

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA PROSES
QUENCHING MENGGUNAKAN MEDIA PENDINGIN
OLI SAE 5W-30 DAN SAE 140 TERHADAP KEKERASAN,
KETANGGUHAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1045**

(SKRIPSI)

Oleh :

Efnu Silahuda Wahid

2215021007



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

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA PROSES *QUENCHING* MENGUNAKAN MEDIA PENDINGINOLI SAE 5W-30 DAN SAE 140 TERHADAP KEKERASAN, KETANGGUHAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1045

Oleh

EFNU SILAHUDA WAHID

Baja AISI 1045 adalah salah satu material baja karbon sedang yang sedang banyak digunakan sebagai bahan utama pada pembuatan elemen mesin seperti sambungan perpipaan, poros, engkol, roda gigi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *holding time* dan media pendingin oli SAE 5W-30 dan oli SAE 140 pada proses *quenching* terhadap kekerasan, ketangguhan, dan struktur mikro baja AISI 1045. Variasi *holding time* yang digunakan adalah 30 menit, 60 menit, dan 120 menit. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kekerasan, uji impak, dan pengamatan struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material awal memiliki kekerasan rata-rata sebesar 200,7852 Kg/mm² dan ketangguhan sebesar 0,4025 J/mm² dengan struktur mikro *ferit* dan *perlit*. Setelah proses *quenching*, kekerasan material meningkat seiring bertambahnya *holding time*, di mana nilai tertinggi dicapai pada *holding time* 120 menit menggunakan oli SAE 5W-30 sebesar 237,0531 Kg/mm², sedangkan pada oli SAE 140 diperoleh nilai maksimum 227,9741 Kg/mm². Sebaliknya, nilai ketangguhan mengalami penurunan akibat proses *quenching*, di mana nilai impak terendah diperoleh pada *holding time* 120 menit sebesar 0,2271 J/mm² untuk oli SAE 5W-30 dan 0,2423 J/mm² untuk oli SAE 140. Pengamatan struktur mikro menunjukkan perubahan dari struktur *ferit-perlit* menjadi struktur yang didominasi *martensit*, dengan morfologi *martensit* lebih halus pada oli SAE 5W-30 dan lebih kasar pada oli SAE 140. Hasil ini membuktikan bahwa *holding time* yang lebih lama dan media pendingin dengan viskositas lebih rendah meningkatkan kekerasan namun menurunkan ketangguhan baja AISI 1045 akibat dominasi pembentukan fasa *martensit*.

Kata kunci: baja AISI 1045, *quenching*, *holding time*, oli SAE 5W-30, oli SAE 140, kekerasan, ketangguhan, struktur mikro, *martensit*.

ABSTRACT

THE EFFECT OF HOLDING TIME VARIATIONS IN THE QUENCHING PROCESS USING SAE 5W-30 AND SAE 140 OIL MEDIA ON THE HARDNESS, TOUGHNESS AND MICROSTRUCTURE OF AISI 1045 STEEL

By

EFNU SILAHUDA WAHID

AISI 1045 steel is a medium carbon steel widely used as a primary material for machine elements such as piping joints, shafts, crankshafts, and gears. This study aims to analyze the effect of holding time variation and quenching media, namely SAE 5W-30 oil and SAE 140 oil, on the hardness, toughness, and microstructure of AISI 1045 steel. The holding times used in this study were 30 minutes, 60 minutes, and 120 minutes. The tests conducted included hardness testing, impact testing, and microstructural observation. The results show that the initial material has an average hardness of 200.7852 kg/mm² and a toughness value of 0.4025 J/mm² with a ferrite–pearlite microstructure. After the quenching process, the hardness increases with increasing holding time, where the highest value is achieved at a holding time of 120 minutes using SAE 5W-30 oil, reaching 237.0531 kg/mm², while using SAE 140 oil the maximum hardness obtained is 227.9741 kg/mm². Conversely, the toughness decreases due to the quenching process, where the lowest impact energy is obtained at a holding time of 120 minutes, namely 0.2271 J/mm² for SAE 5W-30 oil and 0.2423 J/mm² for SAE 140 oil. Microstructural observations show a transformation from a ferrite–pearlite structure to a martensite-dominated structure, with finer martensite morphology in SAE 5W-30 oil and coarser martensite in SAE 140 oil. These results indicate that longer holding time and lower-viscosity quenching media increase hardness but reduce the toughness of AISI 1045 steel due to the dominant formation of the martensitic phase.

