

**PENGARUH TEMPERATUR *STRESS RELIEF ANNEALING*
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN TARIK
BAJA KARBON RENDAH AISI 1006 SETELAH MENGALAMI
*COLD ROLLING***

(Skripsi)

Oleh:

MUHAMMAD NABIIL FAIQ ARKAAN

2115021034



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

**PENGARUH TEMPERATUR *STRESS RELIEF ANNEALING*
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN TARIK
BAJA KARBON RENDAH AISI 1006 SETELAH MENGALAMI
*COLD ROLLING***

Oleh

MUHAMMAD NABIIL FAIQ ARKAAN

Skripsi

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

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



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

ABSTRAK

PENGARUH TEMPERATUR *STRESS RELIEF ANNEALING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN TARIK BAJA KARBON RENDAH AISI 1006 SETELAH MENGALAMI *COLD ROLLING*

Oleh:

Muhammad Nabiil Faiq Arkaan

Baja karbon rendah AISI 1006 banyak digunakan dalam industri manufaktur karena memiliki keuletan dan kemampuan bentuk yang baik. Namun, proses *cold rolling* dapat menimbulkan tegangan sisa yang mempengaruhi sifat mekanik material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur *stress relief annealing* terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro baja AISI 1006 setelah *cold rolling*. Variasi temperatur *annealing* yang digunakan adalah tanpa perlakuan panas, 450°C, 575°C, dan 700°C dengan waktu penahanan selama 7 jam. Pengujian tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM E8 dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur annealing menyebabkan penurunan kekuatan tarik, dari 378,992 N/mm² pada spesimen tanpa perlakuan panas menjadi 376,491 N/mm², 364,581 N/mm², dan 352,646 N/mm² masing-masing pada temperatur 450°C, 575°C, dan 700°C. Struktur mikro menunjukkan pembesaran ukuran butir akibat proses pemulihan dan rekristalisasi. Dapat disimpulkan bahwa *stress relief annealing* efektif meningkatkan keuletan yang ditandai dengan meningkatnya regangan putus.

Kata kunci: AISI 1006, *stress relief annealing*, *cold rolling*, kekuatan tarik, struktur mikro.

ABSTRACT

EFFECT OF STRESS RELIEF ANNEALING TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND TENSILE STRENGTH OF COLD- ROLLING AISI 1006 LOW-CARBON STEEL

By

Muhammad Nabiil Faiq Arkaan

Low carbon steel AISI 1006 is widely used in manufacturing due to its good ductility and formability; however, cold rolling induces residual stress that affects its mechanical properties. This study investigates the effect of stress relief annealing temperature on the tensile strength and microstructure of cold-rolled AISI 1006 steel. Annealing was performed at no heat treatment, 450°C, 575°C, and 700°C with a holding time of 7 hours. Tensile testing followed ASTM E8 standards, and microstructural observations were conducted using an optical microscope. The results show that tensile strength decreases with increasing annealing temperature, from 378.992 N/mm² (untreated) to 376.491 N/mm², 364.581 N/mm², and 352.646 N/mm² at 450°C, 575°C, and 700°C, respectively. Microstructural analysis revealed grain coarsening due to recovery and recrystallization. These results indicate that stress relief annealing effectively increases ductility, as indicated by the increase in fracture strain.

Keywords: AISI 1006 steel, stress relief annealing, cold rolling, tensile strength, microstructure.

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi

**PENGARUH TEMPERATUR STRESS
RELIEF ANNEALING TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN
TARIK BAJA KARBON RENDAH AISI 1006
SETELAH MENGALAMI COLD ROLLING**

Mahasiswa

Muhammad Nabiil Faiq Arkaan

Nomor Pokok Mahasiswa

/2115021034

Fakultas

: Teknik



Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M. Met.

NIP. 197402021999102001

Pembimbing 1

Zulhanim, S.T., M.T.

NIP. 197304022000031002

Ketua Program Studi

SI Teknik Mesin

Ketua Jurusan

Teknik Mesin

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

NIP. 197408162000121001

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

NIP. 197908212003121003

MENGESETAHKAN

1. Tim Pengaji

Ketua

Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.M.

Anggota Pengaji

Zulhanif, S.T., M.T.

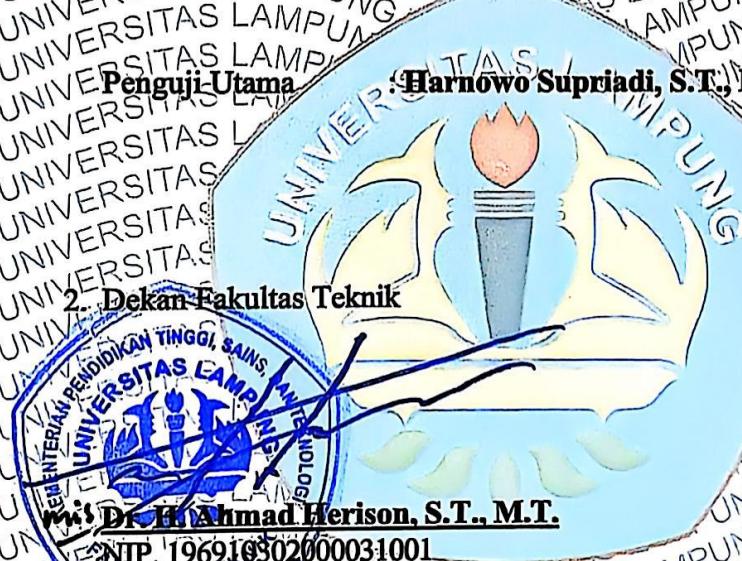
Pengaji Utama

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

2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIP. 1969100200031001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 21 Januari 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul “**Pengaruh Temperatur Stress Relief Annealing Terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah AISI 1006 Setelah Mengalami Cold Rolling**” ini dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur dalam pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan peraturan Rektor no 13. Tahun 2019.

Bandar Lampung, 03 Februari 2026

Pembuat Pernyataan,



Muhammad Nabil Faiq Arkaan
NPM. 2115021034

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Rangkasbitung pada 12 Mei 2003, anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Aries Munandar dan Ibu Tuting Kurniati. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Negeri 1 Rangkasbitung Barat (2015), SMP Negeri 1 Rangkasbitung (2018), dan SMA Negeri 1 Rangkasbitung (2021). Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui SBMPTN.

Selama kuliah, penulis aktif di organisasi, menjadi anggota HIMATEM Universitas Lampung (2022/2023) dan staff humas Koperasi Mahasiswa Universitas Lampung (2023/2024). Penulis juga mengikuti program magang di PT. Bukit Asam dan PT. Krakatau Steel, serta Magang Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di PT Adi Sarana Armada.

Penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. Krakatau Steel pada tahun 2024 dengan judul “Analisis Sifat Mekanis *Cold Rolling Coil* yang Mengalami Perlakuan Panas *Annealing*”. Pada tahun 2025, penulis melakukan penelitian skripsi dengan judul “Pengaruh Temperatur *Stress Relief Annealing* terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah AISI 1006 Setelah Mengalami *Cold Rolling*” di bawah bimbingan ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. dan bapak Zulhanif, S.T., M.T., serta pembahas bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T.

MOTTO

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal itu baik bagimu”

QS. Al-Baqarah: 216

“Barang siapa yang bersungguh-sungguh, ia akan sampai”

Imam Syafi'i

“It's not that I'm so smart, it's just that I stay with problems longer”

Albert Einstein

“Habis gelap terbitlah terang”

R.A. Kartini

HALAMAN PERSEMBAHAN



Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Sholawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan sepanjang zaman.

KARYA TULIS INI PENULIS PERSEMBAHKAN KEPADA

Ibu dan Bapak

Penulis menyampaikan rasa hormat dan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada keluarga, yang senantiasa menjadi sumber kekuatan dan inspirasi.

Dukungan moral, do'a, perhatian, serta pengorbanan yang diberikan tanpa henti telah menjadi fondasi penting dalam setiap langkah yang penulis tempuh. Segala pencapaian dalam karya ini tidak terlepas dari peran dan kontribusi mereka yang tidak ternilai.

Teknik Mesin Angkatan 2021

Ucapan terimakasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan seperjuangan yang telah memberikan dukungan, semangat, dan kerja sama selama masa perkuliahan. Kebersamaan dalam menghadapi berbagai tantangan akademik, berbagi pengetahuan, serta paling memotivasi menjadi bagian penting dalam proses pencapaian ini.

Serta

Almamater, Universitas Lampung dan Jurusan Teknik Mesin

SANWACANA

Puji Syukur saya ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Temperatur *Stress Relief Annealing* Terhadap Struktur Mikro Dan Kekuatan Tarik Baja Karbon Reildah Aisi 1006 Setelah Mengalami *Cold Rolling*” dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Penulis sejatinya menyadari akan kekurangan atau keterbatasan, pengetahuan, pengalaman dan kemampuan yang Penulis miliki. namun terlepas dari itu, Penulis memiliki harapan agar tulisan ini dapat bermanfaat bagi berbagai macam pihak dan dapat memberi sumbangsih pemikiran bagi bidang akademis dan bidang lainnya, melalui kesempatan ini pula Penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih atas kritikan, saran, bimbingan, serta petunjuk-petunjuk dari semua pihak yang sangat Penulis harapkan guna kelengkapan dan penyempurnaan Skripsi ini. Penulis tidak akan berhasil dengan baik tanpa ada bantuan dan dukungan dari berbagai pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.

4. Ir. Arinal Hamni, M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama melaksanakan perkuliahan serta membantu segala permasalahan akademik yang dialami penulis.
5. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku dosen pembimbing utama atas kesediaannya dalam membimbing serta memberikan masukan dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
6. Bapak Zulhanif, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah kalian berikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
9. Kepada kedua orang tua penulis yang sangat penulis sayangi sehingga tugas akhir ini ditulis dengan senantiasa diselimuti suka, bapak Aries Munandar dan ibu Tuting Kurniati yang selalu mendukung, mendoakan, memberi motivasi, merestui, menyemangati, dan memberikan segalanya dengan tulus dan ikhlas dari mula perkuliahan sampai pada tugas akhir ini selesai ditulis untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin.
10. Kedua adik penulis Ahmad Fahri Azhar dan Ahmad Nazwan Kamil yang turut menjadi salah satu alasan tugas akhir ini bisa terselesaikan.
11. Kepada seorang yang terus ada mendukung dan mendoakan penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini dari awal, Dinnisa Tiara Annastasya terima kasih atas kesabaran dan dukungan yang diberikan juga senantiasa bersedia menjadi teman diskusi disaat penulis mengalami kesulitan selama proses penggerjaan.

12. Terkhusus saya ucapkan untuk diri saya sendiri sebagai penulis tugas akhir ini yang mampu bertahan menyelesaikan kewajiban sebagai mahasiswa sampai tugas akhir ini ditulis khususnya selama satu tahun ke belakang. Harapan kedepannya agar semua kesalahan yang ada bisa dijadikan pembelajaran dan apa yang didapat bisa bermanfaat.
13. Teman diskusi sekaligus keluarga diperantauan, Fitra, Sajid, Revi, Ardika, Abel, Santri, dan Roni, yang banyak membantu, mendukung, dan menyemangati penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan sampai akhir.
14. Teman-teman laboratorium mekanika struktur yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.
15. Tidak lupa ucapan terima kasih kepada keluarga besar PT. ASSA dimana tempat penulis sebelumnya magang sampai sempat dipercaya untuk bekerja kembali.
16. Teman-teman jurusan Teknik Mesin terkhusus angkatan 2021 yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung, 03 Februari 2026

Penulis,



Muhammad Nabii Faiq Arkaan
NPM. 2115021034

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	7
1.3 Batasan Masalah.....	7
1.4 Manfaat Penelitian.....	8
1.5 Hipotesis	8
1.6 Sistematika Penulisan.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Baja Karbon.....	10
2.1.1 Baja Karbon Tinggi.....	10
2.1.2 Baja Karbon Sedang	11
2.1.3 Baja Karbon Rendah.....	12
2.2 Pengaruh Komposisi Kimia Terhadap Baja.....	14
2.2.1 Karbon (C)	14
2.2.2 Mangan (Mn)	14
2.2.3 Khrom (Cr)	15
2.2.4 Nikel (Ni).....	15
2.2.5 Silikon (Si).....	16
2.2.6 Fosfor (P) dan Sulfur (S)	16

2.3 Baja AISI 1006	17
2.4 <i>Heat treatment</i>	18
2.4.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi <i>Heat treatment</i>	20
2.4.2 <i>Quenching</i>	20
2.4.3 <i>Tempering</i>	22
2.4.4 <i>Annealing</i>	22
2.5 <i>Hot working</i>	28
2.6 <i>Cold working</i>	28
2.6.1 <i>Continuous Pickling Line</i> (CPL)	29
2.6.2 <i>Continuous Tandem Cold Mill</i> (CTCM)	29
2.6.1 <i>Electronic Cleaning Line</i> (ECL 1).....	30
2.6.2 <i>Electronic Cleaning Line</i> 2 (ECL 2).....	31
2.7 <i>Holding time</i>	32
2.8 <i>Continuous-Cooling Transformation Diagrams</i>	33
2.9 Struktur Mikro.....	34
2.9.1 Ferit.....	36
2.9.2 Pearlite	36
2.9.3 Austenite	37
2.9.4 Martensite	38
2.10 Pengamatan Metalografi.....	39
2.11 Pengujian Tarik	39
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	41
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	41
3.2 Bahan Penelitian.....	41
3.2.1 Baja AISI 1006	41
3.2.2 Spesimen Uji Tarik	42
3.3 Alat Penelitian	42

3.3.1 <i>Furnace</i>	42
3.3.2 <i>Laser Cutting</i>	43
3.3.3 Amplas	44
3.3.4 Autosol.....	45
3.3.5 Alat Uji Tarik Mesin <i>GD-1100-100</i>	45
3.3.6 Mikroskop Olympus BX53M	46
3.4 Metode Penelitian.....	47
3.4.1 Persiapan Spesimen	48
3.4.2 Perlakuan Panas	48
3.4.3 Uji Tarik.....	48
3.4.4 Pengamatan Struktur Mikro.....	49
3.4.5 Pengambilan Data.....	49
3.5 Diagram Alir.....	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1 Data Material Penelitian	51
4.1.1 Komposisi Kimia Baja AISI 1006	51
4.2 Proses <i>Cold working</i> Baja AISI 1006.....	52
4.2.1 <i>Continues Pickling Line</i> (CPL).....	52
4.2.2 <i>Continous tandem cold mill</i> (CTCM)	54
4.3 Data Spesimen Baja AISI 1006	57
4.4 Perlakuan pada Baja AISI 1006.....	57
4.4.1 Proses Heating Baja AISI 1006	57
4.4.2 Proses Pendinginan	59
4.5 Pengujian Tarik.....	61
4.6 Struktur Mikro Baja AISI 1006	80
4.6.1 Struktur Mikro Variasi Tanpa Perlakuan Panas	82
4.6.2 Struktur Mikro Variasi Temperatur 450°C.....	83

4.6.3 Struktur Mikro Variasi Temperatur 575 °C	85
4.6.4 Struktur Mikro Variasi Temperatur 700 °C.....	86
4.7 Struktur Makro Baja AISI 1006	89
4.7.1 Struktur Makro Variasi Tanpa Perlakuan Panas.....	89
4.7.2 Struktur Makro Variasi Temperatur 450 °C	90
4.7.3 Struktur Makro Variasi Temperatur 575 °C	91
4.7.4 Struktur Makro Variasi Temperatur 700 °C	92
BAB V PENUTUP.....	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran	94
DAFTAR PUSTAKA.....	95
LAMPIRAN.....	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Skematik Proses Perlakuan Panas	18
Gambar 2.2 Diagram fase karbida besi-besi di sekitar eutektoid, yang menunjukkan kisaran suhu perlakuan panas untuk baja karbon biasa.....	25
Gambar 2.3 Proses produksi CPL	29
Gambar 2.4 Proses Produksi CTCM.....	30
Gambar 2.5 Proses Produksi <i>Electrolytic Cleaning Line 1</i> (ECL 1).....	31
Gambar 2.6 Proses Produksi ECL 2.....	31
Gambar 2.7 Diagram TTT (Time Temperature Transformation)	33
Gambar 2.8 Diagram <i>Continuous Cooling Transformation</i>	34
Gambar 2.9 Diagram Phasa Iron-Carbon.....	35
Gambar 2.10 Keuletan (%RA) sebagai fungsi konsentrasi karbon untuk baja karbon biasa yang mempunyai mikrostruktur perlit halus dan kasar serta sfroidit	37
Gambar 2.11 Kekerasan (pada suhu kamar) sebagai fungsi konsentrasi karbon untuk baja martensit karbon biasa, baja martensit temper [ditemper pada suhu 371°C (700°F), dan baja perlitik.]	38
Gambar 2.12 Diagram Tegangan Regangan	40
Gambar 3.1 Baja AISI 1006.....	42
Gambar 3.2 Dimensi Spesimen Uji Tarik	42
Gambar 3.3 Furnace	43
Gambar 3.4 Laser Cutting	44
Gambar 3.5 Amplas.....	44
Gambar 3.6 Autosol	45
Gambar 3. 7 Alat Uji Tarik.....	45
Gambar 3.8 Mikroskop Olympus BX53M	46
Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian.....	50
Gambar 4.1 Grafik Pendingian setelah Soak	61
Gambar 4.2 Grafik Elongation Force Sampel Tanpa perlakuan	63
Gambar 4.3 Grafik Stress Strain Sampel Tanpa Perlakuan.....	64
Gambar 4.4 Grafik Elongation Force Variasi 450 °C	66

