10 **Fatig Siklus**

Fatigue terdapat dua siklus yang membedakan, yaitu Low Cycle Fatigue (LCF) dan High Cycle Fatigue (HCF). Berikut merupakan pengertian kedua siklus tersebut.

2.10.1 *Low Cycle Fatigue* (LCF) yaitu fatik dengan siklus rendah. Pada low cycle fatigue memiliki nilai jumlah siklus di bawah $\leq 10^3 = 1000$ siklus dalam kondisi plastis. Fatik siklus rendah biasanya didesain dengan mengabaikan semua efek fatik atau dengan mengurangi level tegangan yang diperbolehkan. Sebagai contoh aplikasi fatik siklus rendah ini adalah stud pada roda truk, grendel pada laci kecil dekat stir mobil dan masih banyak lagi.

2.10.2 *High Cycle Fatigue* (HCF) yaitu fatik dengan siklus tinggi. pada high cycle fatigue memiliki nilai jumlah siklus antara 10^4 sampai 10^7 dan di luar kondisi elastis. Sebagai contoh aplikasi high cycle fatigue adalah panel badan pesawat, engsel pintu kendaraan dan pemukul softball aluminium.

2.11 **X-RD**

XRD merupakan suatu teknik karakterisasi nonkontak dan nondestruktif yang sangat presisi untuk mengidentifikasi fasa kristalin yang terdapat dalam suatu material. XRD juga dapat digunakan untuk menginvestigasi sifat struktural dari suatu material seperti *strain state*, ukuran kristalit, komposisi fasa, orientasi, dan struktur defek. XRD memberikan akurasi yang tidak tertandingi untuk mengukur *spacing* atom

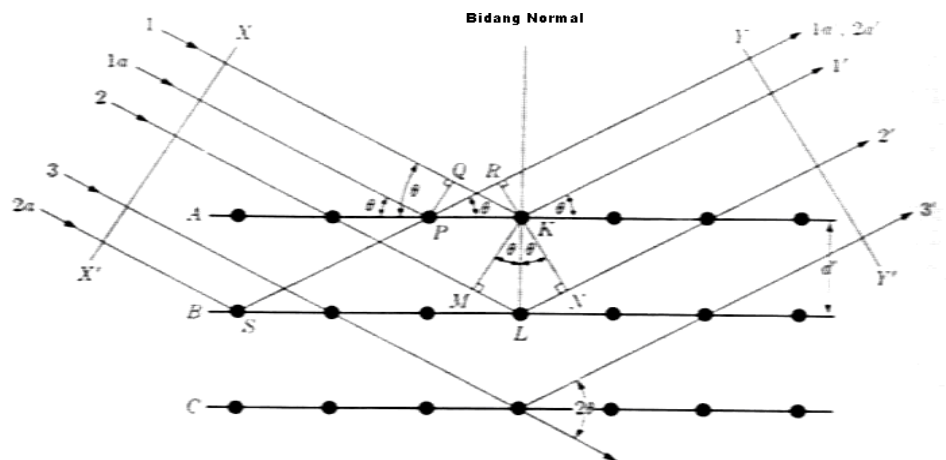
dan puncak hasil XRD dapat dipakai untuk analisa kuantitatif yang akurat akan suatu susunan atom material.

Sinar X adalah bentuk dari radiasi gelombang elektromagnetik, dihasilkan dari benda yang ditumbuk oleh elektron. Panjang gelombang sinar X dari 10^{-10} sampai 10^{-8} m, dan hanya 0.3-2.5 Angstrom yang digunakan untuk difraksi sinar X. Sinar X memiliki daya penetrasi yang besar sehingga sinar X dapat dipakai untuk mengetahui periodisitas kristal.

Apabila sebuah gelombang sinar X ditembakkan pada material kristalin, maka fenomena yang dapat teramati adalah difraksi dari sinar X dengan sudut bervariasi tergantung pada gelombang pertama. Hukum yang digunakan pada difraksi sinar X adalah hukum Bragg, yaitu :

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.12)$$

Fenomena yang teramati oleh hukum Bragg ditunjukkan pada gambar 2.5. Secara eksperimen hukum Bragg dapat diamati melalui dua cara. Metoda dengan menggunakan sinar X dengan panjang gelombang (λ) tertentu dan mengukur θ , sehingga kita dapat menentukan lebar d dari beberapa bidang kristal, metoda ini disebut dengan analisa struktur. Metoda yang lain adalah menggunakan kristal dengan lebar (d) bidang diketahui, lalu mengukur θ , sehingga dapat menentukan panjang gelombang (λ) dari radiasi yang digunakan, metoda tersebut dinamakan *X-ray spectroscopy*.



Gambar 2.15 Difraksi sinar X pada kristal (Tsuji et al., 2004)

Pola sinar X dari bahan-bahan kristalin dapat disebut sebagai sidik jari (*finger print*), setiap material (secara terbatas) memiliki pola difraksi yang unik. Dengan menggunakan metoda difraksi serbuk, parameter yang diukur adalah lebar dari kisi- kisi mineral untuk menentukan struktur mineral tersebut.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium material Universitas Lampung, lokasi yang dipilih untuk melakukan pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik. Laboratorium material tersebut memiliki alat uji tarik yang relevan untuk melakukan pengujian tarik yang memenuhi standar. Dalam penelitian ini melakukan beberapa uji sebelum melakukan uji tarik dan uji perambatan retak fatik, yaitu melakukan pengujian kekerasan menggunakan micri vickers di PT. Techno Metal Industry dan pengujian komposisi di PT. Detech Profesional Indonesia, sedangkan pengujian SEM di balai penelitian nasional yang memiliki alat SEM yang

memenuhi standar. Dengan demikian, data dan analisis yang diperoleh dari penelitian ini akan memberikan data yang dapat dipertanggung jawabkan.

3.2 Alat

3.2.1 Mesin MTS *leandmark* 100 kN

Mesin ini digunakan untuk melakukan pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik, mesin MTS *leandmark* 100 kN ini terdapat di laboratorium material teknik mesin Universitas Lampung.