Keywords: *AISI 1045 steel, quenching, holding time, SAE 5W-30 oil, SAE 140 oil, hardness, toughness, microstructure, martensite.*

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA PROSES *QUENCHING*
MENGUNAKAN MEDIA PENDINGIN OLI SAE 5W-30
DAN SAE 140 TERHADAP KEKERASAN, KETANGGUHAN
DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1045**

Oleh

EFNU SILAHUDA WAHID

Skripsi

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

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

Judul Skripsi : PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA
PROSES *QUENCHING* MENGGUNAKAN MEDIA
PENDINGIN OLI SAE 5W-30 DAN SAE 140
TERHADAP KEKERASAN, KETANGGUHAN
DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1045

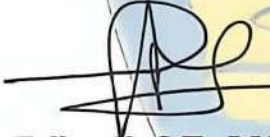
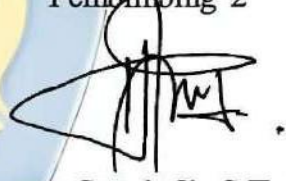
Nama Mahasiswa : *Efnu silahuda wahid*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215021007

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik


UNIVERSITAS LAMPUNG
MENYETUJUI
Komisi Pembimbing

Pembimbing 1  <u>Zulhanif, S.T., M.T.</u> NIP. 19730402 200003 1 002	Pembimbing 2  <u>Harnowo Supriadi, S.T., M.T.</u> NIP. 19690909 199703 1 002
---	--

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin


Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 19740816 200012 1 001

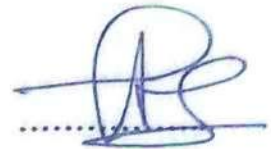
Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin


Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc.
NIP. 19790821 200312 1 003

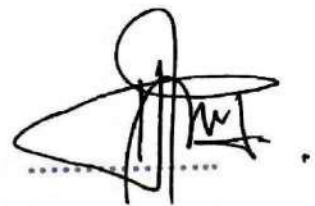
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Penguji : Zulhanif, S.T., M.T



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 29 JANUARI 2026

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Efnu Silahuda Wahid
Nomor Pokok Mahasiswa : 2215021007
Program Studi : SI Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini disebut dalam daftar pustaka.

Bandar Lampung, 29 Januari 2026

Yang menyatakan,



10000
METERAI
TEMPEL
67EC5ANX284227606

Efnu Silahuda Wahid

NPM. 2215021007

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Efnu Silahuda Wahid dilahirkan di Pasuruan pada tanggal 14 September 2004. Penulis merupakan anak ketiga dari pasangan Bapak Supriyadi dan Ibu Suparmi. Penulis mengawali pendidikan formal di SD Negeri 3 Pasuruan pada tahun (2010-2016), SMPN 1 Penengahan(2016-2019), SMKN 2 Kalianda (2019-2022). Pada tahun 2022 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Material pada tahun 2025-2026, mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) Sebagai Anggota bidang kerohanian periode 2023/2024 dan mengikuti unit kegiatan mahasiswa FOSSI FT sebagai staff humas 2023/2024 . Penulis menjalankan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Gaya Baru 1, Kec. Seputih Surabaya, Kab, Lampung Tengah pada awal Januari - Februari 2025. Penulis mendapatkan kesempatan magang pada program PKKM Magang Industri di PT. Semen Baturaja Tbk., Baturaja ,Sumatera Selatan pada Agustus 2024 – Desember 2024, dengan topik Analisis Efisiensi Kinerja Mesin Screw Compressol Ingersol Rand 73CM01 di Pabrik Plant II PT. Semen Baturaja Tbk., Sumatera Selatan. Pada skripsi ini penulis melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul “Pengaruh Variasi Holding Time Pada Proses Quenching dengan Menggunakan Media Pendingin Oli SAE 5W-30 DAN SAE140 Pada Kekerasan ,ketangguhan dan Struktur Mikro Baja AISI 1045” dibawah bimbingan Bapak Zulhanif, S.T.,M.T dan Bapak Harnowo Supriadi S.T., M.T. serta Prof. Dr. Sugiyanto, M.T sebagai pembahas.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(Qs. Al-Baqarah : 286)