Gambar 4.5 Grafik Stress Strain Sampel Temperatur 450 °C.....	67
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Elongation Force Variasi 575 °C	69
Gambar 4.7 Grafik Stress Strain Sampel 575 °C	70
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Elongation Force Variasi 700 °C	72
Gambar 4.9 Grafik Stress Strain Sampel 700 °C	73
Gambar 4.10 UTS Versus Temperatur Annealing AISI 1006	73
Gambar 4.11 Yield strength Versus Temperatur Annealing AISI 1006.....	74
Gambar 4.12 Regangan Versus Temperatur Annealing AISI 1006.....	75
Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan Lower dan Upper Yield Tiap Sampel.....	77
Gambar 4.14 Struktur Mikro Tanpa Perlakuan Panas.....	82
Gambar 4.15 Struktur Mikro Variasi Temperatur 450 °C	83
Gambar 4.16 Struktur Mikro Variasi Temperatur 575 °C	85
Gambar 4.17 Struktur Mikro Variasi Temperatur 700 °C	87
Gambar 4. 18 Struktur Makro Variasi Tanpa Perlakuan Panas	89
Gambar 4. 19 Struktur Makro Variasi Temperatur 450 °C	90
Gambar 4. 20 Struktur Makro Variasi Temperatur 575 °C	91
Gambar 4. 21 Struktur Makro Variasi Temperatur 700 °C	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja Karbon Rendah (Matweb, 2024)	12
Tabel 2.2 Tabel Mechanical Properties Baja Karbon Rendah (Matweb, 2024)	13
Tabel 2.3 Komposisi Kimia Baja AISI 1006 (Database PT. Krakatau Steel)	17
Tabel 2.4 Data Properties Baja yang Mengalami <i>Hot rolled</i> dan <i>Cold Drawn</i> (Davis, 1998).....	18
Tabel 3.1 Spesifikasi Furnace	43
Tabel 3. 2 Spesifikasi Alat Uji Tarik	46
Tabel 3.3 Spesifikasi Mikroskop Olympus BX53M	47
Tabel 3.4 Parameter Pengujian Uji Tarik	49
Tabel 3.5 Data Hasil Uji Tarik (Yu et al., 2024).....	49
Tabel 4.1 Tabel Komposisi Kimia Baja AISI 1006	51
Tabel 4.2 Tabel Spesifikasi Proses CPL	53
Tabel 4.3 Tabel Spesifikasi Proses CTCM.....	55
Tabel 4.4 Spesifikasi Spesimen Berdasarkan Standar ASTM E8	57
Tabel 4.5 Tabel Heating Baja AISI 1006.....	58
Tabel 4.6 Tabel Pendinginan Baja AISI 1006	59
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Tarik Sampel No Heat (Tanpa Perlakuan)	62
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Tarik Sample 450 °C.....	65
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Tarik Sampel 575 °C.....	68
Tabel 4.10 Hasil Pengujian Tarik Sampel 700 °C.....	71
Tabel 4.11 Nilai Upper Yield Point dan Lower Yield Point.....	76
Tabel 4.12 Data Hasil Nilai Young Modulus	78
Tabel 4. 13 Data Hasil Toughness	79
Tabel 4. 14 Data Ukuran Butir Sampel Tanpa Perlakuan Panas Perbesaran 200x	82
Tabel 4. 15 Data Ukuran Butir Sampel Temperatur 450 °C Perbesaran 200x	84
Tabel 4. 16 Data Ukuran Butir Sampel Temperatur 575 °C Perbesaran 200x	85
Tabel 4. 17 Data Ukuran Butir Sampel Temperatur 700 °C Perbesaran 200x	87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan permintaan pasar terhadap suatu produk yang memiliki nilai kualitas tinggi mendorong khususnya industri manufaktur untuk dapat menciptakan produk yang berkualitas dan mempunyai *cost of production* yang seminimal mungkin (Muliastri et al., 2022). Perkembangan industri saat ini, logam merupakan salah satu material yang penggunaannya sangat luas dan banyak digunakan dalam berbagai keperluan. Logam yang paling banyak digunakan salah satunya adalah baja. Baja merupakan bahan dasar yang sering digunakan untuk berbagai rekayasa teknik, salah satunya adalah plat baja karbon (Abdunnaser, 2015).

Saat ini, logam besi dan baja paling banyak dipakai sebagai bahan industri. Besi dan baja banyak digunakan dikarenakan logam besi dan baja merupakan sumber daya alam yang masih cukup banyak dijumpai. Baja telah digunakan dalam berbagai aplikasi karena fasilitas untuk mendapatkannya dan juga untuk sifat berbeda yang diperoleh dengan proses perlakuan panas, termasuk biaya yang rendah, dengan mempertimbangkan bahan baku dan produksi baja di seluruh dunia sekitar 6.109 ton per tahun. Baja adalah paduan Fe-C (kandungan carbon maksimum sekitar 2%) yang dapat mengandung elemen paduan lainnya, sesuai dengan aplikasinya. Bahkan variasi rendah dalam komposisi tersebut dapat menyebabkan perbedaan besar dalam sifat mekanik, karena struktur akhir dapat berubah sesuai dengan pengolahan manufaktur dan juga siklus perlakuan panas yang

diterapkan. Pada aplikasi industri pembentukan lembaran baja mencari bahan dengan potensi deformasi plastis dan kekuatan tinggi (Qudzsy et al., 2020). Baja merupakan material yang sering digunakan dalam dunia industri. Contoh penggunaan baja yaitu pada industri otomotif, perkapalan, permesinan, dan industri lainnya (Novitasari & Muliastri, 2023).

Pembentukan lembaran baja untuk memperoleh bahan yang memiliki sifat kekuatan tinggi dan deformasi plastis untuk berbagai aplikasi dapat dilakukan dengan teknik perlakuan panas. Secara umum, teknik ini diterapkan pada baja karbon rendah. Hal ini dikarenakan baja karbon rendah memiliki keuletan tinggi dan mudah *dimachining*, tetapi tidak tahan aus. Baja AISI 1006 termasuk baja karbon rendah dengan kadar karbon sebesar 0.0721% (Sari et al., 2018).

Baja merupakan suatu campuran dari besi (Fe) dan karbon (C), dimana unsur karbon (C) menjadi dasar. Disamping unsur Fe Dan C, baja juga mengandung unsur campuran lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi (Istiqlaliyah & Rhohman, 2016). Secara umum baja karbon adalah baja dengan unsur utamanya besi dan unsur karbon. Kadar karbon untuk baja karbon adalah 0,008 sampai 1,7% dengan diikuti unsur-unsur tambahan lain yang tidak bisa dihindari, unsur unsur tersebut antara lain Si, Mn, P, S, dan Cu. Sifat baja karbon sangat kuat tergantung pada kadar karbonnya. Jika dilihat dari kadar karbonnya, baja karbon diklasifikasikan menjadi tiga yaitu, baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon sedang (*medium carbon steel*), dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) (Azimi et al., 2020).

Baja karbon rendah digunakan secara luas dalam konstruksi dan struktur teknik. Sejumlah perusahaan telah mulai memanfaatkan baja karbon rendah dalam bentuk pelat untuk dasar mesin dengan teknik pengelasan. Namun, proses ini menghasilkan *stress* sisa yang rumit karena perbedaan bentuk antara bagian-bagian di area yang berbeda atau fase berbeda. *Stress* ini juga

dapat disebabkan oleh variasi lokal dalam elastisitas, sifat termal, dan mekanik yang ada di dalam material. *Annealing* adalah metode perlakuan panas yang bertujuan untuk mengurangi *stress* tersebut dan memperbaiki struktur mikro baja. Proses ini dilakukan dengan memanaskan baja hingga mendekati suhu Ac1 dan kemudian mendinginkannya secara perlahan di dalam tungku untuk mencapai struktur yang hampir setimbang (Zuo et al., 2022).

Perlakuan panas adalah suatu perlakuan (*treatment*) yang diterapkan pada logam agar diperoleh sifat-sifat yang diinginkan (Gunawan, 2017). Proses perlakuan panas terdiri dari beberapa tahapan, yaitu diawali dengan pemanasan sampai temperatur tertentu, lalu ditahan suhu tersebut hingga waktu tertentu, selanjutnya dilakukan pendinginan dengan laju pendinginan tertentu (Wicaksono et al., 2021). Perlakuan panas mempunyai tujuan untuk meningkatkan keuletan, menghilangkan tegangan internal, menghaluskan butir kristal, meningkatkan kekerasan, tegangan tarik logam dan sejenisnya. Tujuan tersebut akan tercapai jika memperhatikan faktor yang mempengaruhinya, seperti suhu pemanasan dan media pendingin yang digunakan (Qudzsy et al., 2020).

Annealing merupakan proses perlakuan panas yang melunakkan bahan yang menghasilkan perlit kasar dengan cara pemanasan sampai suhu austenisasi dan mendinginkan belahan-lahan dalam *furnace* (Hari Priyambodo et al., 2021). *Annealing* dilakukan pada material yang telah mengalami *cold working* dan *hot working*, pada baja karbon rendah atau kabel-kabel baja untuk menghilangkan tegangan dalam dan perlunakan bahan (Abdunnaser, 2015).

Waktu penahanan atau *holding time* juga sangat mempengaruhi kekerasan saat proses perlakuan panas *heat treatment*. Waktu penahanan yang terlalu singkat menghasilkan kekerasan rendah karena jumlah karbida terlarut yang tidak mencukupi dalam larutan. Sedangkan jika *holding time* terlalu lama

akan terjadi perubahan tetapi mengikuti pertumbuhan butir yang dapat menurunkan kekerasan (Sukarno et al., 2024). *Annealing* merupakan perlakuan panas yang cocok untuk menurunkan kekerasan material dan membuat butir bebas dari tegangan sisa pada baja (Puspasari et al., 2020). Untuk proses pendinginan dalam oven (*Annealing*) telah menyebabkan deformasi struktur dalam baja menjadi struktur pearlite kasar sehingga kekerasan baja rendah (Sari, 2017). Perubahan struktur terjadi dikarenakan kenaikan suhu pemanasan dan waktu pendinginan; maka sifat kekuatan dan kekerasan spesimen baja juga berubah (Sari et al., 2018). Adanya peningkatan kekuatan dan keuletan telah dicapai pada pelat baja tipis melalui pendinginan proses penggulungan dan pemanasan (Yu et al., 2024). Studi telah menunjukkan bahwa variasi suhu anil memberikan pengaruh yang mendalam pada mikrostruktur dan tekstur material yang direkrystalisasi. Dengan peningkatan suhu rekristalisasi, mikrostruktur mengalami proses pemulihan dan rekristalisasi, yang menghasilkan kekurangnya kehilangan besi dan kekuatan mekanis (Wen et al., 2024). Mengatur suhu dan waktu *annealing* dapat mengontrol karakteristik mikrostruktur seperti ukuran butir (Li et al., 2024).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Ilham et al. (2023) yang meneliti mengenai pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja karbon rendah AISI 1018 dimana salah satunya yaitu meneliti perbedaan data antara baja tanpa perlakuan panas dan juga yang mengalami perlakuan panas *quenching*, *annealing*, dan *normalizing*. Didapatkan nilai kekuatan tarik tanpa perlakuan sebesar 1815 MPa, perlakuan panas *quenching* sebesar 2185 MPa, perlakuan panas *annealing* sebesar 1210 MPa, dan dengan perlakuan *normalizing* sebesar 1250 MPa. Sebagai pembanding data baja yang tidak mendapatkan perlakuan panas memiliki nilai kekuatan tarik lebih besar dibandingkan yang mengalami perlakuan panas *annealing* namun dengan perlakuan *quenching* kekuatan tarik memiliki nilai paling besar. Ini membuktikan jika perlakuan panas *annealing* dapat menurunkan nilai kekuatan tarik dari baja.

Pengaruh temperatur *annealing* terhadap nilai kekuatan tarik baja karbon rendah SGC 400 juga pernah dilakukan dan didapatkan data kekuatan tarik. Menurut data yang didapat dari penelitian Qudzsy et al. (2020), baja yang tidak mendapatkan perlakuan *annealing* memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 766 MPa. Penelitian ini menggunakan tiga variasi waktu dan tiga variasi temperatur. Pada waktu yang sama 4 menit dan temperatur yang berbeda yaitu 575°C, 625°C, dan 675°C. Pada temperatur 575°C kekuatan tarik yang dihasilkan sebesar 233 MPa. Kekuatan tarik yang dihasilkan pada temperatur 625°C sebesar 433 MPa. Pada variasi temperatur ketiga yaitu 675°C didapat nilai kekuatan tarik sebesar 400 MPa. Dari hasil tersebut dapat dianalisis jika baja *raw* atau tanpa perlakuan memiliki nilai kekuatan tarik paling tinggi, sedang dengan perlakuan cenderung semakin meningkat seiring semakin meningkatnya temperatur perlakuan panas.

Penelitian yang dilakukan Chandio et al. (2020) mengenai variasi sifat mekanik baja karbon rendah SAE 1006 selama *cold working* dengan beberapa perlakuan didapatkan data pengujian. Pada penelitian ini didapat data nilai uji tarik dari baja yang mengalami *cold working* dan baja yang mengalami proses perlakuan panas *annealing* dimana pengujian ini diterapkan pada 9 spesimen. Data 9 spesimen uji tarik dengan perlakuan *cold working* didapat nilai 598 MPa, 603 MPa, 603 MPa, 665 MPa, 650 MPa, 621 MPa, 610 MPa, 603 MPa, dan 609 MPa. Sedangkan dengan perlakuan *annealing* didapat 9 data uji tarik dengan nilai 270 MPa, 267 MPa, 283 MPa, 280 MPa, 264 MPa, 270 MPa, 257 MPa, 257 MPa, dan 262 MPa. Dari data yang didapat tersebut dapat dianalisis jika nilai kekuatan tarik yang mengalami *cold working* tanpa adanya perlakuan panas memiliki nilai kekuatan tarik lebih besar dibandingkan baja yang mendapatkan perlakuan panas *annealing*. Data tersebut dapat disimpulkan bahwa adanya penerapan perlakuan panas *annealing* menyebabkan penurunan nilai dari kekuatan tarik dari material itu sendiri.

Penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *annealing* juga telah dilakukan oleh Harahap & Rahmat (2017) pada baja tahan karat karbon rendah SUS 304. Dalam penelitiannya diterapkan beberapa variasi temperatur diantaranya temperatur normal, 500°C, 600°C, 700°C, dan 800°C dengan total pengujian sebanyak 3 spesimen. Dalam penelitiannya diambil data *yield strength* dan juga *ultimate strength*. Pada temperatur normal didapat nilai rata-rata kedua data tersebut sebesar 436,67 MPa dan 585 Mpa, temperatur 500°C didapat rata-rata 434,67 MPa dan 586 MPa, temperatur 600°C didapat rata-rata sebesar 432 MPa dan 580,67 MPa, temperatur 700°C didapat nilai rata-rata sebesar 427 MPa dan 573 MPa, terakhir pada temperatur 800°C didapat nilai rata-rata sebesar 397,67 MPa dan 556 MPa. Dari data tersebut dapat dianalisis bahwa semakin tinggi temperatur maka nilai kekuatan tarik yang terdiri dari *yield strength* dan *ultimate strength* semakin menurun.