Gambar 3.1 MTS leandmark 100 kN

3.2.2 *Clip Gauge on Displacement (COD)*

Clip Gauge on Displacement (COD) digunakan untuk mengukur variasi celah di antara takik pada spesimen selama pengujian rambatan retak fatik. *Clip Gauge on Displacement* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Clip Gauge on Displacement (COD)*

3.2.3 *Clevis*

Dalam pengujian perambatan retak fatik, spesimen uji dicekam dengan alat *clevis* pada mesin *MTS Landmark 100 kN*. *Clevis* yang digunakan pada pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 *Clevis*

3.2.4 *Axial Extensometer*

Axial extensometer jenis sensor perpindahan yang digunakan untuk mengukur pemanjangan atau pemendekan suatu material atau specimen Ketika diberi beban aksial dapat dilihat pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 *Axial extensometer*

3.2.5 Mesin Wire Cutting

Mesin pemotong ini digunakan untuk memotong material untuk dijadikan spesimen, mesin *wire cutting* HE-SV50-W34 ini terdapat di PT. Metalin'go technology dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Mesin wire cutting HE-SV50-W34

3.2.6 Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur spesimen sebelum dan sesudah melakukan pengujian tarik dan pengujian perambatan retak fatik dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Jangka sorong

3.2.7 Mesin Ultrasonic

Mesin ini digunakan untuk membersihkan spesimen dari bahan yang dapat mengkontaminasi specimen dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Mesin ultrasonic

3.2.8 Tiner

Tiner digunakan untuk media pembersihan dalam mesin ultrasonik dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Tiner

3.2.9 Aquades

Aquades digunakan untuk membersihkan spesimen setelah di bersihkan menggunakan tiner dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Aquades

3.2.10 Amplas

Amplas Ini digunakan untuk menghaluskan sisa dari proses pemotongan dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Amplas

3.2.11 Lakban Kertas

Lakban kertas ini untuk digunakan di ujung spesimen uji tarik untuk melapisi spesimen agar tidak terjadi slip pada saat melakukan pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.11.

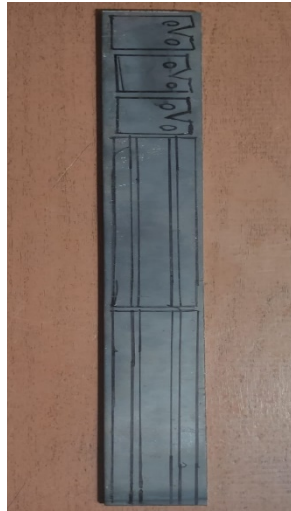


Gambar 3.11 Lakban kertas

3.3 Bahan

3.3.1 Baja Matensit 9Cr18Mo Tanpa Perlakuan

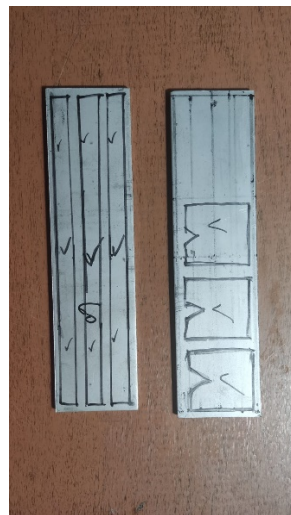
Baja matensit 9Cr18mMo tanpa perlakuan merupakan material yang akan digunakan untuk menjadi spesimen uji tarik dan sepesimen uji perambatan retak fatik dalam penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 3.12 Baja matensit 9Cr18Mo tanpa perlakuan

3.3.2 Baja Matensit 9Cr18Mo *Novel Qenching Tempering*

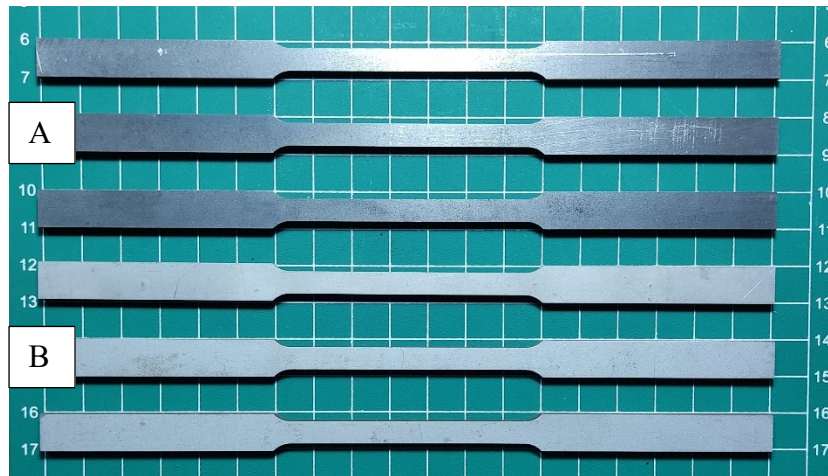
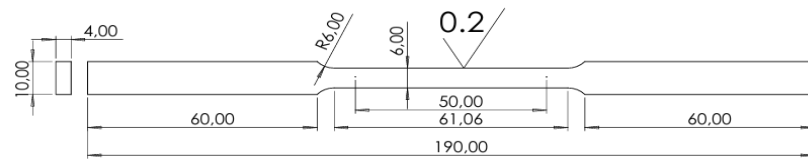
Baja matensit 9Cr18Mo *novel quenching tempering* merupakan material yang akan digunakan untuk menjadi spesimen uji tarik dan sepesimen uji perambatan retak fatik dalam penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 3.13 Baja matensit 9Cr18Mo *novel quenching tempering*

3.3.3 Spesimen Uji Tarik

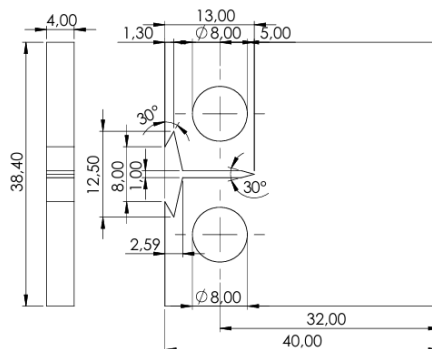
Spesimen uji tarik yang akan digunakan dalam penelitian ini menggunakan standar ASTM E8M.