“Cukuplah Allah bagiku, tidak ada Tuhan selain Dia. Hanya kepadaNya aku
bertawakal”
(Qs. Al-Zalzalah : 7)

“Semua Tempat Adalah Sekolah, semua orang adalah guru”
(Ki Hajar Dewantara)

PERSEMBAHAN

Atas Ridho Allah SWT dan dengan segala kerendahan hati

Saya persembahkan skripsi ini kepada kedua orang tua saya yaitu Bapak Supriyadi dan Ibu Suparmi, yang sangat saya sayangi dan cintai atas segala keikhlasan disetiap pengorbanan, dukungan dan doa untuk anakmu ini sehingga mendapatkan gelar sarjana.

Saudara dan saudari saya Eko Febri yanto , Evi Ratmini dan Elysia Jami Agustin yang selalu memberikan semangat, dukungan dan doa yang tiada henti-hentinya kepada tuhan dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Untuk rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu memberikan semangat, dukungan, bantuan dan doa untuk saya selama proses penyelesaian skripsi ini.

Almamaterku, UNIVERSITAS LAMPUNG.

SANWACANA

Puji syukur saya panjatkan ke hadapan Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Variasi Holding Time Pada Proses Quenching dengan Menggunakan Media Pendingin Oli SAE 5W-30 DAN SAE140 Pada Kekerasan ,ketangguhan dan Struktur Mikro Baja AISI 1045”.Skripsi ini ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat wajib perkuliahan jenjang Sarjana (S1) Jurusan Teknik Mesin 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 sumbangan 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. Bapak Zulhanif, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama atas kesediaannya dalam membimbing serta memberikan masukan dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T selaku dosen pembimbing pendamping Tugas Akhir, atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, membimbing, memberi

kritik sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.

3. Prof. Dr. Sugiyanto M.T. selaku dosen pembahas dalam Tugas Akhir ini telah memberi kritik dan masukan yang bermanfaat bagi penulis.
4. Prof. Ir Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D, IPU. selaku dosen Pembimbing Akademik telah membimbing penulis selama melaksanakan perkuliahan serta membantu segala permasalahan akademik yang dialami penulis.
5. Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc. selaku Ketua Program Studi Sarjana S1 Teknik Mesin Universitas Lampung telah memberikan arahan mengenai perkuliahan.
6. Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan kenyamanan selama perkuliahan.
7. Kedua orang tersayang Bapak dan Ibu (Supriyadi dan Suparmi) yang selalu memberikan nasehat, motivasi serta selalu mendukung penulis dari awal hingga akhir masa perkuliahan.
8. Para staf admin Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu sedia dan sigap membantu penyelesaian segala berkas yang diperlukan penulis.
9. Teman-teman seperjuangan Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2022.

Akhir kata, Penulis sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan skripsi ini dari awal sampai akhir.