Pengaruh temperatur *annealing* diterapkan juga pada baja karbon rendah SA 516 G70 setelah dilakukan proses pengelasan. Dalam penelitian yang dilakukan Widya et al. (2024) didapatkan hasil nilai kekuatan tarik baja *raw* dan yang diproses *annealing*. Proses *annealing* dilakukan pada tiga variasi temperatur dan satu tanpa perlakuan, dimana proses *annealing* dilakukan pada temperatur 800°C, 825°C, dan 850°C. Pada temperatur 800°C didapat nilai kekuatan tarik sebesar 470,823 Mpa, temperatur 825°C nilai kekuatan tarik didapat 459,790 MPa, dan pada temperatur 850°C didapat data nilai kekuatan tarik sebesar 449,985 MPa. Sedangkan baja yang tidak diberikan perlakuan didapat data nilai kekuatan tarik sebesar 544,190 MPa. Dari penelitian ini dapat disimpulkan jika adanya proses *annealing* yang diterapkan pada baja membuat penurunan kekuatan tarik dari baja itu sendiri.

Untuk memenuhi kebutuhan industri manufaktur saat ini khususnya dibidang otomotif dan keperluan rumah tangga, dibutuhkan sifat-sifat material yang sesuai dengan *standar* disamping kriteria yang diperlukan

dalam memenuhi kebutuhan fungsional selanjutnya. Sifat mampu bentuk salah satu kunci yang diperlukan untuk jenis baja karbon rendah karena proses selanjutnya yang dimana mengharuskan material tersebut memiliki kekerasan dan keuletan yang baik. Perlakuan panas *annealing* membantu baja untuk memiliki kekuatan tarik yang sesuai karena hal ini berbanding lurus dengan sifat mampu bentuk material itu sendiri. Berdasarkan latar belakang diatas maka penelitian ini mengambil judul “**Pengaruh Temperatur Stress relief annealing Terhadap Struktur Mikro Dan Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah AISI 1006 Setelah Mengalami Cold Rolling**”

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh proses *annealing* terhadap kekuatan tarik baja karbon rendah AISI 1006.
2. Menganalisis perbandingan nilai kekuatan tarik antara baja karbon rendah AISI 1006 tanpa *annealing* dan dengan proses *annealing* variasi temperatur 450°C, 575°C, dan 700°C.
3. Melakukan pengamatan struktur mikro baja karbon rendah AISI 1006 yang mengalami proses *annealing* dan tanpa mengalami proses *annealing*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AISI 1006.
2. Proses perlakuan panas menggunakan metode *annealing* dengan variasi temperatur 450°C, 575°C, dan 700°C.
3. Lama waktu temperatur tahan selama 7 jam.

4. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kekuatan tarik dan pengamatan struktur mikro
5. Proses *annealing* dilakukan tanpa mengubah fasa hanya untuk menghilangkan tegangan sisa.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat meningkatkan wawasan mengenai material baja terkhusus material baja karbon rendah AISI 1006.
2. Membantu memberikan gambaran mengenai baja karbon rendah yang digunakan untuk bidang otomotif dan peralatan rumah tangga dimana material tersebut memiliki keuletan yang baik.

1.5 Hipotesis

Adapun hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diberikannya *heat treatment* pada baja dapat menurunkan nilai kekuatan tarik namun meningkatkan *ductility*.
2. Semakin tinggi temperatur membuat butir baja semakin kasar.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan secara garis besar tentang latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika laporan yang akan ditulis dalam penulisan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menerangkan secara singkat tentang teori yang berkaitan dengan masalah yang akan dibahas serta merupakan tinjauan kepustakaan yang menjadi kerangka dan landasan berfikir dalam proses penulisan penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisikan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan penelitian, metode penelitian, variabel penelitian, dan diagram alir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menyimpulkan dari hasil dan pembahasan sekaligus memberikan saran yang dapat menyempurnakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan tentang referensi yang digunakan dalam penulisan dan penyusunan penelitian ini.

LAMPIRAN

Berisikan data seperti gambar hasil pengujian dan data yang mendukung penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon

Baja adalah paduan Fe-C (kandungan carbon maksimum sekitar 2%) yang dapat mengandung elemen paduan lainnya, sesuai dengan aplikasinya. Baja Karbon adalah material logam yang terbentuk dari unsur utama besi dan unsur kedua yang berpengaruh pada sifat-sifatnya adalah karbon, sedangkan unsur yang lain berpengaruh menurut presentasenya. (Qudzsy et al., 2020). Produk ini secara teknik dapat dinyatakan sebagai baja karbon. Baja juga dapat dilakukan perlakuan, baik panas maupun dingin (Purwanto & Haris, 2022). Baja merupakan suatu campuran dari besi (Fe) dan karbon (C), dimana unsur karbon (C) menjadi dasar. Disamping unsur Fe Dan C, baja juga mengandung unsur campuran lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi (Istiqlaliyah & Rhohman, 2016). Unsur-unsur tersebut akan berpengaruh terhadap mutu dari baja tersebut (Purboputro, 2006). Karakteristik utama baja karbon adalah mudah untuk ditempa dan mudah diolah menggunakan mesin (Qudzsy et al., 2020). Jika dilihat dari kadar karbonnya, baja karbon diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon sedang (*medium carbon steel*), dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) (Azimi et al., 2020).

2.1.1 Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi, yang biasanya memiliki kandungan karbon antara 0,60 dan 1,4 wt%, merupakan baja karbon yang paling keras, paling kuat, namun paling tidak ulet. Baja ini hampir selalu digunakan dalam kondisi yang dikeraskan dan ditempa, sehingga sangat tahan aus dan

mampu menahan ujung tajam. Baja perkakas dan baja cetakan merupakan paduan karbon tinggi, yang biasanya mengandung kromium, vanadium, tungsten, dan molibdenum. Unsur paduan ini bergabung dengan karbon untuk membentuk senyawa karbida yang sangat keras dan tahan aus (misalnya, Cr₂3C₆, V₄C₃, dan WC). Baja ini digunakan sebagai perkakas pemotong dan cetakan untuk membentuk dan membentuk material, serta pada pisau, silet, bilah gergaji besi, pegas, dan kawat berkekuatan tinggi (Callister & David Rethwisch, 2013).

2.1.2 Baja Karbon Sedang

Baja karbon sedang memiliki konsentrasi karbon antara sekitar 0,25 dan 0,60 wt%. Paduan ini dapat diberi perlakuan panas dengan austenitisasi, pendinginan, dan kemudian *Tempering* untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Baja ini paling sering digunakan dalam kondisi temper, memiliki struktur mikro martensit temper. Baja karbon sedang biasa memiliki kemampuan pengerasan yang rendah dan dapat berhasil diberi perlakuan panas hanya pada bagian yang sangat tipis dan dengan laju pendinginan yang sangat cepat. Penambahan kromium, nikel, dan molibdenum meningkatkan kapasitas paduan ini untuk diberi perlakuan panas, sehingga menghasilkan berbagai kombinasi kekuatan-duktilitas. Paduan yang diberi perlakuan panas ini lebih kuat daripada baja karbon rendah, tetapi mengorbankan keuletan dan ketangguhan. Aplikasinya meliputi roda dan rel kereta api, roda gigi, poros engkol, dan suku cadang mesin lainnya serta komponen struktural berkekuatan tinggi yang membutuhkan kombinasi kekuatan tinggi, ketahanan aus, dan ketangguhan (Callister & David Rethwisch, 2013).

2.1.3 Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah merupakan paduan yang memiliki kandungan karbon $\leq 0,30\%$ C, disamping itu mengandung unsur lain yaitu Si, Mn, Cu, P, dan S (Abdunnaser, 2015) seperti ditunjukkan pada tabel 2.1. Baja karbon rendah merupakan baja yang diproduksi dalam jumlah besar dibandingkan dengan baja lainnya. Baja karbon rendah digunakan mulai dari peralatan rumah, konstruksi bangunan, komponen mesin, bahkan hingga komponen untuk pembangkit listrik. Banyaknya penggunaan baja karbon disebabkan karena memiliki keuletan yang tinggi dan mudah dibentuk, tetapi kekerasannya rendah dan tidak tahan aus (Wicaksono et al., 2021). Sifat dari baja karbon sangat ditentukan oleh kandungan karbon yang terdapat dalam paduan baja. Baja karbon rendah merupakan baja yang memiliki ketahanan oksidasi rendah sehingga penggunaan baja ini cenderung terbatas pada temperatur tinggi (Hakiki & Sudiro, 2021).

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja Karbon Rendah (Matweb, 2024)

Component Elements Properties	Metric	English
Aluminum, Al	0.0100 - 1.50 %	0.0100 - 1.50 %
Boron, B	0.000500 - 0.00600 %	0.000500 - 0.00600 %
Carbon, C	0.00300 - 0.800 %	0.00300 - 0.800 %
Chromium, Cr	0.200 - 10.0 %	0.200 - 10.0 %
Cobalt, Co	7.50 - 12.0 %	7.50 - 12.0 %
Copper, Cu	0.0200 - 1.50 %	0.0200 - 1.50 %
Iron, Fe	63.0 - 100 %	63.0 - 100 %
Lead, Pb	0.150 - 0.360 %	0.150 - 0.360 %
Manganese, Mn	0.100 - 2.20 %	0.100 - 2.20 %
Molybdenum, Mo	0.0500 - 4.80 %	0.0500 - 4.80 %
Nickel, Ni	0.0300 - 18.5 %	0.0300 - 18.5 %
Niobium, Nb (Columbium, Cb)	0.00500 - 0.150 %	0.00500 - 0.150 %
Nitrogen, N	0.00100 - 0.0700 %	0.00100 - 0.0700 %
Phosphorus, P	0.00100 - 0.400 %	0.00100 - 0.400 %
Silicon, Si	0.0100 - 1.00 %	0.0100 - 1.00 %
Sulfur, S	0.00100 - 0.500 %	0.00100 - 0.500 %
Titanium, Ti	0.0100 - 1.40 %	0.0100 - 1.40 %
Vanadium, V	0.00500 - 0.950 %	0.00500 - 0.950 %
Zirconium, Zr	0.0100 - 0.150 %	0.0100 - 0.150 %

Baja karbon rendah memiliki kemampuan bentuk yang tinggi serta kemampuan las yang baik, tetapi kekerasan dan kekuatannya rendah. Hal ini menyebabkan terbatasnya penggunaan baja karbon rendah

dalam industri transportasi termasuk pembuatan kapal, kereta api, dan otomotif. Beberapa teknik telah digunakan untuk mengubah struktur mikro baja karbon rendah guna meningkatkan kekerasan dan kekuatannya (Shaabani et al., 2024). Untuk memperluas penggunaannya, diperlukan peningkatan sifat mekanik tersebut terutama kekuatan dan kekerasannya. Untuk meningkatkan sifat mekanik tersebut dapat diperbaiki melalui beberapa perlakuan, salah satunya yaitu dengan perlakuan panas (Wicaksono et al., 2021). Adapun sifat mekanik dari baja karbon rendah dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tabel *Mechanical Properties* Baja Karbon Rendah (Matweb, 2024)

Physical Properties	Metric	English
Density	7.75 - 8.08 g/cc	0.280 - 0.292 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	86.0 - 550	86.0 - 550
Hardness, Knoop	103 - 682	103 - 682
Hardness, Rockwell B	30.0 - 105	30.0 - 105
Hardness, Rockwell C	10.0 - 64.0	10.0 - 64.0
Hardness, Vickers	22.0 - 661	22.0 - 661
Tensile Strength, Ultimate	241 - 2450 MPa	35000 - 355000 psi
Tensile Strength, Yield	140 - 2400 MPa	20300 - 347000 psi
Elongation at Break	3.00 - 48.0 %	3.00 - 48.0 %
Reduction of Area	13.0 - 75.0 %	13.0 - 75.0 %
Modulus of Elasticity	183 - 213 GPa	26500 - 30900 ksi
Compressive Yield Strength	152 - 1800 MPa	22000 - 260000 psi
Bulk Modulus	148 - 163 GPa	21500 - 23600 ksi
Poissons Ratio	0.250 - 0.300	0.250 - 0.300
Fatigue Strength	170 - 772 MPa	24700 - 112000 psi
Fracture Toughness	33.0 - 115 MPa·m ^½	30.0 - 105 ksi-in ^½
Machinability	50.0 - 160 %	50.0 - 160 %
Shear Modulus	70.0 - 80.0 GPa	10200 - 11600 ksi
Izod Impact	35.0 - 138 J	25.8 - 102 ft-lb
Charpy Impact	14.0 - 339 J	10.3 - 250 ft-lb
Bend Radius, Minimum	0.000 - 10.0 t	0.000 - 10.0 t
Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.0000142 - 0.000142 ohm-cm	0.0000142 - 0.000142 ohm-cm
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	10.1 - 16.6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	5.61 - 9.22 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
Specific Heat Capacity	0.450 - 0.486 J/g·°C	0.108 - 0.116 BTU/lb·°F
Thermal Conductivity	25.3 - 93.0 W/m·K	176 - 645 BTU-in/hr-ft ² ·°F
Melting Point	1420 - 1460 °C	2590 - 2660 °F
Maximum Service Temperature, Air	400 - 677 °C	752 - 1250 °F

2.2 Pengaruh Komposisi Kimia Terhadap Baja

Adanya komposisi kimia paduan memberikan perubahan sifat mekanis juga efektivitas terhadap baja itu sendiri.

2.2.1 Karbon (C)

Kehadiran karbon dalam besi diperlukan untuk membuat baja. Karbon penting untuk pembentukan cementit serta karbida lainnya dan pembentukan perlit, speroidit, bainit, martensit dan besi – karbon. Kekerasan baja akan meningkat dengan penambahan lebih banyak karbon, sampai sekitar 0,65%. Ketahanan aus dapat ditingkatkan sampai sekitar 1,5%. Di luar jumlah ini, kenaikan karbon mengurangi ketangguhan meningkatkan kerapuhan (Binudi et al., 2014). Karbon juga merupakan unsur paduan yang dapat mengeraskan baja (Adi Ganda Putra et al., 2020).

2.2.2 Mangan (Mn)

Unsur mangan dalam proses pembuatan baja berfungsi sebagai *deoxidizer* (pengikat) sehingga proses peleburan dapat berlangsung baik (Mustofa, 2015). Pada temperatur kamar, besi α mampu melarutkan unsur Mn sampai dengan 10%, dengan demikian kandungan Mn yang kecil tidak akan memunculkan fasa-fasa yang khusus pada struktur mikro baja karbon, kecuali mangan sulfida (MnS). Baja dengan kandungan Mn lebih tinggi akan sangat sensitif terhadap perlakuan pemanasan serta cenderung memiliki butiran-butiran yang kasar. Suatu karakter khas dari baja paduan Mn tinggi adalah strukturnya yang berserat. Mn juga terdapat dalam setiap baja tapi kandungannya kecil, namun baru dapat dikatakan unsur paduan jika kadarnya lebih dari 0,6 %. Semakin tinggi kadar Mn, semakin turun temperatur γ - α , sehingga baja dengan kadar Mn 1,2 % pada temperatur kamar masih berstruktur austenit (Binudi et al., 2014). Selain itu adanya komposisi

mangan dalam baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan, penyetabilan karbida, dan menurunkan laju pendinginan kritis sehingga mampu keras baja dapat ditingkatkan (Adi Ganda Putra et al., 2020).

2.2.3 Khrom (Cr)

Elemen kimia atom krom (Cr) pada baja untuk meningkatkan kekuatan, keuletan, ketahanan korosi (karat) dan kekuatan pada temperatur tinggi material (Ardhyananta et al., 2020). Kromium memiliki pengaruh yang hampir sama dengan mangan yaitu meningkatkan ketangguhan, kemampuan untuk dikeraskan dan tahan terhadap temperatur tinggi. Salah satu pengaruh yang sangat signifikan dengan penambahan krom pada baja adalah meningkatkan ketahanan korosi. Kromium berperan dalam pembentukan karbida. Senyawa karbida ini sangat keras dan dengan sendirinya kekerasan baja akan meningkat. Adanya senyawa karbida ini menyebabkan besi juga tahan aus. Kromium juga menyebabkan baja memiliki struktur butiran yang lebih halus, dan kromium juga menyebabkan turunnya kecepatan pendinginan kritis yang sangat besar (Binudi et al., 2014).