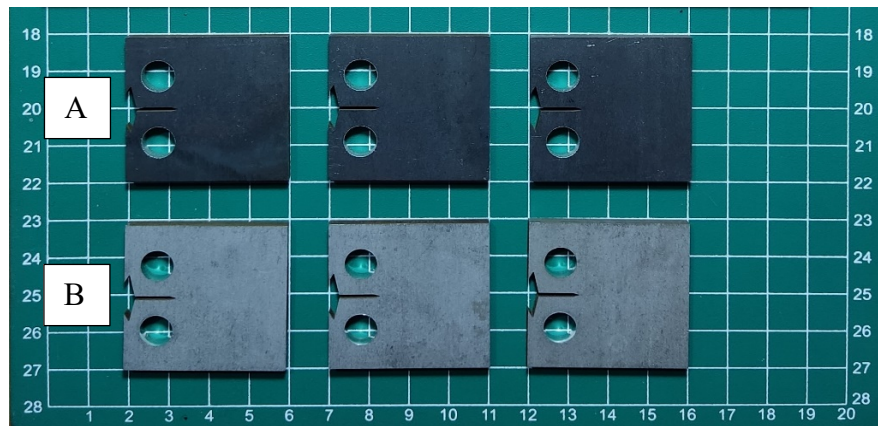


Gambar 3.14 Spesimen uji tarik (A) tanpa perlakuan (B) perlakuan *novel quenching tempering*

3.3.4 Spesimen Uji Perambatan retak fatik

Spesimen uji perambatan retak fatik yang akan digunakan dalam penelitian ini menggunakan standar ASTM E647.



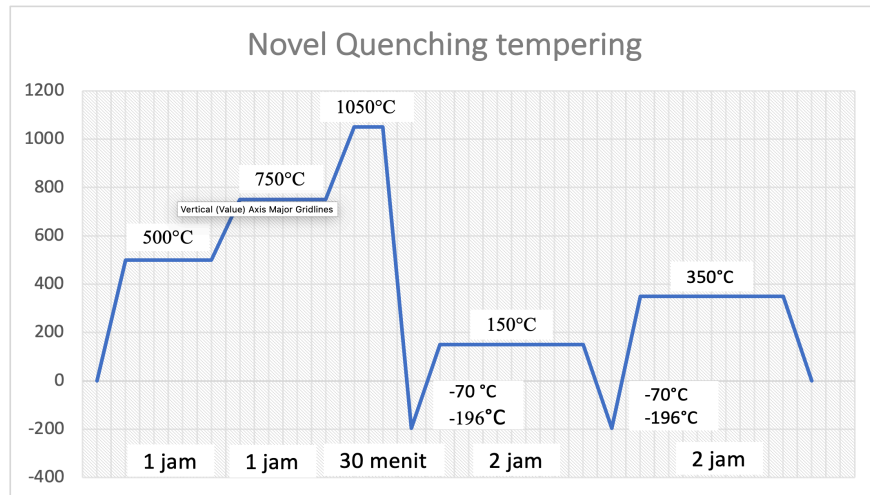


Gambar 3.15 Spesimen uji perambatan retak fatik (A) tanpa perlakuan (B) perlakuan *novel quenching tempering*

3.4 Prosedur Pengujian

3.4.1 Persiapan Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini ialah baja matensit 9Cr18Mo tanpa perlakuan dan baja matensit 9Cr18Mo dengan perlakuan *novel quenching tempering*, proses perlakuan panas *novel quenching tempering* dapat dilihat pada grafik di bawah yaitu melalui proses heat treatment, *quenching tempering* semua terjadi dalam keadaan vakum dan dilakukan proses annealing pada suhu 500°C dan ditahan selama 1 jam dan dinaikan menjadi 750°C dan di tahan selama 1 jam dan dinaikan kembali menjadi 1050°C dan ditahan selama 30 mesin, lalu dilakukan *quenching* menggunakan nitrogen cair dengan suhu antara -70°C sampai -196°C dan di panaskan kembali pada suhu 150°C selama 2 jam dan di *quenching* kembali dengan nitrigen cair dengan suhu antara -70°C sampai -196°C dan di panaskan kembali pada suhu 350°C selama 2 jam dan didinginkan secara natural sampai material senjadi suhu normal.



Gambar 3.16 Proses *novel quenching tempering*

3.4.2 Persiapan Spesimen

Spesimen yang digunakan ialah spesimen uji tarik dan spesimen uji perambatan retak fatik yang semua di potong menggunakan wire cutting yang dilakukan di PT. Metalin'go Technology. Sedangkan spesimen uji kekerasan, struktur micro, uji komposisi dan XRD di lakukan di lab Universitas Lampung.

3.4.3 Uji Tarik

Proses pengujian tarik statis dilaksanakan terlebih dahulu supaya di peroleh data nilai tegangan luluh (σ_y) baja. Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :Mempersiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E8M.

- a. Memilih program Controller 793B setelah itu klik manual command, pilih displacement mode, lalu naikan actuator ke posisi nol (zero).
- b. Memasangkan spesimen pada cross head grip atas kemudian spesimen dicekam.
- c. Lalu crosshead diturunkan sampai ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.

- d. Menekan manual command dan klik control mood ke force.
- e. Kemudian klik auto offset untuk force. Lalu mencengkam grip bagian bawah sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- f. Memasangkan extensometer pada spesimen dengan posisi zero pin, dan tekan icon manual offset untuk extensometer.
- g. Lalu zero pin dilepaskan dari extensometer.
- h. Memilih program MTS Test Suite (MPE), pilih template untuk uji tarik statis.
- i. Memasukkan data panjang spesimen, lebar spesimen dan tebal spesimen.
- j. Lalu masukan initial speed dan secondary speed 0,125 (mm/s). Sesudah menginput semua data lalu klik RUN.