Bandar Lampung, 29 Januari 2026

Efnu Silahda Wahid
NPM. 2215021007

Daftar Isi

Halaman Judul	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
Daftar Isi.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Sistematika Penulisan Laporan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Baja Karbon Sedang.....	7
2.2 Baja Karbon AISI 1045.....	7
2.3 Perlakuan Panas	12
2.4 <i>Quenching</i> (Pendinginan Cepat)	12
2.5 Tipe-Tipe <i>Queenching</i>	13
2.5.1 <i>Water Quenching</i> (Pendinginan Air)	13
2.5.2 Oil Quenching (Pendinginan Minyak)	14
2.5.3 <i>Brine Quenching</i> (Pendinginan Larutan Garam)	15
2.5.4 <i>Polymer Quenching</i>	15
2.5.5 <i>Gas Quenching</i> (Pendinginan Gas).....	16
2.5.6 Martempering (<i>Hot Quenching</i>).....	17
2.5.7 <i>Austempering</i>	17
2.6 Jenis-Jenis Oli Berdasarkan Viskositas Sebagai media pendingin	18
2.6.1 Oli SAE 140 (<i>Single Grade</i>)	19
2.6.2 Oli SAE 5W 30 (<i>Multi Grade</i>).....	20
2.7 Diagram Fe-Fe ₃ C.....	21

2.8 Diagram CCT dan TTT	25
2.9 Uji Kekerasan.....	27
2.9.1 Uji Kekerasan Vickers	28
2.10 Pengujian Impak.....	29
2.10.1 Pengujian Impak <i>Charpy</i>	30
2.10.2 Pengujian Impak Izod	31
2.10.3 Perhitungan pengujian impak.....	32
2.11 Pengamatan Struktur Mikro	34
2.11.1 Ferit (α -Iron)	35
2.11.2 Austenit (γ -Iron).....	36
2.11.3 Sementit (Fe_3C)	38
2.11.4 <i>Perlit</i>	39
2.11.5 <i>Martensit</i>	40
BAB III METODE PENELITIAN.....	42
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	42
3.2 Bahan yang Digunakan	42
3.3 Alat yang digunakan.....	43
3.4 Metode Penelitian.....	52
3.4.1 Persiapan Spesimen.....	52
3.4.2 Perlakuan Panas.....	53
3.4.3 Pengujian	53
3.4.4 Pengamatan Struktur Mikro	55
3.5 Pengambilan data.....	57
3.5.1 Pengujian Kekerasan	57
3.5.1 Pengujian impak	58
3.6 Diagram alir	59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	60
4.1 Komposisi Bahan	60
4.2 Data Pengujian Kekerasan Vickers	62
4.2.1 Data nilai pengujian kekerasan Vickers	62
4.3 Data Pengujian Impak metode <i>charpy</i>	65

4.4 Data hasil pengamatan struktur mikro	71
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	78
5.1 Simpulan	78
5.2 Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Unsur Baja Karbon AISI 1045	8
Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Material Baja AISI 1045.....	10
Tabel 3. 1 Spesifikasi Furnace.....	44
Tabel 3. 2 Spesifikasi Hardness Tester	45
Tabel 3. 3 Spesifikasi Profile Projector	46
Tabel 3. 4 Spesifikasi Impact Testing Machine.....	49
Tabel 3. 5 Spesifikasi mikroskop Olympus BX53M.....	50
Tabel 3. 6 Hasil Pengujian Kekerasan	57
Tabel 3. 7 Tabel Pengujian Impak.....	58
Tabel 4. 1 Komposisi Kimia Baja AISI 1045	60
Tabel 4. 2 Data hasil pengujian kekerasan Vickers.....	62
Tabel 4. 3 Data hasil pengujian impact	66
Tabel 4. 4 Patahan Setelah Pengujian Impact	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Fe-Fe ₃ C	22
Gambar 2. 2 Diagram TTT dan (CCT)	25
Gambar 2. 3 Penekanan metode Vickers.....	28
Gambar 2. 4 Pengujian Impak Charpy	31
Gambar 2. 5 Pengujian impak Izod	32
Gambar 2. 6 Ilustrasi Skematis Pengujian Impak	33
Gambar 2. 7 Struktur mikro ferrit	36
Gambar 2. 8 Struktur mikro Austenit	37
Gambar 2. 9 Struktur mikro Sementit	39
Gambar 2. 10 Struktur mikro Perlit	40
Gambar 2. 11 Struktur mikro Martensit	41
Gambar 3. 1 Baja AISI 1045	42
Gambar 3. 2 Spesimen uji kekerasan.....	43
Gambar 3. 3 Spesimen Uji Impak standar ASTM E-23	43
Gambar 3. 4 <i>Furnace</i>	44
Gambar 3. 5 Hardness Tester.....	45
Gambar 3. 6 <i>Profile Projektor</i>	46
Gambar 3. 7 Gerinda Potong	47
Gambar 3. 8 Amplas	48
Gambar 3. 9 Autosol.....	48
Gambar 3. 10 Impact Testing Machine.....	48
Gambar 3. 11 Mikroskop olympus BX53M	50
Gambar 3. 12 Oli 5W30	51
Gambar 3. 13 Oli SAE 140.....	52
Gambar 3. 14 Bagian potongan yang digunakan struktur mikro.....	56
Gambar 4. 1 Grafik hasil pengujian kekerasan Vickers	63
Gambar 4. 2 Grafik pengujian impact	67
Gambar 4. 3 Pengamatan struktur mikro <i>raw material</i> tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X.....	72
Gambar 4. 4 Pengamatan struktur mikro <i>raw material</i> tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 500X.....	73
Gambar 4. 5 Pengamatan struktur mikro perlakuan panas <i>quenching</i> dengan media pendingin oli SAE 5w30 perbesaran 100X.....	73
Gambar 4. 6 Pengamatan struktur mikro perlakuan panas <i>quenching</i> dengan media pendingin oli SAE 5W-30 perbesaran 500X.....	74
Gambar 4. 7 Pengamatan struktur mikro perlakuan panas <i>quenching</i> dengan media pendingin oli SAE 5W-30 perbesaran 500X.....	74