2.2.4 Nikel (Ni)

Nikel meningkatkan kekuatan ferit, sehingga meningkatkan kekuatan baja. Diterapkan pada baja paduan rendah guna meningkatkan ketangguhan dan kekerasannya. Ni menurunkan temperatur γ - α dengan cepat. Ni juga cenderung membantu mengurangi distorsi dan retak selama pendinginan dalam proses perlakuan panas (Binudi et al., 2014). Elemen kimia atom nikel (Ni) dapat ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan, kekerasan, dan ketahanan korosi material (Ardhyananta et al., 2020).

2.2.5 Silikon (Si)

Silikon digunakan sebagai *deoksidiser* dalam pembuatan baja. Penambahan Si sedikit meningkatkan kekuatan ferit dan ketika digunakan bersama dengan paduan lainnya dapat membantu meningkatkan ketangguhan dan penetrasi kekerasan (Binudi et al., 2014). Silisium atau silikon merupakan unsur paduan yang ada dalam setiap baja dengan kandungan lebih dari 0,4%, yang memengaruhi peningkatan tegangan tarik dan penurunan kecepatan pendinginan kritis (Mustofa, 2015).

2.2.6 Fosfor (P) dan Sulfur (S)

Kandungan sulfur tidak meningkatkan kekuatan tarik atau luluh pada baja karbon rendah hingga sedang. Menurunkan kandungan sulfur dari 0,06% menjadi 0,02% menghasilkan beberapa peningkatan dalam keuletan dan ketangguhan baja berkekuatan rendah. Pada tingkat karbon rendah dan kekuatan rendah, fosfor secara signifikan memperkuat matriks besi dengan pengerasan larutan padat. Kekuatan luluh meningkat secara proporsional dan keuletan serta ketangguhan menurun dengan peningkatan kandungan fosfor. seiring meningkatnya kekuatan baja, sulfur juga diamati merusak baja 0,26% C, 1,5% Mn. Peningkatan sulfur dari 0,005% menjadi 0,053% meningkatkan titik luluh dari 73,7 menjadi 77,1 ksi dan menurunkan RA dan CVN pada suhu ruangan dari 71,7% menjadi 37,5% dan 109 ft-lb menjadi 10 ft-lb. Dalam contoh ini, titik luluh hanya meningkat 4,4%, sedangkan RA dan CVN menurun masing-masing 47,7% dan 90,8%. Pada baja cor 1% Ni, Cr, Mo lainnya, baja rendah dan tinggi sulfur hampir tidak menunjukkan perbedaan dalam sifat tarik.

Pada tingkat karbon rendah dan kekuatan rendah, fosfor secara signifikan memperkuat matriks besi melalui pengerasan larutan padat. Kekuatan luluh meningkat secara proporsional, sementara keuletan

dan ketangguhan menurun seiring peningkatan kandungan fosfor. Fosfor juga meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan luluh, suhu transisi impak, dan menurunkan energi impak bahan tersebut (Edwar & Wallace, 1982).

2.3 Baja AISI 1006

Baja AISI 1006 termasuk klasifikasi baja karbon rendah (*hypoeutectoid*) (Muliastri et al., 2022). Sesuai dengan kandungan karbon yang menunjukkan nilai 0.0424%. Berikut merupakan tabel komposisi unsur pada AISI 1006 seperti ditunjukkan pada tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Komposisi Kimia Baja AISI 1006 (Database PT. Krakatau Steel)

No.	Unsur	Kandungan (%)
1	Carbon (C)	0.0424
2	Silikon (Si)	0.008
3	Mangan (Mn)	0.192
4	Fosfor (P)	0.0133
5	Sulfur (S)	0.0128
6	Krom (Cr)	0.014
7	Nikel (Ni)	0.014
8	Cuprum (Cu)	0.016
9	Molibdenum (Mo)	0.001
10	Nitrogen (N)	38 ppm
11	Stannum (Sn)	0.002
12	Titanium (Ti)	0.0015
13	Sol-Al (Alumunium Larut)	0.043
14	Total-Al (Alumunium)	0.047

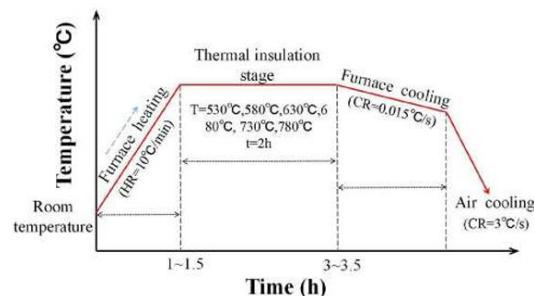
Dari data yang didapat dari *handbook* (Davis, 1998) didapat data properties baja AISI 1006 yang mengalami *hot rolled* dan *cold drawn* seperti ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Data Properties Baja yang Mengalami *Hot rolled* dan *Cold Drawn* (Davis, 1998).

Steel	Condition	Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm, %	Reduction in area, %	Hardness, HB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
Carbon steel bar^(a)								
1006	Hot rolled	295	43	165	24	30	55	86
	Cold drawn	330	48	285	41	20	45	95

2.4 Heat treatment

Perlakuan panas atau heat treatment adalah proses yang digunakan untuk mengubah struktur logam melalui pemanasan spesimen di dalam furnace pada suhu rekristalisasi selama waktu tertentu (Qudzsy et al., 2020) seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. *Heat treatment* menggunakan kombinasi operasi pemanasan pada logam di bawah temperatur lebur logam tersebut dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat (Purwanto & Haris, 2022). Proses perlakuan panas pada logam sangatlah bermanfaat untuk memperbaiki sifat sifat logam tersebut (Azimi et al., 2020).



Gambar 2.1 Diagram Skematik Proses Perlakuan Panas

(Tang et al., 2023)

Perlakuan panas diterapkan pada logam untuk memperoleh sifat-sifat yang diinginkan (Gunawan, 2017). Perlakuan panas pada baja tahan karat menghasilkan perubahan kondisi fisik, sifat mekanik, dan tingkat tegangan sisa, serta mengembalikan ketahanan korosi maksimum jika sifat tersebut telah terpengaruh oleh proses fabrikasi atau pemanasan sebelumnya (Davis, 1994). Proses perlakuan panas juga bertujuan untuk memperoleh logam yang keras, lunak, ulet, meningkatkan *machinability* dan menghilangkan tegangan sisa setelah proses *cold work*. Perlakuan panas tidak hanya membantu meningkatkan sifat manufaktur, tetapi juga meningkatkan kinerja material dengan meningkatkan kekuatan dan sifat tertentu dari material yang diberikan perlakuan panas (Muhdori et al., 2023). Dengan komposisi paduan yang tepat dan proses perlakuan panas yang cermat akan menghasilkan barang properti yang baik (Yu et al., 2024).

Kunci peningkatan sifat mampu bentuk baja lembaran adalah pembentukan tekstur rekristalisasi dengan intensitas yang tinggi serta rendahnya tekstur. Pembentukan tekstur rekristalisasi ini dipengaruhi oleh proses pembuatan baja lembaran antara lain parameter proses pencanaian dingin dan *annealing* (Korda et al., 2014). Proses rekristalisasi mengubah struktur kisi yang terdeformasi menjadi kisi baru tanpa regangan melalui nukleasi atau pertumbuhan (Hari Priyambodo et al., 2021). Proses perlakuan panas terdiri dari beberapa tahapan, yaitu diawali dengan pemanasan sampai temperatur tertentu, lalu ditahan suhu tersebut hingga waktu tertentu, selanjutnya dilakukan pendinginan dengan laju pendinginan tertentu. Laju pendinginan itu sendiri bergantung pada media pendinginan yang digunakan (seperti udara, air, dan minyak), karena setiap media pendinginan memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda (Wicaksono et al., 2021). Perlakuan panas dipakai untuk memperbaiki sifat material yang mungkin terpengaruh akibat proses manufaktur sebelumnya, seperti *annealing*, *normalizing*, *stress relieving*, dan *quenching* (Tsamroh et al., 2024).

2.4.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi *Heat treatment*

Didalam proses *heat treatment* ada beberapa faktor yang menentukan keberhasilan yang diharapkan dalam pelaksanaan proses tersebut antara lain:

1. Kecepatan pemanasan
2. Kecepatan pendinginan
3. Waktu penahanan (*holding time*)
4. Media pendinginan yang digunakan

Faktor tersebut diterapkan dalam spesifikasi sehingga untuk material yang berbeda jenis maupun karakteristik yang diharapkan terdapat perbedaan melalui masing-masing tahap tersebut (Abdunnaser, 2015).

2.4.2 *Quenching*

Quenching merupakan proses perlakuan panas melalui proses pendinginan cepat. Dalam baja, proses quenching menyebabkan percepatan pendinginan dari suhu austenisasi ke fase bainite atau martensite untuk mencapai kekuatan dan kekerasan pada tingkat tertentu. Proses *quenching* dapat menyebabkan nilai kekerasan menjadi meningkat seiring bertambahnya jumlah martensite (Haryadi et al., 2021). Perlakuan panas memerlukan pemanasan benda kerja ke suhu pengerasan dan pendinginan cepat dengan laju pendinginan kritis (Jordi et al., 2017).

Perlakuan panas dengan proses *quenching* merupakan salah satu tahapan dalam proses perlakuan panas *quenching* untuk memperoleh struktur mikro yang lebih keras (Ghufron & Fuadi, 2024). Martensit merupakan salah satu fase utama baja karbon rendah berkekuatan tinggi. Setelah pendinginan, dislokasi berdensitas tinggi di dalam bilah martensit dapat berkontribusi pada penguatan batas butir, penguatan presipitasi, dan penguatan larutan padat (Zhang et al., 2022). Untuk mendapatkan sifat yang sesuai dan meningkatkan

kinerja material, dilakukan serangkaian proses *heating* dan *cooling* yang terkendali. Ketahanan mekanis, ketangguhan, dan kekerasan bisa tercapai dengan perlakuan yang tepat seperti temper martensit. Struktur mikro ini dapat diperoleh dengan perlakuan *quenching* (Souza et al., 2024). Dalam proses ini, benda kerja yang sudah dipanaskan akan mengalami quenching, yakni pendinginan cepat, menggunakan media seperti air, oli, dan suhu ruang (Wiseno & Irwandi, 2023).

1. Media Pendingin

Media pendingin yang digunakan untuk mendinginkan baja ber variasi. Berbagai bahan pendingin yang diterapkan dalam proses perlakuan panas meliputi:

a. Air

Air memiliki massa jenis yang besar tapi lebih kecil dari air garam, kekentalannya rendah sama dengan air garam. Laju pendinginannya lebih lambat dari air garam. Air menghasilkan tingkat pendinginan mendekati tingkat maksimum. Keunggulan air sebagai media pendingin adalah harganya murah, mudah didapat, mudah dibuang dengan polusi atau bahaya kesehatan minimal. Air juga cukup efektif dalam menghilangkan kerak dari permukaan baja yang di-quenching. Oleh karena itu air sering digunakan sebagai media *quenching* karena tidak mengakibatkan distorsi berlebihan atau retak.

b. Minyak

Minyak yang digunakan sebagai fluida pendingin dalam perlakuan panas adalah untuk benda kerja yang diolah. Selain minyak khusus sebagai bahan pendingin pada proses perlakuan panas, dapat juga digunakan oli, minyak bakar, atau solar.

c. Udara

Pendinginan udara dilakukan untuk perlakuan panas yang memerlukan pendinginan lambat. Untuk itu, udara yang disirkulasikan ke dalam ruangan pendingin dibuat dengan kecepatan rendah. Udara sebagai pendingin memberikan

kesempatan kepada logam untuk membentuk kristal-kristal dan kemungkinan mengikat unsur-unsur lain dari udara. Adapun pendinginan pada udara terbuka akan memberikan oksidasi oksigen terhadap proses pendinginan (Jordi et al., 2017).

2.4.3 *Tempering*

Tempering adalah proses perlakuan panas ulang pada suhu di bawah suhu tertentu setelah mengalami proses *hardening*. *Tempering* bertujuan untuk meningkatkan ketangguhan, menurunkan kekerasan, serta menambah keuletan (Abdunnaser, 2015). Dalam keadaan setelah pendinginan, martensit selain sangat keras juga sangat getas sehingga tidak dapat digunakan untuk sebagian besar aplikasi. Setiap tegangan internal yang mungkin muncul selama pendinginan memiliki efek pelemahan. Keuletan dan ketangguhan martensit dapat ditingkatkan dan tegangan internal ini dihilangkan dengan perlakuan panas yang dikenal sebagai *Tempering*. *Tempering* dilakukan dengan memanaskan baja martensit hingga suhu di bawah eutektoid selama jangka waktu tertentu. Biasanya, *Tempering* dilakukan pada suhu antara 250°C dan 650°C (480°F dan 1200°F). Namun, tegangan internal dapat dihilangkan pada suhu serendah 200°C (390°F) (Callister & David Rethwisch, 2013).

2.4.4 *Annealing*

Proses *annealing* adalah perlakuan panas yang digunakan untuk meniadakan efek penggeraan dingin yaitu, untuk melunakkan dan meningkatkan keuletan logam yang sebelumnya telah mengalami pengerasan regangan. Proses ini biasanya digunakan selama prosedur fabrikasi yang memerlukan deformasi plastik yang ekstensif, untuk memungkinkan kelanjutan deformasi tanpa fraktur atau konsumsi energi yang berlebihan (Callister & David Rethwisch, 2013). Proses perlakuan panas ini diterapkan pada material logam atau paduan.

Prinsip annealing adalah memanaskan baja hingga di atas suhu kritis, kemudian dilakukan holding time, dan pendinginan di dalam tungku dilakukan secara lambat hingga suhu ruang (Fathu Rohman et al., 2014).

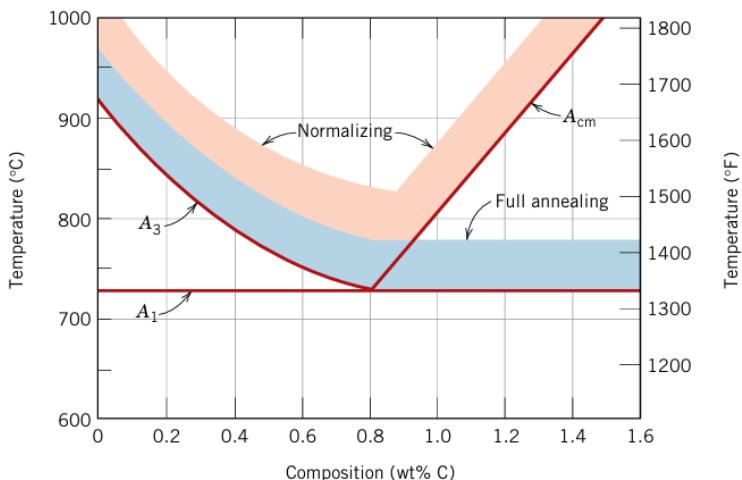
Proses *annealing* dibagi menjadi tiga macam, yaitu *annealing* penuh, *annealing isothermal*, *annealing* pada suhu kritis terendah. Dalam proses *annealing* pada suhu kritis terendah, pemanasan dipertahankan pada beberapa suhu di bawah batas transformasi (perubahan). Suhu itu cukup tinggi untuk membuat pengkristalan kembali dan struktur yang seragam. Apabila proses ini digunakan untuk baja karbon tinggi akan menyebabkan baja itu mudah dibentuk dan dikerjakan mesin perkakas (Istiqlaliyah & Rhohman, 2016). *Annealing* dilakukan pada material yang telah mengalami *cold working* dan *hot working*, pada baja karbon rendah atau kabel-kabel baja untuk menghilangkan tegangan dalam dan melunakkan bahan (Abdunnaser, 2015).