3.4.4 Uji Perambatan retak fatik

LT01 dan LT02 mewakili dua spesimen FCG (*Fatigue Crack Growth*) pada arah LT, dan dua lainnya pada arah TL, ditetapkan sebagai TL01 dan TL02. Panjang retak fatik (a_n), seperti yang ditunjukkan pada gambar. 3.1, adalah 8.00 mm. Spesimen dibebani dengan rentang beban konstan (f_p) = 3,199 kN pada tegangan $R = 0.1$ dengan menggunakan gelombang sinusoidal pada frekuensi (f) 10 Hz. Pembebanan pra-kelelahan dihentikan setelah total panjang pra-retak (a_p) mencapai 1 mm. Selanjutnya, Pengujian FCG dilanjutkan di bawah beban konstan (P_{FCG}) sebesar 3,358 kN at $R = 0.1$ dan $f = 10$ Hz sampai sepesimen mencapai titik gagal. Untuk mengukur bukaan retak (CMOD), menggunakan alat ukur perambatan retak (COD) dengan panjang alat ukur 8.00 mm. Perhitungan panjang fetak (a) untuk spesimen CT (Gambar. 3.2) dilakukan dengan menggunakan metode method, sepeti yang diuraikan dalam persamaan (3.2). Untuk mencari nilai a_0 digunakan persamaan (3.1):

$$P_f = 0,2Bb_0^2\sigma_Y/(2W + a_0) \quad (3.1)$$

B = Tebal spesimen

$b_0 = W - a_0$

σ_Y = yield strenght

W = Lebar yang di ukur dari pusat loading

a_0 = Jarak retak dari pusat pin

$$a = W(1.000 - 4.500U + 13.157U^2 - 172.551U^3 + 879.944U^4 + 1514.671U^5) \quad (3.2)$$

Selain itu, nilai U dihitung dengan menggunakan persamaan (3.3):

$$U = \frac{1}{[1+(ECB)^{1/2}]} \quad (3.3)$$

Dimana C adalah $v/load$, v adalah CMOD diantara titik pengukuran. W dan B dimensi spesimen untuk lebar 6,04 mm dan ketebalan 4,20 mm, dan E adalah modulus elastisitas. Panjang retak (a) dihitung dengan penambahan 2000 siklus. Jumlah siklus (N) diplot terhadap panjang retak (a), dan Secant method digunakan untuk menghitung laju pertambahan retak (da/dN , mm/siklus) menggunakan (Gambar 3.4), yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$(da/dN)_{\bar{a}} = (a_{i+1} - a_i)/(N_{i+1} - N_i) \quad (3.4)$$

Perhitungan da/dN dengan dasar laju rata-rata $(a_{i+1} - a_i)$ dan panjang retak rata-rata, $\bar{a} = \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)$, digunakan untuk menghitung ΔK menggunakan persamaan. (3.5):

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.6\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3.5)$$

Di mana $\alpha = \bar{a}/W$. da/dN dan ΔK dibuat dengan double log x-y axes. FCG terdiri dari nilai C dan m pada saat pemuatan stabil ditentukan dengan menggunakan teknik linear fitting regression.

Adapun prosedur pengujian perambatan retak fatik yang dilakukan yaitu:

- a. Menyiapkan spesimen sesuai dengan standar ASTM E 647.
- b. Menghidupkan Chiller dan HPU (Hydraulic Power Unit).
- c. Menghidupkan MTS Landmark 100 kN dan temperatur kontroler.
- d. Menghidupkan lampu penerang pada MTS Landmark 100 kN.
- e. Membuka program Station Manager lalu memilih file FCG 2022 dan configuration file tanpa Extensometer yaitu Axial Basic lalu klik open.
- f. Station manager klik ceklist pada Exclusive Control lalu pada manual command ceklist pada Enable Manual Command.
- g. Station manager di controls detector ubah Upper Action pada axial displacement dari interlock ke disable lalu klik reset pada interlock 1 di station manager.
- h. Lalu klik HPU power low dan tunggu hingga lampu kuning pada tombol berhenti berkedip, kemudian klik HPU power high dan tunggu beberapa detik. Lalu melakukan hal yang sama pada HSM, klik HSM power low dan tunggu beberapa saat, lalu terakhir klik HSM power high.
- i. 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).
- j. Detector, ubah upper action ada axial displacement dari disable ke interlock.
- k. Membuka program MTS Test Suite (MPE), memilih template untuk fatigue crack growth testing.

- l.** Memasangkan spesimen pada cross head grip atas dengan rapi kemudian spesimen dicekam.
- m.** Kemudian menurunkan cross head sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam grip bawah dengan kedalaman 45 mm atau sesuai dengan solatip yang digunakan untuk grip spesimen.
- n.** Meluruskan grip bawah sesuai dengan grip atas, lalu pada manual command, klik control mode dan ganti displacement ke force dan grip bagian bawah dicekam
- o.** Kemudian reset pada interlock 1 station manager dan uncheck enable manual command pada manual command.
- p.** Klik new test run pada software MTS Test Suite, dan mengatur setup variables fatigue crack growth testing yaitu dengan memasukan data Fmax dan Fmin, total cycles 1000000, frekuensi 10 Hz, cycle increament , dan beban uji fatik menggunakan control beban yang sudah ditentukan dari nilai yield strength yang diperoleh dari hasil uji tarik sebesar 20%.
- q.** Kemudian klik OK dan Run Test.

3.4.5 Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia dilakukan di PT Detech Profesional Indonesia menggunakan alat Optical Emission Spectrometer (OES) Bruker Q4 Tasman yang telah terkalibrasi sesuai standar KAN ISO/IEC 17025. Adapun tahapan dalam pengujian komposisi kimia adalah sebagai berikut:

Menyiapkan spesimen uji dengan memotong sesuai ukuran meja uji OES (diameter ≥ 20 mm dan tebal ≥ 5 mm) menggunakan mesin potong dengan pendingin untuk mencegah perubahan struktur mikro.

- a. Mengamplas atau memoles permukaan spesimen hingga rata, bersih, dan bebas oksida, minyak, atau kontaminan.
- b. Membersihkan permukaan spesimen dengan kain bebas serat atau udara bertekanan, serta menghindari sentuhan langsung dengan tangan.
- c. Memastikan suplai gas argon murni ($\geq 99,99\%$) tersedia dengan tekanan sesuai spesifikasi alat.
- d. Melakukan kalibrasi harian (*standardization*) menggunakan *Certified Reference Material* (CRM) sesuai jenis logam yang diuji.
- e. Meletakkan spesimen pada meja uji, memastikan permukaan kontak rapat dengan elektroda.
- f. Menjalankan program pengujian pada perangkat lunak Bruker Q4 Tasman sesuai jenis material yang dianalisis.
- g. Melakukan *spark test* untuk menghasilkan plasma, kemudian OES menganalisis spektrum cahaya dan menampilkan persentase komposisi unsur.
- h. Mengulangi pengujian pada titik berbeda minimal 2–3 kali untuk mendapatkan hasil rata-rata yang akurat.
- i. Mencatat dan menyimpan hasil pengujian sesuai prosedur dokumentasi laboratorium.