Annealing merupakan perlakuan panas yang cocok untuk menurunkan kekerasan material dan membuat butir bebas dari tegangan sisa pada baja (Puspasari et al., 2020). Pengaturan suhu dan waktu *annealing* dapat mengontrol karakteristik mikrostruktur, seperti ukuran butiran (Li et al., 2024). Sebagai metode yang layak, perlakuan panas interkritis dapat mengatur proporsi struktur yang tidak seragam dan menghilangkan tegangan internal untuk memperoleh baja berkekuatan tinggi dengan karbon sangat rendah dengan kecocokan kekuatan ketangguhan yang baik (Gong et al., 2024). Studi telah menunjukkan bahwa variasi suhu anil memberikan pengaruh yang mendalam pada mikrostruktur dan tekstur material yang direkristalisasi. Dengan peningkatan suhu rekristalisasi, mikrostruktur mengalami proses pemulihan dan rekristalisasi, yang menghasilkan berkurangnya kehilangan besi dan kekuatan mekanis (Wen et al., 2024).

Annealing dapat meningkatkan nilai elongasi baja secara signifikan sekaligus menurunkan nilai kekuatannya. Penurunan kekuatan baja ini menyebabkan baja tidak dapat memenuhi persyaratan *Minimum* pada *standar* yang berlaku untuk aplikasi baja struktural (Putra et al., 2020). Salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan logam murni adalah pengerasan regangan melalui deformasi plastik. Peningkatan regangan pada suhu kriogenik menyebabkan peningkatan kekuatan karena penyempurnaan butiran. Namun, peningkatan kekuatan biasanya menyebabkan penurunan keuletan (Li et al., 2024).

1. *Normalizing*

Baja yang telah mengalami deformasi plastis, misalnya, melalui operasi penggulungan, terdiri dari butiran perlit (dan kemungkinan besar fase proeutektoid), yang bentuknya tidak teratur dan relatif besar serta ukurannya sangat bervariasi. Perlakuan panas anil yang disebut normalisasi digunakan untuk menghaluskan butiran (untuk mengurangi ukuran butiran rata-rata) dan menghasilkan distribusi ukuran yang lebih seragam dan diinginkan. Baja perlit berbutir halus lebih kuat daripada baja berbutir kasar. Normalisasi dicapai dengan memanaskan setidaknya 55°C (100F) di atas suhu kritis atas yaitu, di atas A₃ untuk komposisi yang kurang dari eutektoid (0,76 wt% C), dan di atas A_{cm} untuk komposisi yang lebih besar dari eutektoid. Setelah waktu yang cukup diberikan agar paduan sepenuhnya berubah menjadi austenit, prosedur yang disebut austenitisasi perlakuan diakhiri dengan pendinginan di udara (Callister & David Rethwisch, 2013). Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Diagram fase karbida besi-besi di sekitar eutektoid, yang menunjukkan kisaran suhu perlakuan panas untuk baja karbon biasa

(Callister & David Rethwisch, 2013)

2. Full Annealing

Perlakuan panas yang dikenal sebagai *annealing* penuh sering digunakan pada baja karbon rendah dan sedang yang akan dikerjakan atau akan mengalami deformasi plastik yang luas selama operasi pembentukan. Secara umum, paduan diperlakukan dengan memanaskan hingga suhu sekitar 50°C di atas garis A₃ (untuk membentuk austenit) untuk komposisi yang kurang dari eutektoid, atau, untuk komposisi yang melebihi eutektoid, 50°C di atas garis A₁ (untuk membentuk fase austenit dan Fe₃C). Paduan tersebut kemudian didinginkan dalam tungku, tungku perlakuan panas dimatikan baik tungku maupun baja mendingin hingga suhu ruangan pada kecepatan yang sama yang memakan waktu beberapa jam. Produk mikrostruktur dari *annealing* ini adalah perlit kasar yang relatif lunak dan ulet. Prosedur pendinginan anil penuh memakan waktu namun struktur mikro yang memiliki butiran kecil dan struktur butiran seragam dihasilkan (Callister & David Rethwisch, 2013).

3. *Spheroidizing*

Baja karbon sedang dan tinggi yang memiliki struktur mikro yang mengandung perlit kasar yang masih terlalu keras untuk dikerjakan dengan mesin atau mengalami deformasi plastik dengan mudah. Baja ini dapat diolah dengan panas atau dianil untuk mengembangkan struktur sferoidit. Baja sferoid memiliki kelembutan dan keuletan maksimum dan mudah dikerjakan dengan mesin atau mengalami deformasi. Perlakuan panas sferoidisasi, yang selama proses tersebut terjadi penggabungan Fe₃C untuk membentuk partikel sferoid, dapat dilakukan dengan beberapa metode, sebagai berikut:

- a. Memanaskan paduan pada suhu tepat di bawah eutektoid [garis A₁ pada Gambar 2.2, atau sekitar 700°C (1300F)] di wilayah a Fe₃C diagram fase. Jika mikrostruktur prekursor mengandung perlit, waktu sferoidisasi biasanya berkisar antara 15 dan 25 jam.
- b. Pemanasan hingga suhu tepat di atas suhu eutektoid dan kemudian pendinginan sangat lambat di tungku atau menahan pada suhu tepat di bawah suhu eutektoid.
- c. Pemanasan dan pendinginan secara bergantian dalam sekitar (50°C dari garis A₁ Gambar 2.2).

Hingga nilai tertentu, laju pembentukan sferoidit bergantung pada struktur mikro sebelumnya. Misalnya, pembentukan sferoidit paling lambat terjadi pada perlit, dan semakin halus perlit, semakin cepat lajunya. Selain itu, pengrajan dingin sebelumnya meningkatkan laju proses sferoidisasi (Callister & David Rethwisch, 2013). Banyak faktor, seperti riwayat perlakuan panas, struktur mikro sebelumnya, komposisi kimia, dapat memengaruhi efek anil sferoidisasi. Dilaporkan bahwa diameter rata-rata partikel cementit dapat dikurangi dengan menekan presipitasi batas butir cementit dan mengurangi jarak antar lamelar perlit baja canai panas. Struktur mikro perlit halus awal menginduksi sferoidisasi yang

lebih cepat, dan perbedaan antara struktur mikro perlit kasar dan halus muncul dari kepadatan cacat yang lebih tinggi yang ada pada yang terbaru. Di sisi lain, struktur mikro martensit dan bainit mengalami sferoidisasi lebih cepat daripada perlit karena distribusi karbon terlarut lebih homogen dalam martensit dan bainit (Wang et al., 2019).

4. *Stress relief annealing*

Tegangan sisa internal dapat terbentuk pada potongan logam sebagai respons terhadap hal-hal berikut:

- a. Proses deformasi plastik seperti pemesinan dan penggilingan.
- b. Pendinginan tidak seragam pada potongan yang diproses atau dibuat pada suhu tinggi, seperti pengelasan atau pengecoran.
- c. Transformasi fase yang terjadi setelah pendinginan di mana fase induk dan produk memiliki kepadatan yang berbeda.

Distorsi dan lengkungan dapat terjadi jika tegangan sisa ini tidak dihilangkan. Tegangan sisa ini dapat dihilangkan dengan pelepas tegangan dan perlakuan panas pemanasan di mana potongan dipanaskan hingga suhu yang direkomendasikan, ditahan di sana cukup lama untuk mencapai suhu seragam, dan akhirnya didinginkan hingga suhu kamar di udara. Suhu pemanasan biasanya relatif rendah sehingga efek yang dihasilkan dari penggerjaan dingin dan perlakuan panas lainnya tidak terpengaruh (Callister & David Rethwisch, 2013).

Untuk mencapai kinerja komprehensif yang sangat baik, proses penggulungan yang dikombinasikan dengan perlakuan anil umumnya diterapkan pada baja paduan mikro (Tang et al., 2023). Suhu anil merupakan parameter penentu untuk pelepasan tegangan. Untuk bagian yang teregang, dekat dengan zona geser, suhu juga menentukan tingkat pemulihan dan rekristalisasi (Paolinelli & da

Cunha, 2006). *Stress relief annealing* digunakan untuk menghilangkan tegangan sisa sambil memberikan dampak yang rendah pada sifat mekanis suatu material. *Stress relief annealing* suhu tinggi menyempurnakan butiran, menghasilkan kerapatan dislokasi yang rendah, dan mengubah sifat mekanis baja (Xu et al., 2021).

2.5 Hot working

Pengerjaan panas atau *hot working* adalah ketika deformasi dicapai pada suhu di atas suhu saat rekristalisasi terjadi. Pada sebagian besar teknik pembentukan, prosedur pengerjaan panas dan dingin dapat dilakukan. Untuk operasi pengerjaan panas, deformasi besar dapat dilakukan, yang dapat diulang secara berturut-turut karena logam tetap lunak dan ulet. Selain itu, kebutuhan energi deformasi lebih sedikit daripada pengerjaan dingin. Namun, sebagian besar logam mengalami oksidasi permukaan, yang mengakibatkan hilangnya material dan hasil akhir permukaan yang buruk. Pengerjaan dingin menghasilkan peningkatan kekuatan dengan penurunan keuletan karena regangan logam mengeras. Keuntungan dibandingkan pengerjaan panas meliputi hasil akhir permukaan yang lebih berkualitas, sifat mekanis yang lebih baik dan variasi yang lebih banyak, dan kontrol dimensi yang lebih dekat pada bagian yang sudah jadi (Callister & David Rethwisch, 2013).

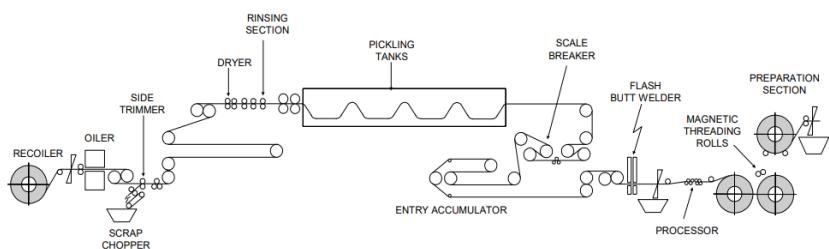
2.6 Cold working

Pengerjaan dingin pada baja ini dapat menyebabkan pembentukan martensit yang disebabkan oleh regangan atau tegangan dari fase austenit, di mana tingkat pembentukan martensit terkait dengan tingkat *cold working*. Transformasi martensit mekanis terjadi setiap kali tegangan yang disebabkan oleh medan eksternal diterapkan alih-alih tegangan yang

disebabkan oleh guncangan termal (Tanhaei et al., 2018). Hasil dari proses *cold-rolled* untuk menghasilkan baja lembaran karbon rendah ini menghasilkan bentuk butiran yang halus sehingga dapat meningkatkan nilai *tensile strength* dan *yield strength* dari baja namun juga dapat membuat nilai elongasi dari baja menurun, maka diperlukan suatu perlakuan panas spheroidizing *annealing* untuk memperbaiki nilai elongasi yang rendah (Putra et al., 2020).

2.6.1 Continuous Pickling Line (CPL)

Continuous Pickling Line (CPL) adalah salah satu unit di *Cold rolling mill* (CRM) yang berfungsi untuk membersihkan atau menghilangkan *scale* dengan cara mekanis dan kimiawi. Proses pembersihan secara mekanis pada unit ini dilakukan oleh *scale breaker*. Sedangkan pembersihan secara kimiawi dengan menggunakan HCL. Bahan baku yang masih berupa *coil* hasil produksi dari *Hot Strip Mill* (HSM) yang biasa disebut dengan *Hot rolled Coil* (HRC), masih mengandung *scale* akibat dari oksida temperatur tinggi. Sebelum bahan ini diproses lebih lanjut di unit-unit lain di CRM terlebih dahulu diproses di CPL untuk menghilangkan *scale* tersebut. Sesuai dengan namanya proses CPL ini berlangsung secara kontinu (Krakatau Steel, 2024).



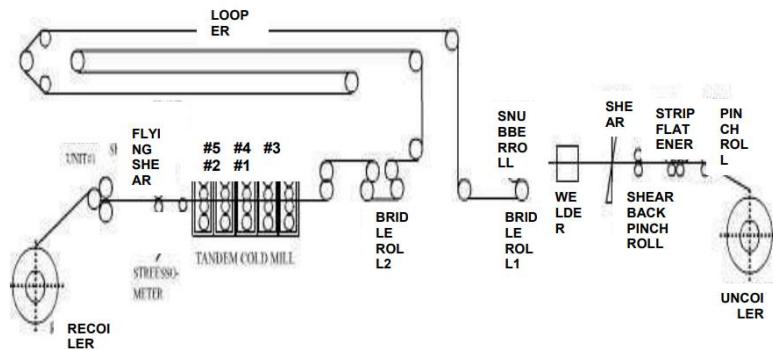
Gambar 2.3 Proses produksi CPL

(Krakatau Steel, 2024)

2.6.2 Continuous Tandem Cold Mill (CTCM)

Sebagai kelanjutan atas proses yang telah berlangsung di unit CPL (*Continous pickling line*), *coil* selanjutnya diproses di CTCM

(*Continuous Tandem Cold Mill*) guna mendapatkan ketebalan strip yang diinginkan, dengan melalui proses penggerolan dingin (*Cold Rolling*) yaitu proses penggerolan yang dilakukan pada kondisi dibawah temperatur rekristalisasi. Proses penggerolan strip di CTCM ini mempergunakan susunan *roll high* sebanyak 5 stand, yang masing-masing terdiri dari sepasang *work roll* dan sepasang *back up roll* (Krakatau Steel, 2024).

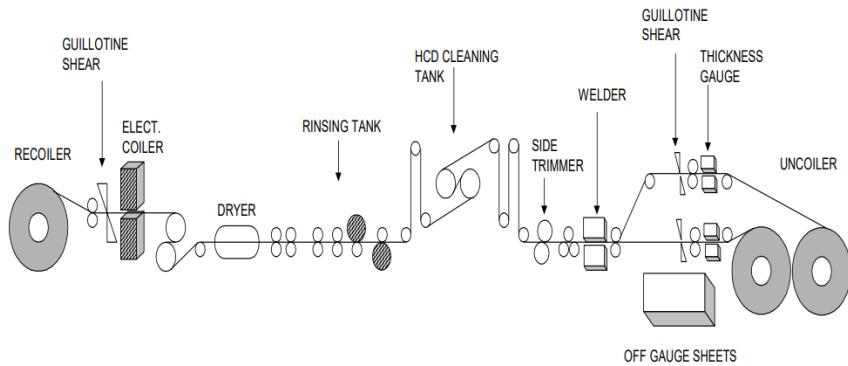


Gambar 2.4 Proses Produksi CTCM

(Krakatau Steel, 2024)

2.6.1 *Electronic Cleaning Line* (ECL 1)

Setelah mengalami proses penipisan ketebalan dalam penggerolan, sisa lapisan minyak dan gemuk yang ada di permukaan lembaran baja harus di hilangkan. Untuk keperluan ini ECL menggunakan arus listrik berdensitas tinggi sehingga proses elektrolisis berlangsung untuk mengangkat dan menghilangkan lapisan minyak dan gemuk. Proses di ECL berlangsung didalam larutan sabun panas yang mengandung alkalin. Didalam larutan elektrolytic ini, lembaran baja dihubungkan dalam salah satu kutub listrik dari generator (Krakatau Steel, 2024).

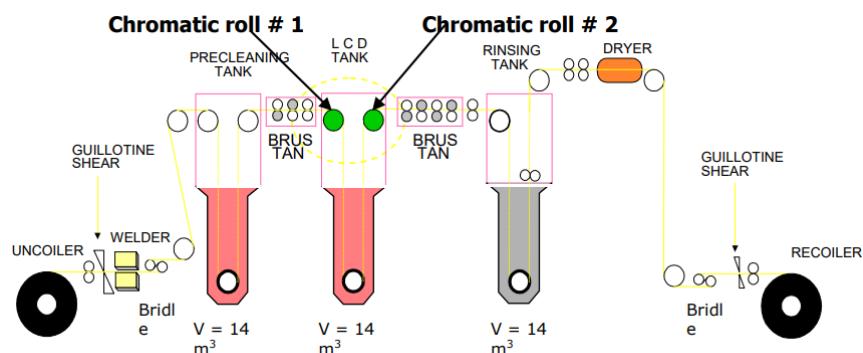


Gambar 2.5 Proses Produksi *Electrolytic Cleaning Line 1* (ECL 1)

(Krakatau Steel, 2024)

2.6.2 *Electronic Cleaning Line 2* (ECL 2)

Proses *Electrolitic Cleaning Line 2* berfungsi untuk membersihkan permukaan strip yang terkontaminasi oleh pelumasan pada proses penggerolan dingin di TCM dengan menggunakan arus 6000 amp (*max*). Prosesnya sama dengan ECL 1, hanya terdapat perbedaan pada tabel strip yang di proses. Selain itu ECL 1 prosesnya bisa langsung masuk ke proses BAF dan ada juga produk dari ECL 1 bisa langsung di jual di konsumen, sedangkan untuk ECL 2 prosesnya langsung lanjut ke BAF dan produknya tidak bisa langsung di jual (Krakatau Steel, 2024).



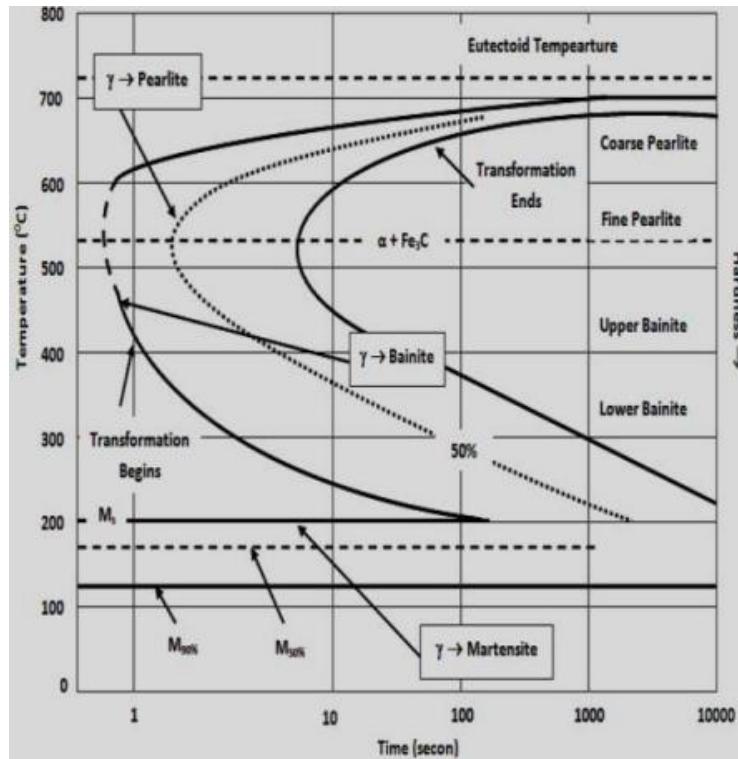
Gambar 2.6 Proses Produksi ECL 2

(Krakatau Steel, 2024)

2.7 *Holding time*

Holding time dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari suatu bahan pada proses hardening dengan menahan pada suhu pengerasan untuk memperoleh pemanasan homogen sehingga struktur austenitnya homogen atau terjadi kelarutan karbida ke dalam austenite, difusi karbon, dan unsur paduannya. Pedoman untuk menentukan *holding time* dari baja karbon rendah yang mengandung karbida yang mudah larut, diperlukan *holding time* yang singkat antara 5-15 menit setelah mencapai temperatur pemanasannya dianggap sudah memadai (Qudzsy et al., 2020).

Waktu penahanan atau *holding time* juga sangat mempengaruhi kekerasan saat proses perlakuan panas *heat treatment*. Waktu penahanan yang terlalu singkat menghasilkan kekerasan rendah karena jumlah karbida terlarut yang tidak mencukupi dalam larutan. Sedangkan jika *holding time* terlalu lama akan terjadiperubahan tetapi mengikuti pertumbuhan butir yang dapat menurunkan kekerasan (Sukarno et al., 2024). Dari penelitian yang dilakukan oleh Fathoni et al. (2023) *holding time* berpengaruh terhadap *tensile strength* dimana Semakin lama waktu tahan anil pada proses intercritical annealing akan terjadi homogenisasi terhadap fasa austenit pada temperatur kritis. Semakin lama waktu tahan pada saat anil dilakukan nilai *tensile strength* semakin tinggi. Adapun diagram perubahan temperatur waktu dapat dilihat pada gambar 2.3.



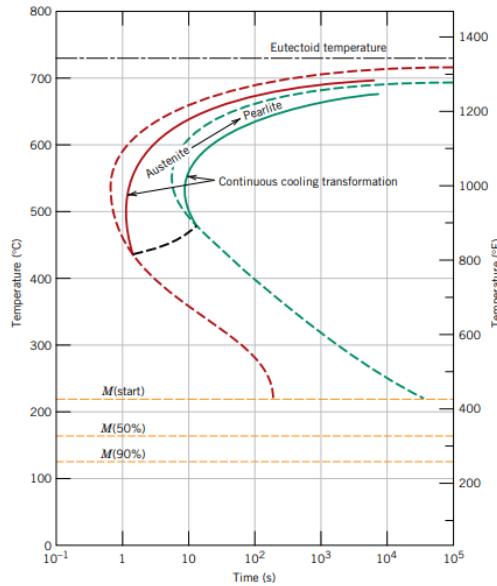
Gambar 2.7 Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*)

(Jordi et al., 2017)

2.8 Continuous-Cooling Transformation Diagrams

Perlakuan panas isotermal tidak mudah untuk dilakukan karena paduan harus didinginkan dengan cepat dan dipertahankan pada temperatur yang lebih tinggi dari temperatur yang lebih tinggi di atas eutektoid. Sebagian besar perlakuan panas untuk baja melibatkan pendinginan spesimen secara terus-menerus hingga suhu kamar. Diagram transformasi isotermal hanya berlaku untuk kondisi suhu konstan; diagram ini harus dimodifikasi untuk transformasi yang terjadi saat suhu terus berubah. Untuk pendinginan terus-menerus, waktu yang dibutuhkan untuk reaksi dimulai dan berakhir tertunda. Dengan demikian kurva isotermal bergeser ke waktu yang lebih lama dan suhu yang lebih rendah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 untuk paduan besi-karbon dengan komposisi eutektoid. Plot yang berisi kurva reaksi awal dan akhir yang dimodifikasi tersebut disebut diagram

transformasi pendinginan berkelanjutan (CCT). Beberapa kontrol dapat dipertahankan atas laju perubahan suhu, tergantung pada lingkungan pendinginan (Callister & David Rethwisch, 2013).

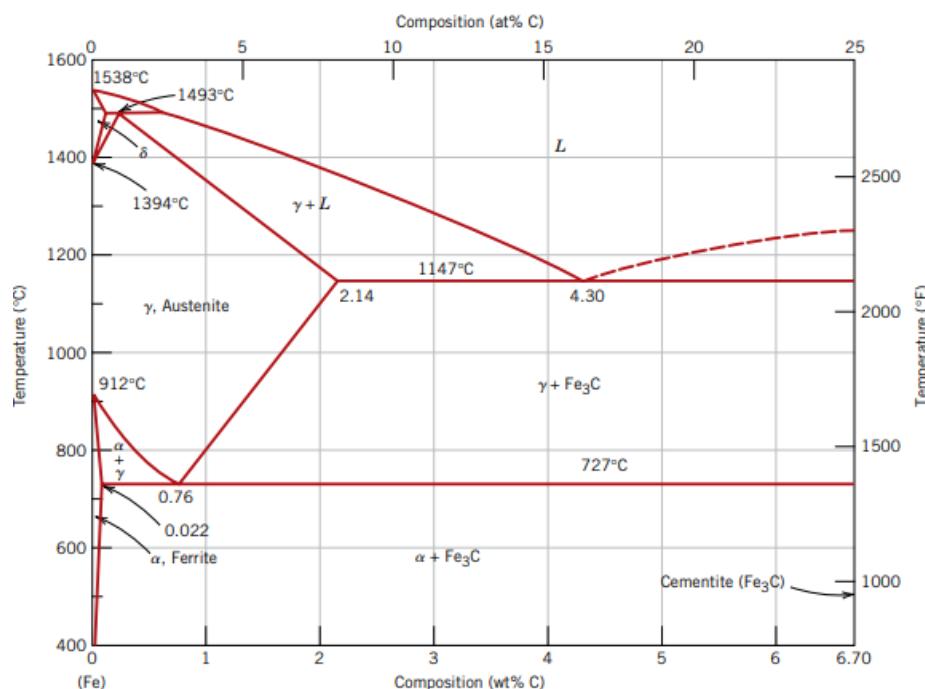


Gambar 2.8 Diagram *Continuous Cooling Transformation*
(Callister & David Rethwisch, 2013)

2.9 Struktur Mikro

Sifat fisik khususnya perilaku mekanis suatu material sering kali bergantung pada struktur mikro. Struktur mikro dapat diamati secara langsung menggunakan mikroskop optik atau elektron. Dalam paduan logam, struktur mikro dicirikan oleh jumlah fase yang ada, proporsinya, dan cara distribusi atau penataannya. Struktur mikro paduan bergantung pada variabel seperti elemen paduan yang ada, konsentrasinya, dan perlakuan panas paduan (yaitu, suhu, waktu pemanasan pada suhu, dan laju pendinginan hingga suhu kamar). Setelah pemolesan dan penggoresan yang tepat, fase yang berbeda dapat dibedakan berdasarkan penampilannya. Misalnya, untuk paduan dua fase, satu fase mungkin tampak terang dan fase lainnya gelap. Bila hanya terdapat satu fase atau larutan padat, teksturnya seragam (Callister & David Rethwisch, 2013).

Struktur mikro meliputi distribusi fasa-fasa. Distribusi inklusi, segregasi, efek penggeraan material seperti dekarburasi, penggeraan panas, dan penggeraan dingin, serta ukuran dan bentuk butir. Analisis struktur mikro dilakukan untuk memperkirakan sifat-sifat material, menganalisis kegagalan, dan memeriksa proses-proses yang pernah dialami oleh suatu material. Dalam menganalisis struktur mikro, kita perlu mengetahui klasifikasi material logam (Purwanto & Haris, 2022). Diagram fasa Fe-Fe₃C dapat dilihat pada gambar 2.5 sebagai berikut.



Gambar 2.9 Diagram Phasa Iron-Carbon

(Callister & David Rethwisch, 2013)

Struktur mikro merupakan struktur terkecil yang terdapat dalam suatu material yang keberadaannya tidak dapat dilihat dengan mata telanjang, tetapi harus menggunakan suatu alat seperti mikroskop optik, mikroskop elektron, ataupun mikroskop sinar-X. Struktur mikro biasanya terdiri dari komponen fasa-fasa dari suatu material, sebagaimana pada material baja, fasa tersebut biasanya ditunjukkan dalam jenis fasa ferrit, austenit, pearlite, martensit, cementit (besi karbida) dan bainit. Setiap fasa tersebut memiliki

karakteristik tertentu yang menentukan sifat mekanik dari suatu material logam. Maka dari itu, struktur mikro sangat penting untuk diamati agar teridentifikasi fasa-fasa pembentuk dari suatu material (Ilham et al., 2023).

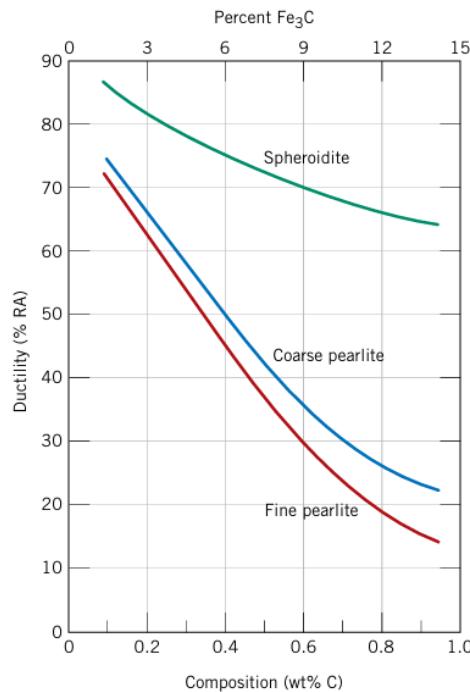
2.9.1 Ferit

Baja yang memiliki struktur mikro ferit terdapat pada baja dengan kandungan karbon rendah. Di mana kelarutan karbon dalam fasa α sekitar 0,008%. Struktur mikro butir ferit berbentuk *polygonal*. Ferit adalah fasa yang bersifat lunak dengan kekuatan rendah (Abdunnaser, 2015). Struktur ferrite sering juga disebut besi murni. Struktur ferrite dapat berubah – ubah sifat apabila dipanaskan (Muttaqin, 2020).

2.9.2 Pearlite

Pearlite merupakan campuran antara ferrite dan cementite berlapis dalam suatu struktur butir. Laju pendinginan lambat menghasilkan pearlite kasar dan laju pendinginan cepat menghasilkan pearlite halus (Muttaqin, 2020). Pearlite halus lebih keras dan kuat daripada pearlite kasar, seperti yang ditunjukkan oleh dua kurva atas Gambar 2.3, yang memetakan kekerasan versus konsentrasi karbon (Callister & David Rethwisch, 2013).

Untuk perlite halus, terdapat lebih banyak batas yang harus dilalui dislokasi selama deformasi plastik. Dengan demikian, penguatan dan pembatasan gerakan dislokasi yang lebih besar pada perlite halus menyebabkan kekerasan dan kekuatannya yang lebih besar. Pearlite kasar lebih lentur daripada perlite halus, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.6, yang menggambarkan persentase pengurangan area versus konsentrasi karbon untuk kedua jenis struktur mikro. Perilaku ini merupakan hasil dari pembatasan deformasi plastik yang lebih besar pada perlite halus (Callister & David Rethwisch, 2013).



Gambar 2.10 Keuletan (%RA) sebagai fungsi konsentrasi karbon untuk baja karbon biasa yang mempunyai mikrostruktur perlit halus dan kasar serta sferoidit

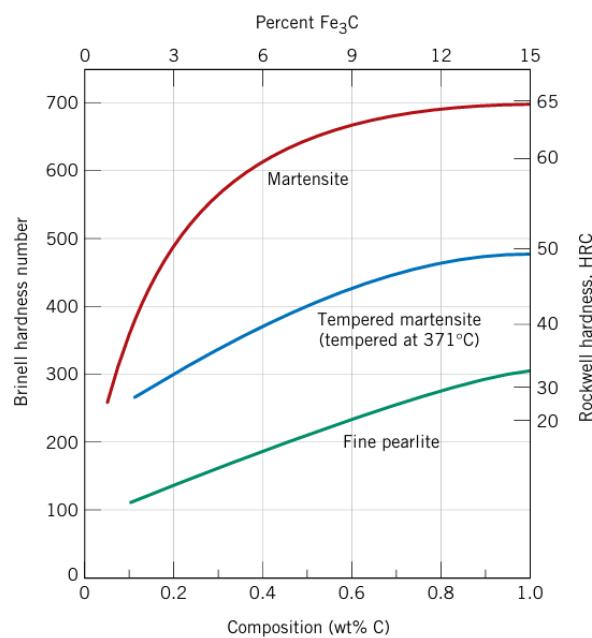
(Callister & David Rethwisch, 2013)

2.9.3 Austenite

Struktur austenite adalah struktur yang asalnya dari struktur ferrite yang diberi panas pada suhu $910^{\circ}\text{C} - 1391^{\circ}\text{C}$ atau struktur pearlite yang dipanaskan pada suhu $723^{\circ}\text{C}-1392^{\circ}\text{C}$ (Muttaqin, 2020). Jika material baja dipanaskan sedikit diatas temperatur transformasi dengan waktu yang cukup, maka diperoleh larutan padat austenit dengan struktur kps. Fasa ini dapat melarutkan karbon sebagai larutan padat intertisial sebanyak 2,06% pada suhu 1148°C dan kemudian turun menjadi 0,8% pada suhu 723°C . Reaksi setimbang yang terjadi waktu pendinginan adalah Austenite – Ferit + Sementit (Abdunnaser, 2015).

2.9.4 Martensite

Struktur martensite adalah fasa larutan padat lewat jenuh dari karbon dalam sel satuan tetragonal pusat badan atau Body Centered Tetragonal (BCT) (Muttaqin, 2020). Dari berbagai struktur mikro yang dapat dihasilkan untuk paduan baja tertentu, martensit adalah yang paling keras dan terkuat. Martensite juga yang paling getas dengan keuletan yang dapat diabaikan. Kekerasannya bergantung pada kandungan karbon, hingga sekitar 0,6 wt% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, yang memetakan kekerasan martensit dan perlit halus sebagai fungsi dari persentase berat karbon. Berbeda dengan baja perlit, kekuatan dan kekerasan martensit tidak dianggap terkait dengan struktur mikro (Callister & David Rethwisch, 2013).