3.4.5 Uji SEM Fraktografi

Pengujian mikrostruktur dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) di BRIN. SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan detail mikrostruktur spesimen dengan perbesaran tinggi. Adapun tahapan dalam pengujian SEM adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan spesimen uji dengan ukuran sesuai *sample holder* SEM, biasanya beberapa milimeter hingga satu sentimeter, tergantung ruang vakum alat.
- b. Membersihkan spesimen dari debu, minyak, dan kontaminan menggunakan udara bertekanan atau ultrasonic cleaner agar hasil citra tidak terganggu.
- c. Melapisi permukaan spesimen dengan lapisan konduktif tipis (misalnya emas atau karbon) menggunakan *sputter coater*, terutama jika spesimen bersifat non-konduktif.
- d. Memasang spesimen pada *sample stub* atau *holder* dengan perekat konduktif (carbon tape atau silver paste).
- e. Memasukkan *holder* berisi spesimen ke dalam ruang vakum SEM, kemudian menutup dan mengaktifkan sistem vakum hingga mencapai tekanan yang direkomendasikan.
- f. Mengatur parameter pengamatan seperti tegangan percepatan elektron (*accelerating voltage*), jarak kerja (*working distance*), dan perbesaran sesuai kebutuhan pengamatan.
- g. Melakukan pemindaian (*scanning*) permukaan spesimen hingga mendapatkan citra dengan fokus dan kontras optimal.
- h. Mengambil dan menyimpan citra hasil pengamatan pada resolusi yang sesuai, dilengkapi informasi parameter uji.
- i. Mengeluarkan spesimen dari ruang vakum setelah proses selesai, lalu membersihkan *sample holder* untuk pengujian berikutnya.
- j. Mendokumentasikan hasil analisis dan menyusunnya sesuai format pelaporan penelitian.

3.4.6 Uji Struktur Mikro

Adapun tahapan dalam pengujian struktur mikro adalah sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan spesimen dengan dimensi yang sesuai yaitu 10 x 10 mm.
- b. Memasang amplas pada mesin pemolis, dimulai dari polis yang paling kasar. Pengamplasan dilakukan dalam keadaan basah untuk menghilangkan panas dan pengotor dari benda uji.
- c. Setelah cukup rata, maka mengganti amplas dengan amplas yang agak halus yaitu amplas nomor 800, kemudian mengamplas nomor 1200, dan yang terakhir menggunakan amplas yang paling halus yaitu nomor 2000 Kemudian mempolis dengan menggunakan autosol.
- d. Sebelum melakukan pengetzaan, permukaan benda uji harus sudah halus dan datar. Pengetzaan dilakukan dengan mencelupkan material ke dalam reaktan beberapa saat.
- e. Mencuci benda un yang telah dietsa dengan aquades kemudian Mengeringkan sebelum diamati pada mikroskop.
- f. Ambil gambar apabila gambar yang diperoleh terlihat jelas sesuai dengan pembesaran pada mikroskop.

3.4.7 Uji Kekerasan

Uji kekerasan di lakukan di PT. Techno Metal Industry menggunakan Micro Vickers NOBEL MHVS-50AT dengan beban 0,1 Kg, adapun tahapan dalam uji kekerasan adalah sebagai berikut:

- a. Membersihkan permukaan benda uji dan amplas sehingga kedua permukaan tersebut benar-benar rata dan sejajar.
- b. Pemasangan penetrator berlian/bola baja sesuai dengan jenis material yang akan diuji.
- c. Memastikan handle dalam posisi unloading.
- d. Memutar exchanging handle proper weight sesuai pengujian kekerasan.
- e. Memasang benda uji pada kedudukannya (anvil) lalu mengencangkan dengan memutar handwheel. Hingga spesimen menyentuh penetrator dan jarum kecil pada dial indikator menuju garis merah.
- f. Melakukan pembacaan pada indikator. Untuk pengujian dengan diamond penetrator, baca pada garis bagian luar indikator (garis

berwarna hitam). Untuk pengujian dengan steel ball penetrator baca pada bagian dalam indikator (garis berwarna merah).

- g. Memutar handwheel berlawanan jarum jam untuk menurunkan spesimen. Melakukan pengujian sampel selanjutnya sesuai prosedur 3 sampai 10 sebanyak 3 kali untuk masing-masing spesimen.