Gambar 2.11 Kekerasan (pada suhu kamar) sebagai fungsi konsentrasi karbon untuk baja martensit karbon biasa, baja martensit temper ditemper pada suhu 371°C (700°F), dan baja perlitik.

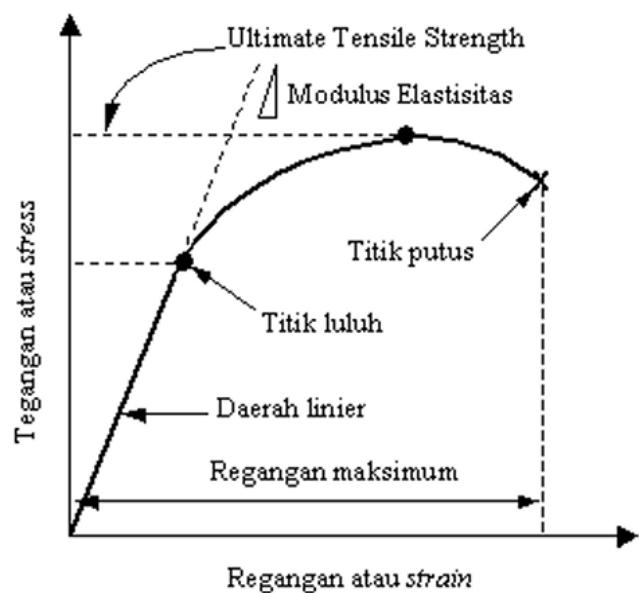
(Callister & David Rethwisch, 2013)

2.10 Pengamatan Metalografi

Pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui fasa-fasa apa saja yang terdapat dalam material. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan *stereo microscope*. Mikroskop optik, atau juga disebut sebagai "mikroskop cahaya", adalah jenis mikroskop yang memanfaatkan cahaya dan sistem lensa untuk memperbesar gambar spesimen kecil. Mikroskop optik dasar sangat sederhana, meskipun ada banyak desain lain yang kompleks dengan tujuan untuk meningkatkan resolusi dan kontras dari specimen (Fathu Rohman et al., 2014).

2.11 Pengujian Tarik

Pengujian tarik (*tensile test*) dilakukan untuk mengetahui besaran nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh (*yield strength*), dan persentase elongasi dari spesimen baja (Ilham et al., 2023). Uji tarik rekayasa sering digunakan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan data pendukung spesifikasi bahan. Dalam uji tarik, spesimen uji tarik diberi beban gaya tarik sesumbu yang bertambah besar secara kontinyu. Diagram yang diperoleh dari uji tarik pada umumnya digambarkan sebagai diagram tegangan-regangan (Dwi Haryadi, 2006). Bila kita terus menarik suatu bahan sampai putus, kita akan mendapatkan profil tarikan yang lengkap berupa kurva. Kurva ini menunjukkan hubungan antara tegangan dengan regangan. Perubahan panjang dalam kurva disebut sebagai regangan teknik (ϵ eng.), yang didefinisikan sebagai perubahan panjang yang terjadi akibat perubahan statik (ΔL) terhadap panjang batang mula-mula (L_0). Tegangan yang dihasilkan pada proses ini disebut dengan tegangan teknik (σ eng.), dimana didefinisikan sebagai nilai pembebanan yang terjadi (F) pada suatu luas penampang awal (A_0) (Istiqlaliyah & Rhohman, 2016). Diagram tegangan regangan ditunjukkan seperti pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.12 Diagram Tegangan Regangan

(Jordi et al., 2017)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai dari bulan Agustus sampai dengan bulan Oktober 2025 di Laboratorium Material Teknik Universitas Lampung dan Laboratorium Teknik Mesin Institut Teknologi Sumatera. Bahan yang akan digunakan adalah baja karbon rendah AISI 1006. Adapun prosedur dalam pengujian ini yaitu pengujian kekerasan, uji tarik, dan struktur mikro.

3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan dan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Baja AISI 1006

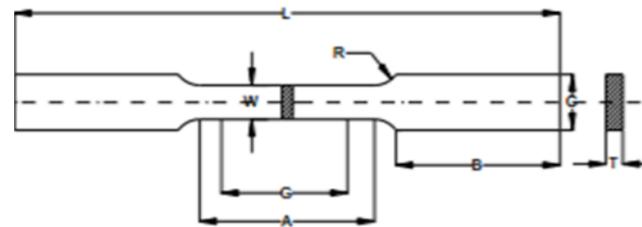
Baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AISI 1006 seperti ditunjukkan pada gambar 3.1. Baja AISI 1006 merupakan jenis baja karbon rendah dengan nilai kandungan karbon sebesar 0.06%. Baja dengan kandungan karbon ini memiliki beberapa keunggulan khususnya dalam industri manufaktur diantaranya yaitu memiliki keuletan yang tinggi sehingga memudahkan dalam proses fabrikasi selanjutnya.



Gambar 3.1 Baja AISI 1006

3.2.2 Spesimen Uji Tarik

Spesimen yang digunakan untuk pengujian disesuaikan dengan standar ASTM E-8 seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Dimensi Spesimen Uji Tarik

L : 200 mm W : 12,5 mm B : 50 mm C : 20 mm
 T : 1,6 mm G : 50 mm A : 57 mm R : 12,5 mm

3.3 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

3.3.1 Furnace

Furnace merupakan salah satu alat yang digunakan dalam proses perlakuan panas dimana alat ini untuk memanaskan spesimen sampai temperatur *annealing*. Setelah *heating* tercapai spesimen ditahan pada waktu tertentu lalu didinginkan dalam tungku atau *furnace* sampai pada temperatur ruangan. Adapun *furnace* seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Furnace

Tabel 3.1 Spesifikasi Furnace

Model	<i>Carbolite Gero CWF 1300</i>
Tegangan	230 V
Tipe	<i>Muffle Furnace / Box Furnace</i>
Kontrol Suhu	<i>PID digital controller (Eurotherm)</i>
Material Isolasi	Bata keramik isolasi dan serat alumina
<i>Max Temperature</i>	1300°C
Pemanasan Maksimum (Rate)	Hingga 30 °C per menit

3.3.2 *Laser Cutting*

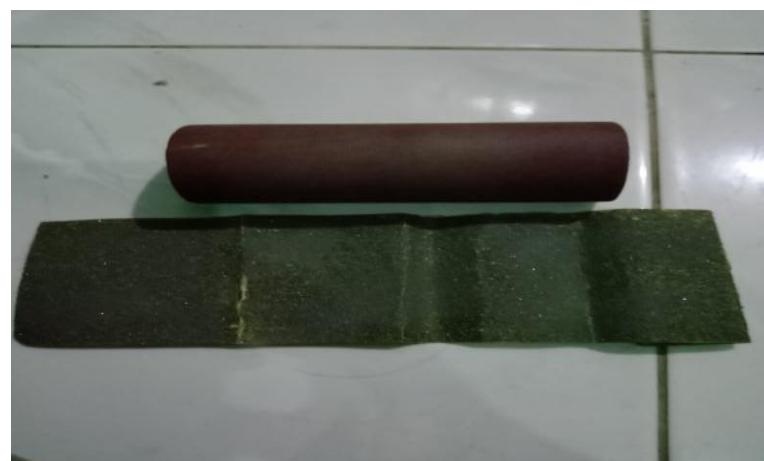
Mesin potong logam atau *laser cutting* digunakan untuk membentuk dimensi yang diinginkan dari spesimen yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan standar yang terapkan seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Laser Cutting

3.3.3 Amplas

Amplas digunakan sebagai penghalus permukaan spesimen agar permukaan menjadi lebih halus dan bersih. Tingkatan amplas yang digunakan adalah 80, 120, 240, 320, 500, 1000, 1500, dan 2000 seperti ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Amplas

3.3.4 Autosol

Autosol digunakan untuk mengkilapkan logam pada spesimen yang digunakan untuk penelitian yang akan dilakukan seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Autosol

3.3.5 Alat Uji Tarik

Merupakan alat yang digunakan dalam menguji kekuatan tarik dari material yaitu menggunakan mesin uji tarik dengan tipe seperti ditunjukkan gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7 Alat Uji Tarik

Tabel 3. 2 Spesifikasi Alat Uji Tarik

Spesifikasi	Keterangan
Model	MTS Landmark 370.10
<i>Max Test Force</i>	250 kN
<i>Test Space</i>	600 mm (tarik)/ 700 mm (tekan)
<i>bending supporting roller spacing</i>	305 mm
<i>Branch roll width</i>	100 mm
<i>Test speed range</i>	0,01 – 500 mm/menit (stepless)
<i>Deformation measurement accuracy</i>	±0,5% (kisaran 0,2–10 mm)
Berat Keseluruhan	1700 kg
Dimensi (P x L xT)	1200 × 600 × 2500 mm
Konsumsi Daya	4 kW

3.3.6 Mikroskop Olympus BX53M

Mikroskop Optik digunakan untuk mengetahui perubahan struktur mikro benda uji. Adapun mikroskop optik seperti ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.8 Mikroskop Olympus BX53M

Tabel 3.3 Spesifikasi Mikroskop Olympus BX53M

Model	Mikroskop Metalurgi BX53M include Digital Camera DP23 & Software Preciv
Objective Lens	5x, 10x, 20x dan 50x
Total Pembesaran	50x, 100x, 200x, 400x
Kamera mikroskop	<ul style="list-style-type: none"> - Olympus DP23 - Resolusi : 6.4 - Megapiksel ukuran : 1/1.8 in - Tipe Rana : Rana Bergulir - Ukuran Piksel (um): 2.4 x 2.4 - Kecepatan Bingkai Langsung : 30 hingga 25 Kamera I/F : USB3.1 - Adaptor Kamera : C-mount - Kamera Digital DP23-CU Olympus 6.4MP - Kamera Adaptor C-Mount
Perangkat Lunak	<ul style="list-style-type: none"> - PC Windows 10/Window 11 & Office 2019 Asli (CPU HP/Dell Intel Core i3, RAM 4GB, HDD/SDD 512, DVDRW, kartu VGA 1GB - Card Reader, K/B - Mouse - Wi-Fi, Lan, - Monitor LCD 21 inci) - Fitur Perangkat Lunak PRECiV

3.4 Metode Penelitian

Adapun metode penelitian terbagi menjadi beberapa tahap, yaitu tahap pertama persiapan spesimen atau benda uji, kemudian tahap perlakuan panas, selanjutnya tahap pengujian, serta tahap pengambilan data.

3.4.1 Persiapan Spesimen

1. Spesimen Pengujian Tarik

Untuk pengujian tarik pada material, baja karbon rendah AISI 1006 disiapkan dan dipotong sesuai dengan dimensi ketentuan ASTM E8 dengan panjang 200 mm, lebar 20 mm, dan tebal 1,6 mm.

3.4.2 Perlakuan Panas

Adapun tahapan perlakuan panas yang dilakukan pada baja karbon rendah AISI 1006 yaitu:

1. Baja karbon rendah AISI 1006 yang sudah sesuai dengan dimensi dimasukan kedalam tungku pemanas (*furnace*) untuk dipanaskan dengan temperatur pemanasan 450°C, 575°C, dan 700°C.
2. Setelah temperatur baja telah mencapai temperatur *annealing*, selanjutnya dilakukan penahanan selama 7 jam.
3. Spesimen yang sudah dipanaskan kemudian didinginkan didalam *furnace* selama 30 jam sampai mencapai suhu ruangan.

3.4.3 Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E8.

Adapun tahapan dari pengujian tarik adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji sesuai standar ASTM E8.
2. Memasang spesimen sejajar dan sesuai diposisikan pada grip mesin uji tarik.
3. Sebelum dilakukan pengujian, pastikan mesin dalam keadaan netral/indikator nol.
4. Menjalankan proses penarikan pada alat uji tarik.
5. Mengecek dan mengetahui data hasil uji tarik dari komputer.
6. Mengelola dan menganalisis hasil data pengujian tarik.

3.4.4 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan dilakukan menggunakan OM untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi pada besi cor setelah diberi perlakuan panas *annealing*.

3.4.5 Pengambilan Data

1. Pengujian Tarik

Adapun data pengujian tarik pada baja karbon rendah AISI 1006 adalah sebagai berikut:

Tabel 3.4 Parameter Pengujian Uji Tarik

Specimen		w	t	Ao	Af	Lo	Lt	Fy	F_{max}
Baja Tanpa <i>Annealing</i>	Raw	1							
		2							
		3							
Baja <i>Annealing</i>	450°C	1							
		2							
		3							
	575°C	1							
		2							
		3							
	700°C	1							
		2							
		3							

Tabel 3.5 Data Hasil Uji Tarik (Yu et al., 2024).

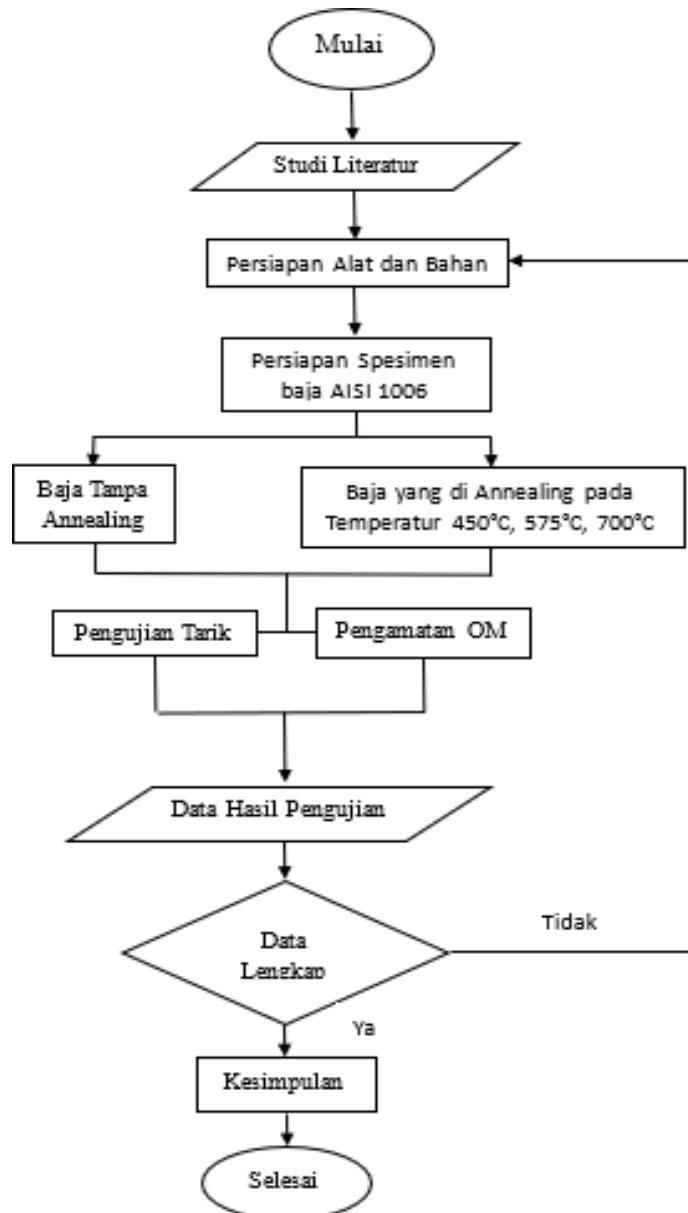
Specimen		<i>Yield strength</i> (MPa)	<i>Tensile strength</i> (MPa)	Total Elongation %	Average
Baja Tanpa <i>Annealing</i>	Raw	1			
		2			
		3			
Baja <i>Annealing</i>	450°C	1			
		2			
		3			
	575°C	1			
		2			
		3			
	700°C	1			
		2			
		3			

2. Pengamatan OM

Selanjutnya setelah pengujian sebelumnya, selanjutnya dilakukan pengujian struktur mikro.

3.5 Diagram Alir

Alur proses penelitian ditunjukkan pada diagram alir berikut ini:



Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan diperoleh data dan hasil pengolahan data, sehingga penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Proses annealing pada baja AISI 1006 menunjukkan pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik dan kekuatan luluh (*yield strength*). Spesimen yang dipanaskan pada temperatur 450°C, 575°C, dan 700°C mengalami penurunan kekuatan tarik. Meskipun demikian, *yield strength* meningkat pada 450°C dan 575°C, menunjukkan bahwa annealing memperkuat material. Pada 700°C, *yield strength* menurun, yang mengindikasikan bahwa rekristalisasi pada temperatur tinggi mengurangi kekuatan luluh material.
2. Berdasarkan hasil uji tarik, perlakuan panas pada temperatur 450°C, 575°C, dan 700°C menunjukkan penurunan kekuatan tarik (*tensile strength*) dan perubahan pada kekuatan luluh (*yield strength*) dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan panas. Spesimen pada temperatur 450°C memiliki persentase penurunan *tensile strength* sebesar 0,326 % diikuti kenaikan *yield strength* sebesar 8,538% dibandingkan sampel tanpa perlakuan panas. Pada 575°C, *tensile strength* kembali mengalami penurunan sebesar 3,265%, sementara *yield strength* naik sebesar 11,173% dibandingkan sampel tanpa perlakuan panas. Pada 700°C, *tensile strength* tetap turun sebesar 6,639%, dan diikuti *yield strength* yang mengalami penurunan sebesar 2,489% dibandingkan dengan sampel tanpa perlakuan panas.

3. Pengamatan pada mikrostruktur baja AISI 1006 menunjukkan bahwa ukuran butir material semakin membesar seiring dengan peningkatan temperatur pada proses *annealing*. Pada temperatur 450°C, ukuran butir mulai membesar dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan panas, dan pada temperatur 575°C dan 700°C, ukuran butir semakin besar. Proses pemanasan ini menyebabkan rekristaliasi dalam material, yang meningkatkan ukuran butir.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki penelitian-penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya, untuk memperoleh nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang lebih akurat, spesimen diukur dengan saksama sebelum dilakukan pengujian, membantu meminimalkan kesalahan dalam perhitungan dan menghasilkan nilai kekuatan tarik yang lebih tepat. Selain itu, pengukuran yang lebih teliti juga dapat mengurangi nilai simpangan (*standar deviasi*) yang lebih besar pada hasil uji tarik.
2. Sebaiknya, ukuran butir material diamati dengan lebih mendalam menggunakan teknik yang lebih tepat dan akurat. Dengan pengamatan yang lebih mendalam, nilai ukuran butir yang diperoleh akan lebih pasti, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara ukuran butir dan sifat mekanik material pada berbagai temperatur perlakuan panas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdunnaser, S. (2015). Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon Astm A-36. *Bina Teknika*, 11(2).
- Adi Ganda Putra, Pawawoi, & Royen B S. (2020). Pengaruh Variasi Waktu Proses Manganisasi Terhadap Kekerasan dan Ketebalan Lapisan pada Baja Perkakas AISI D2. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 4(1), 333–347. <https://doi.org/10.26874/jt.vol4no1.247>
- Ardhyananta, H., Zulfikar, A., Purniawan, A., Rasyida, A., & Widystuti, D. (2020). Pengaruh Komposisi Nikel (Ni) terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Paduan Baja Tahan Karat Kekuatan Tinggi Fe-C-Mn-Cr-Ni melalui Metode Proses Pengecoran Menggunakan Tungku Pembakaran Gas. 11, 20–26. <https://www.trijurnal.lemlit.trisakti.ac.id/mesin>
- Azimi, M., Bukhari, & Ariefin. (2020). Analisa Pengaruh Holding Time Pada Proses Perlakuan Panas Annealing Baja Aisi 1050 Hasil Pengelasan Smaw Terhadap Ketangguhan Impak. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 4(2).
- Binudi, R., Bintang Adjiantoro Pusat Penelitian Metalurgi LIPI Gedung, dan, Puspiptek Serpong, K., & Selatan, T. (2014). Pengaruh Unsur Ni, Cr Dan Mn Terhadap Sifat Mekanik Baja Kekuatan Tinggi Berbasis Laterit.
- Blau, P. J., Huffman, D. D., Korb, L. J., International, R., Neff, D. V, Semiatin, • S Lee, Laboratory, W., Vander, G. F., & Walton, H. W. (1998). *Metals Handbook*.
- Callister, W. D., & David Rethwisch, J. G. (2013a). Materials Science And Engineering.
- Chandio, A. D., Shah, A. A., Channa, I. A., Abro, S. H., Raza, Y., Rizwan, M., Ali, M., Iqbal, K., Ansari, M. B., & Salman, W. (2020). Variation in Mechanical Properties of SAE 1006 Interstitial Free (IF) Steel Sheets During Cold Rolling. *NUST Journal of Engineering Sciences*, 13(2), 74–80. <https://doi.org/10.24949/njes.v13i2.623>
- Data Base PT. Krakatau Steel. (2024). Data Base PT. Krakatau Steel.
- Davis, J. R. . (1998). Stainless steels. ASM International.

- Dwi Haryadi, G. (2006). Pengaruh Suhu *Tempering* Terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Pada Baja K-460.
- Edwar, C., & Wallace, F. J. (1982). Individual And Combined Effects Of Sulfur And D Phosphorus On The *Toughness* Of High Strength Steels.
- Fathoni, I. N., Alfirano, A., & Muljono, D. (2023). Upaya Perbaikan Sifat Mekanik Baja Plat Join G 3131 Sphc Melalui Simulasi Proses Intercritical Annealing Di Industri Konstruksi Baja. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(3), 1013–1022. <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i3.1649>
- Fathu Rohman, H., Umardani, Y., & Tri Hardjuno, A. (2014). Pengaruh Proses Heat Treatment Annealing Terhadap Struktur Mikro Dan Nilai Kekerasan Pada Sambungan Las Thermite Baja Np-42. In *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 2, Issue 3).
- Ge, S., Zhao, X., Zhou, W., Xu, X., Tang, X., Ren, J., Zhang, J., & Yi, Y. (2025). The Influence of Annealing Temperature on the Microstructure and Performance of Cold-Rolled High-Conductivity and High-Strength Steel. *Crystals*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/crust15050469>
- Ghufron, & Fuadi. (2024). Pengaruh Variasi Quenching-Holding Time terhadap Nilai Tegangan Tarik pada Proses Pengelasan Baja Karbon Rendah. 14(01), 172–182.
- Gong, W., Wang, X., Song, X., Wu, H., & He, J. (2024). Effect of intercritical annealing on microstructure and impact *toughness* of ultra-low-carbon steel after welding thermal simulation. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 3089–3095. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.242>
- Gunawan, E. (2017). Analisa Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah (St41) Dengan Metode Pack Carbirizing. *Teknika : Engineering and Sains Journal*, 1(2).
- Hakiki, N., & Sudiro, T. (2021). Pengaruh Annealing terhadap Fasa dan Mikrostruktur Lapisan Fe-Mo-Al pada Baja Karbon Rendah yang Didepositkan dengan Teknik Pemanduan Mekanis. <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jf>
- Harahap, R. P., & Rahmat, B. (2017). Analisa Pengaruh *Stress relief annealing* Terhadap Perubahan Sifat Mekanik Baja Tahan Karat Type SUS 304. In *Zona Mesin ISSN 2087-698X* (Vol. 8, Issue 2).

- Hari Priyambodo, B., Ilmal Yaqin, R., Cikal Nugroho, K., Studi Teknik Mesin, P., Tinggi Teknologi Warga Surakarta, S., Studi Permesinan Kapal, P., & Kelautan dan Perikanan Dumai, P. (2021). Pengaruh Perlakuan Annealing Dan Shoot Peening Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Jis S45c. *Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2).
- Haryadi, G. D., Utomo, A. F., & Ekaputra, I. M. W. (2021). Pengaruh Variasi Temperatur Quenching Dan Media Pendingin Terhadap Tingkat Kekerasan Baja AISI 1045. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(2), 255. <https://doi.org/10.32497/jrm.v16i2.2633>
- Ilham, A., Adzima, Heryanto, O. D., Ferdinand, F. A., & Azmy, I. (2023). Pengaruh Variasi Proses Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Baja Aisi 1018. *Sigma Teknika*, 6(1).
- Istiqlaliyah, H., & Rhohman, F. (2016). Pengaruh Variasi Temperatur Annealing Terhadap Kekerasan Sambungan Baja St 37. *Jurnal Teknik Mesin (Jtm)*, 5(4).
- Jordi, M., Yudo, H., & Jokosisworo, S. (2017). *Jurnal Teknik Perkapalan Analisa Pengaruh Proses Quenching Dengan Media Berbeda Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja St 36 Dengan Pengelasan SMAW*. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 5(1), 272. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/naval>
- Korda, Muda, I., & Soepriyanto, S. (2012). Tekstur Deformasi Dan Rekristalisasi Baja Lembaran Canai Dingin Bebas Interstisi. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 15(2).
- Krakatau Steel. (2024). Manual Book.
- Li, Z., Gu, H., Luo, K., Kong, C., & Yu, H. (2024). Achieving High Strength and Tensile Ductility in Pure Nickel by Cryorolling with Subsequent Low-Temperature Short-Time Annealing. *Engineering*, 33, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.01.019>
- Matweb. (2024). Matweb.
- Muhdori, Abdillah, H., & Raka Irawan. (2023). Analisa Kekerasan Material Hasil Annealing Pada Pipa Long Elbow Material Stainless Steel Astm 304 L Menggunakan Hardness Tester. *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*, 4(02), 1–5. <https://doi.org/10.35970/accurate.v4i02.2367>
- Muliastri, D., Lesmana, P., Eka Septiyani Jurusan Teknik Mesin, D., Negeri Bandung Jalan Gegerkalong Hilir, P., Bandung Barat, K., & Barat, J. (2022). Pengaruh Sudut Die Penarikan Kawat Baja AISI 1006 dengan Menggunakan

- Finite Element Method. In Jurnal Rekayasa Mesin (Vol. 17, Issue 2). <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>
- Mustofa, B. (2015). Analisa Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Besi Strip 30x4 Mmyang Mendapat Perlakuan Panas Karburising. <http://jurnal.ulb.ac.id/index.php/JTM>.
- Muttaqin, I. (2020). Analisa Metalurgi Baja Paduan Pada Shackle Kapasitas 12 Ton Setelah Dilakukan Proses Pemanasan Disertai Pendinginan. Jurnal Jieom, 3(1).
- Novitasari, A., & Muliastri, D. (2023). Analisis Pengaruh Annealing yang Dikombinasikan Dengan Repetitive Hammering Terhadap Nilai Kekerasan Pada Baja AISI 201.
- Paolinelli, S. C., & da Cunha, M. A. (2006). Effect of *stress relief annealing* temperature and atmosphere on the magnetic properties of silicon steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 304(2). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.02.187>
- Purboputro, I. P. (2006). Pengaruh Waktu Penahanan Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis Pada Proses Pengkarbonan Padat Baja Mild Steel.
- Purwanto, D., & Haris, O. (2022). Untuk Poros (Shaft) Dengan Menggunakan Proses Heat Treatment. Jurnal Suara Teknik 13 Journal, 13(2).
- Puspasari, V., Prasetyo, M. A., Hala, Anwar, M. S., Herbirowo, S., & Mabruri, E. (2020). Pengaruh Annealing Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Tahan Karat Aisi 410-3mo-3ni. Metalurgi.
- Putra, A. P., Juniorsih, A., & Alfirano, A. (2020). Pengaruh waktu tahan dan siklus spheroidizing terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon rendah JIS G 3302 Grade SGC 400. Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi, 16(2), 179. <https://doi.org/10.36055/tjst.v16i2.9176>
- Qudzsy, R., Praja, W., Saefulloh, I., Pramono, A., Mesin, T., Teknik, F., Sultan, U., & Tirtayasa, A. (2020). Pengaruh Temperatur Dan Waktu Penahanan Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah. Jurnal Teknik Mesin, 13(2), 56–63. <http://ejournal2.pnp.ac.id/index.php/jtm>
- Sari, N. H. (2017). Perlakuan Panas Pada Baja Karbon: Efek Media Pendinginan Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro. Jurnal Teknik Mesin, 6(4), 263. <https://doi.org/10.22441/jtm.v6i4.2091>

- Sari, N. H., Prasetya, L. T., & Catur, A. D. (2018). Baja AISI 1006: Efek Suhu Pemanasan Terhadap Sifat Mekanik Dan Strukturmikro. *Jurnal METTEK*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.24843/mettek.2018.v04.i01.p01>
- Shaabani, A., Jamaati, R., & Hosseiniipour, S. J. (2024). Mechanical anisotropic behavior of low-carbon steel processed by asymmetric rolling. *Heliyon*, 10(13). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34004>
- Souza, R. G. De, Kunst, S. R., Fozza, I. S., Alves, S., Soares, L. G., Júnior, P. H., Fuhr, L. T., & Oliveira, C. T. (2024). Influence of H 3 PO 4 on SAE / AISI 4340 steel quenching.
- Sukarno, N. A., Azis, A., Vebriyadi, H., Borromeus, C., Sampurno, K., Korespondensi, P., Nota, :, & Sukarno, A. (2024). Pengaruh variasi suhu terhadap sifat kekerasan Baja Aisi 1045 pada proses heat treatment dengan media pendingin oli. *Perwira Journal Of Science & Engineering*, 4(2), 78–80.
- Tang, X., Cheng, G., Liu, Y., Wang, C., Meng, Z., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, Z., Huang, J., Yu, X., & Xu, X. (2023). Microstructure and properties evolution during annealing in low-carbon Nb containing steel with high strength and electrical conductivity: an experimental and theoretical study. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 3054–3066. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.093>
- Tanhaei, S., Gheisari, K., & Zaree, S. R. A. (2018). Effect of cold rolling on the microstructural, magnetic, mechanical, and corrosion properties of AISI 316L austenitic stainless steel. 25(6). <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1610-y>
- Tsamroh, D. I., Yazirin, C., & Putra, A. D. (2024). Peningkatan Ketahanan Aus Baja Karbon Rendah Melalui Variasi Suhu Carburizing. *RING Mechanical Engineering*, 4(1), 56–61.
- Wang, J., Shen, Y., Liu, Y., Wang, F., & Jia, N. (2019). Tailoring strength and ductility of a Cr-containing high carbon steel by cold-working and annealing. *Materials*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/MA12244136>
- Wen, Q., Cheng, Z., Liu, S., Tan, X., Chen, Y., & Liu, J. (2024). Effect of high magnetic field annealing on microstructure, texture, and properties of high-strength non-oriented silicon steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 2252–2262. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.223>
- Wicaksono, I., Ismarwanti, S., Setiawan, J., Susetyo, F. B., & Syamsuir, S. (2021). Pengaruh Media Pendingin Terhadap Karakteristik Mekanik Dan Struktur

- Mikro Pada Pelat Baja Karbon Rendah. *Urania : Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, 27(1), 21. <https://doi.org/10.17146/urania.2021.27.1.6187>
- Widya, F., Ashari, S., Hafizh, A., Rasyid, A., Arif Irfa'i, M., & Drastiawati, S. (2024). Pengaruh Variasi Temperatur Post Weld Heat Treatment Full Annealing Pada Material Sa 516 G 70 Terhadap Kekuatan Tarik Dan Ketangguhan. *Jurnal Inovasi Teknologi Manufaktur, Energi, Dan Otomotif*, 2(2), 158–173. <http://https://jurnal.poliwangi.ac.id/index.php/jinggo/>
- Wiseno, E., & Irwandi, M. A. (2023). Pengaruh Austenisasi Baja S45c Pada Suhu 750° C Dan Queching Dengan Media Suhu Ruang, Air Dan Oil Oleh. 2(11), 4429–4446.
- Xu, K., Qiao, G. ying, Shi, X. bo, & Xiao, F. ren. (2021). Effect of stress-relief annealing on the fatigue properties of X80 welded pipes. *Materials Science and Engineering: A*, 807. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140854>
- Yu, S., Deng, Y. G., Tao, Z., Misra, R. D. K., & Yang, Y. P. (2024). Effects of intercritical annealing time on microstructure, tensile properties, and cryogenic *toughness* of newly designed ultra-low C low Ni Medium-Mn steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 1245–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.07.222>
- Zhang, Y., Yang, J., Xiao, D., Luo, D., Tuo, C., & Wu, H. (2022). Effect of Quenching and *Tempering* on Mechanical Properties and Impact Fracture Behavior of Low-Carbon Low-Alloy Steel. *Metals*, 12(7), 2–13. <https://doi.org/10.3390/met12071087>
- Zuo, S., Cheng, P., Wang, D., Du, B., Guan, K., & Zhang, J. (2022). Effect of Uniaxial Compressive Stress on Phase Transformation Kinetics of Low-Carbon Steel. *Materials*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/ma15134477>