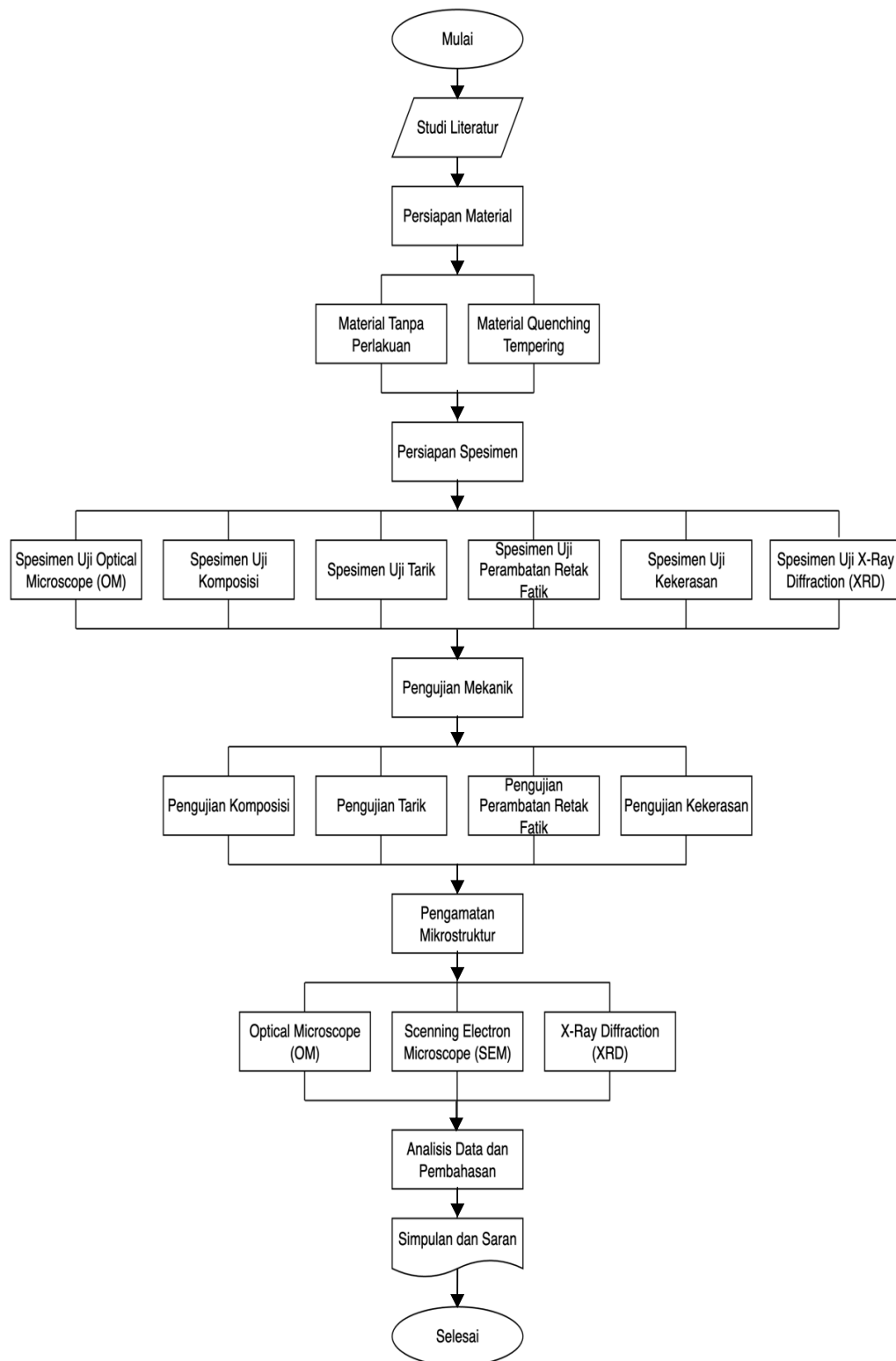
3.4.8 Uji XRD

Pengujian XRD dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). XRD digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal dan menentukan parameter kisi material. Adapun tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan sampel uji permukaan datar dengan ukuran 1,9x1,4 cm.
- b. Memasang sampel pada *sample holder* XRD, memastikan permukaan rata dan posisi terpasang stabil. Untuk sampel serbuk, gunakan kaca *holder* dengan perekat tipis atau *back loading* agar permukaan rata.
- c. Memasukkan *sample holder* ke dalam ruang pengukuran XRD dan menutup pelindung radiasi sesuai prosedur keselamatan.
- d. Mengatur parameter pengujian pada perangkat lunak, meliputi: Rentang sudut 2θ (misalnya 20° – 90°), kecepatan pemindaian (scan speed), tegangan dan arus sumber sinar-X (misalnya 40 kV, 30 mA), target anoda (misalnya Cu K α , $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$).
- e. Menjalankan proses pemindaian XRD hingga pola difraksi terbentuk.
- f. Menyimpan hasil berupa pola difraksi (*diffraction pattern*) untuk dianalisis lebih lanjut.
- g. Melakukan analisis fasa kristal menggunakan perangkat lunak basis data seperti profex untuk mencocokkan puncak difraksi dengan fasa yang ada.

- h. Mendokumentasikan hasil pengujian, termasuk grafik pola difraksi, tabel puncak 2θ , intensitas relatif, serta identifikasi fasa.

3.5 Diagram Alir Penelitian



S

Gambar 3.17 Diagram alir penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- 5.1.1** Proses *novel quenching tempering* (NQT) mampu mengubah mikrostruktur baja *martensit* 9Cr18Mo. Pada awalnya, baja memiliki struktur *martensit* yang seragam dengan permukaan cukup rata. Setelah melalui proses NQT, strukturnya berubah menjadi *tempered martensit* yang lebih stabil, disertai pembentukan karbida sekunder (karbida kromium) yang tersebar merata di seluruh permukaan. Perubahan ini menunjukkan bahwa telah terjadi transformasi mikrostruktur yang baik akibat penyebaran kembali atom karbon selama proses *tempering*.
- 5.1.2** Mikrostruktur baja 9Cr18Mo dari proses NQT menunjukkan peningkatan kekuatan mekanik yang signifikan (tegangan luluh meningkat dari 528 MPa menjadi 1222 MPa dan tegangan maksimum dari 699 MPa menjadi 1677 MPa) namun buruk terhadap ketahanan perambatan retak fatik, dimana umur fatik menurun drastis dari 290.936 siklus (tanpa perlakuan) menjadi 75.263 siklus (QT) akibat sifat material yang menjadi lebih getas.
- 5.1.3** Proses *novel quenching tempering* berhasil mencapai peningkatan kekerasan yang sangat signifikan dari 220-260 HV (tanpa perlakuan) menjadi 600-650 HV (NQT) dengan distribusi kekerasan yang merata hingga kedalaman 2 mm, namun belum mencapai keseimbangan optimal dengan ketahanan fatik karena terjadi penurunan elongasi dari 17,993% menjadi 1,5302% dan penurunan modulus of toughness dari 119 J/mm² menjadi 16 J/mm², sehingga diperlukan optimasi parameter proses lebih lanjut.

5.1.4 Perbandingan performa menunjukkan bahwa baja 9Cr18Mo yang diproses dengan metode NQT memiliki kekuatan mekanik yang baik dengan peningkatan kekerasan sebesar 150-180%, kekuatan tarik sebesar 140%, dan strain hardening exponent yang lebih tinggi (0,4721 vs 0,1333), namun mengalami penurunan signifikan dalam ketahanan fatik sebesar 74% dan elongasi sebesar 91,5% dibandingkan tanpa perlakuan, mengindikasikan bahwa metode NQT efektif untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi namun kurang cocok untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan fatik jangka panjang.

5.2 Saran

- 5.2.1** Proses *quenching tempering* dioptimalkan lebih lanjut untuk mencapai keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan mekanik, ketangguhan, dan ketahanan terhadap perambatan retak fatik.
- 5.2.2** Penyesuaian parameter perlakuan panas, seperti suhu *tempering* atau durasi proses, perlu dipertimbangkan agar dapat memaksimalkan sifat mekanik material tanpa mengorbankan ketahanannya.
- 5.2.3** Melakukan pengujian ketahanan korosi untuk memastikan performa baja 9Cr18Mo.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboumou, L. D., Hénaff, G., Arzaghi, M., & Pommier, S. (2014). Fatigue Crack Growth in a Precipitation-Hardened Martensitic Stainless Steel: Influence of Ageing, Temperature and Loading History. *Advanced Materials Research*, 891–892, 961–966. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.961>
- Al-Dulaimi, M. J., Hamad, F. A., Abdul Rasool, A. A., & Ameen, K. A. (2019). Effect of sand particles on flow structure of free jet from a nozzle. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(3), 5542–5561. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.3.2019.21.0447>
- Amiruddin, A., & Alisyahnara Lubis, F. (2018). MEKANIK. In *Teknik Mesin ITM* (Vol. 4, Issue 2).
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315370293>
- Badamian, A., Iwamoto, C., Sato, S., & Tashiro, S. (2019). Interface Characterization of Ultrasonic Spot-Welded Mg Alloy Interlayered with Cu Coating. *Metals*, 9(5), 532. <https://doi.org/10.3390/met9050532>
- Barsom, J., & Rolfe, S. (1999). *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics, Third Edition*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/MNL41-3RD-EB>
- Budinski dan Michael K. (2010). *Engineering materials: properties and selection*. 10.
- Callister, W. D. (2017). Materials science and engineering: An introduction. *Materials & Design*, 12(1). [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(91\)90101-9](https://doi.org/10.1016/0261-3069(91)90101-9)
- Dai, Y., Wang, S., He, Q., Liu, C., Wang, X., Li, X., Li, L., Liu, Y., He, C., & Wang, Q. (2023). Effect of microstructure on slip-induced crack initiation and early propagation of martensitic steel during high cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 167, 107275. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107275>
- Das, D., Dutta, A. K., & Ray, K. K. (2010). Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. *Materials Science and Engineering: A*, 527(9), 2182–2193. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.070>
- Dong, M., Cui, X., Jin, G., Wang, H., Cai, Z., & Song, S. (2018). Improved microstructure and properties of 12Cr2Ni4A alloy steel by vacuum carburization and Ti + N co-implantation. *Applied Surface Science*, 440, 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.171>

- Elshaer, R. N., Ibrahim, K. M., Ibrahim, M. M., & Sobh, A. S. (2021). Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Carbon Steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10(4), 485–495. <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00757-3>
- Escrivà-Cerdán, C., Ooi, S. W., Joshi, G. R., Morana, R., Bhadeshia, H. K. D. H., & Akid, R. (2019). Effect of tempering heat treatment on the CO₂ corrosion resistance of quench-hardened Cr-Mo low-alloy steels for oil and gas applications. *Corrosion Science*, 154(February), 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.036>
- Fengbin, L., Guohao, F., Yan, C., Qiguo, S., Min, Q., & Yi, S. (2013a). Tribological properties and surface structures of ion implanted 9Cr18Mo stainless steels. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 307, 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.115>
- Fengbin, L., Guohao, F., Yan, C., Qiguo, S., Min, Q., & Yi, S. (2013b). Tribological properties and surface structures of ion implanted 9Cr18Mo stainless steels. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 307, 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.115>
- Guo, H., Yang, S., Wang, T., Yuan, H., Zhang, Y., & Li, J. (2022). Microstructure evolution and acicular ferrite nucleation in inclusion-engineered steel with modified MgO@C nanoparticle addition. *Journal of Materials Science & Technology*, 99, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.02.033>
- Hao, Q., Qin, S., Liu, Y., Zuo, X., Chen, N., Huang, W., & Rong, Y. (2016). Effect of retained austenite on the dynamic tensile behavior of a novel quenching-partitioning-tempering martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 662, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.007>
- He, Q. B., Wang, D. Z., Zhao, A. H., Tang, R., Liu, H. D., Chen, D. H., & Mo, Y. (2018). Effect of triple smelting process on the purity and microstructure of 9Cr18Mo bearing steel. *Materials Science Forum*, 914, 132–139. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.914.132>
- Hrabe, N., White, R., & Lucon, E. (2019). Effects of internal porosity and crystallographic texture on Charpy absorbed energy of electron beam melting titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Materials Science and Engineering: A*, 742, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.005>
- Huang, L.-Z., Huang, B.-K., Ye, Q., & Qin, L.-P. (2011). Bioactivity-guided fractionation for anti-fatigue property of *Acanthopanax senticosus*. *Journal of Ethnopharmacology*, 133(1), 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.09.032>

- Hwang, S. W., Ji, J. H., Lee, E. G., & Park, K.-T. (2011). Tensile deformation of a duplex Fe–20Mn–9Al–0.6C steel having the reduced specific weight. *Materials Science and Engineering: A*, 528(15), 5196–5203. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.045>
- Jin, Z.-Z., Zha, M., Wang, H.-Y., Ma, J.-G., & Liu, Y.-C. (2023). Achieving remarkable enhancement of yield strength and high ductility in a fine-grained Mg-6Zn-0.2Ca alloy via rotated hard-plate rolling. *Materials & Design*, 234, 112345. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112345>
- Kapito, A., Mostert, R. J., Stumpf, W. E., & Siyasiya, C. W. (2019). Carbide-free bainitic steels for rail wheel applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 655, 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/655/1/012012>
- Kondoh, K., Ichikawa, E., Issariyapat, A., Shitara, K., Umeda, J., Chen, B., & Li, S. (2020). Tensile property enhancement by oxygen solutes in selectively laser melted titanium materials fabricated from pre-mixed pure Ti and TiO₂ powder. *Materials Science and Engineering: A*, 795, 139983. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139983>
- Kowathanakul, N., Yu, Q., Zhu, C., Li, X., Minor, A. M., & Ritchie, R. O. (2022). Fatigue-crack propagation behavior in a high-carbon chromium SUJ2 bearing steel: Role of microstructure. *International Journal of Fatigue*, 156, 106693. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106693>
- Lan, L., Chang, Z., & Fan, P. (2018). Exploring the Difference in Bainite Transformation with Varying the Prior Austenite Grain Size in Low Carbon Steel. *Metals*, 8(12), 988. <https://doi.org/10.3390/met8120988>
- Lou, B., & Averbach, B. L. (1983). The effects of heat treatment on fracture toughness and fatigue crack growth Rates in 440C and BG42 steels. *Metallurgical Transactions A*, 14(9), 1899–1906. <https://doi.org/10.1007/BF02645561>
- Mohammed, J. H. M., & Al-hashimy, Z. I. A.-H. (2021). Effect of Different Quenching Media on Microstructure, Hardness, and Wear Behavior of Steel Used in Petroleum Industries. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 8(2), 199–208. <https://doi.org/10.52716/jprs.v8i2.244>
- Noji, H. (2007). Self-field losses in 1m HTS conductor consisted of YBCO tapes. *Cryogenics*, 47(5–6), 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2007.04.001>
- Prabha, K. A., Putha, P. K., & Prasad, B. S. (2018). Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18535–18543. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.196>

- Ragavendran, M., Kumar, J. G., & Vasudevan, M. (2022). Evaluation of tensile properties using uni-axial and ball indentation testing and correlation with microstructure variations across the 316LN stainless steel weld joints. *Materials Science and Engineering: A*, 832, 142445. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142445>
- Ritchie, R. O., Knott, J. F., & Rice, J. R. (1919). On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 21(6), 395–410. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(73\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(73)90008-2)
- Saefuloh, I., Zahrawani, A., Adjiantoro, B., & Diterima, N. (2018). *Pengaruh Proses Quenching Dan Tempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah Dengan Paduan Laterit INFORMASI ARTIKEL ABSTRAK: Vol. IV (Issue 1)*. <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jwl>
- Scott, C. P., Shalchi Amirkhiz, B., Pushkareva, I., Fazeli, F., Allain, S. Y. P., & Azizi, H. (2018). New insights into martensite strength and the damage behaviour of dual phase steels. *Acta Materialia*, 159, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.08.010>
- Shen, Y., Moghadam, S. M., Sadeghi, F., Paulson, K., & Trice, R. W. (2015). Effect of retained austenite – Compressive residual stresses on rolling contact fatigue life of carburized AISI 8620 steel. *International Journal of Fatigue*, 75, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.02.017>
- Stoychev, S., & Kujawski, D. (2008). Crack-tip stresses and their effect on stress intensity factor for crack propagation. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(8), 2469–2479. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.07.019>
- Tsuji, K., Injuk, J., & Van Grieken, R. (Eds.). (2004). *X-Ray Spectrometry: Recent Technological Advances*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470020431>
- Wang, R., Li, F., Yu, Z., Kang, Y., Li, M., Hu, Y., An, H., Fan, J., Miao, F., Zhao, Y., Eckert, J., & Yan, Z. (2023a). Influences of partial substitution of C by N on the microstructure and mechanical properties of 9Cr18Mo martensitic stainless steel. *Materials and Design*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112497>
- Wang, R., Li, F., Yu, Z., Kang, Y., Li, M., Hu, Y., An, H., Fan, J., Miao, F., Zhao, Y., Eckert, J., & Yan, Z. (2023b). Influences of partial substitution of C by N on the microstructure and mechanical properties of 9Cr18Mo martensitic stainless steel. *Materials & Design*, 236, 112497. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112497>

- Wang, X. L., Huang, A. R., Shang, C. J., & Xie, Z. J. (2022a). Characterization of the cladding layer by laser cladding of 9Cr18Mo powder on 3Cr14 martensitic stainless steel and the impact of martensite obtained through post heat treatment on hardness. *Materials Today Communications*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104057>
- Wang, X. L., Huang, A. R., Shang, C. J., & Xie, Z. J. (2022b). Characterization of the cladding layer by laser cladding of 9Cr18Mo powder on 3Cr14 martensitic stainless steel and the impact of martensite obtained through post heat treatment on hardness. *Materials Today Communications*, 32, 104057. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104057>
- Wang, X. L., Wang, Z. Q., Huang, A. R., Wang, J. L., Li, X. C., Subramanian, S. V., Shang, C. J., & Xie, Z. J. (2020). Contribution of grain boundary misorientation to intragranular globular austenite reversion and resultant in grain refinement in a high-strength low-alloy steel. *Materials Characterization*, 169, 110634. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110634>
- Wang, Y., Song, R., Yanagimoto, J., & Li, Y. (2019). Wear and corrosion behavior of functionally graded semi-solid 9cr18mo steel. *Solid State Phenomena*, 285 SSP, 92–98. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.285.92>
- Wildeis, A., Christ, H.-J., & Brandt, R. (2022). Influence of Residual Stresses on the Crack Initiation and Short Crack Propagation in a Martensitic Spring Steel. *Metals*, 12(7), 1085. <https://doi.org/10.3390/met12071085>
- Xu, S. S., Li, J. P., Cui, Y., Zhang, Y., Sun, L. X., Li, J., Luan, J. H., Jiao, Z. B., Wang, X.-L., Liu, C. T., & Zhang, Z. W. (2020). Mechanical properties and deformation mechanisms of a novel austenite-martensite dual phase steel. *International Journal of Plasticity*, 128, 102677. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102677>
- Zhang, K., Zhang, M., Guo, Z., Chen, N., & Rong, Y. (2011). A new effect of retained austenite on ductility enhancement in high-strength quenching-partitioning-tempering martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29–30), 8486–8491. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.049>
- Zhang, W., Wang, X., Chen, H., Zhang, T., & Gong, J. (2019). Evaluation of the effect of various prior creep-fatigue interaction damages on subsequent tensile and creep properties of 9%Cr steel. *International Journal of Fatigue*, 125, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.018>
- Zhao, X., Zhang, X., Zhou, J., Chen, Y., Zhang, F., Zhang, J., & Yan, Q. (2025). Direct quenching and double tempering obtain high strength and toughness of Cu-bearing HSLC martensitic steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.006>

- Zheng, C., Fu, B., Tang, Y., Kong, L., Wang, Y., & Li, N. (2023a). Microstructure and mechanical properties of 9Cr18Mo martensitic stainless steel fabricated by strengthening-toughening treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 869, 144783. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144783>
- Zheng, C., Fu, B., Tang, Y., Kong, L., Wang, Y., & Li, N. (2023b). Microstructure and mechanical properties of 9Cr18Mo martensitic stainless steel fabricated by strengthening-toughening treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 869. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144783>
- Zheng, Y., Wang, F., Li, C., Lin, Y., & Cao, R. (2019). Effect of Martensite Structure and Carbide Precipitates on Mechanical Properties of Cr-Mo Alloy Steel with Different Cooling Rate. *High Temperature Materials and Processes*, 38(2019), 113–124. <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0018>