Gambar 4. 8 Pengamatan struktur mikro perlakuan panas <i>quenching</i> dengan media pendingin oli SAE 140 perbesaran 100X.....	74
Gambar 4. 9 Pengamatan struktur mikro perlakuan panas <i>quenching</i> dengan media pendingin oli SAE 140 perbesaran 500X.....	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja AISI 1045 merupakan baja karbon menengah yang memiliki kandungan karbon sekitar 0,45% dan kekuatan tarik mencapai 570 MPa dalam kondisi normalisasi. Material ini banyak digunakan dalam industri otomotif, manufaktur alat berat, dan mesin karena kekuatannya yang tinggi dan kemudahan dalam pengerjaan mesin. Namun, untuk meningkatkan kekerasan dan ketangguhannya lebih lanjut, baja ini memerlukan perlakuan panas, khususnya *quenching*. Menurut Haryadi, Utomo, dan Ekaputra (2021), kekerasan baja AISI 1045 meningkat dari 32 HRC menjadi 61 HRC setelah proses *quenching* pada temperatur 850°C dengan pendinginan air, menunjukkan peningkatan lebih dari 90% dibanding kondisi awal.

Temperatur *quenching* yang optimal sangat penting untuk memastikan transformasi fasa *austenit* yang sempurna sebelum didinginkan. Pramono (2021) menemukan bahwa pada temperatur 800°C, baja AISI 1045 menghasilkan struktur mikro berupa campuran *martensit* dan *perlit* halus, sementara pada 850°C, struktur *martensit* mendominasi hingga 85% area mikroskopis. Selain itu, peningkatan temperatur ini juga meningkatkan kekuatan tarik hingga 720 MPa dari sebelumnya 590 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol temperatur mampu mengoptimalkan kekuatan dan kekerasan material melalui transformasi fasa yang lebih homogen. Kontrol temperatur bisa didapatkan dengan acuan diagram fasa Fe-Fe₃c untuk menentukan temperatur austenisasi pada baja AISI 1045 berdasarkan kandungan karbon di dalamnya.

Yuwita, Habib, dan Faila (2024) melaporkan bahwa variasi *holding time* dan media pendingin pada proses heat treatment baja AISI 1045 memberikan pengaruh nyata terhadap nilai kekerasan material. Pada kondisi awal, kekerasan rata-rata *raw material* tercatat sebesar 88,2 HRB, sedangkan setelah proses *quenching* nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada *holding time* 40 menit dengan media air garam, yaitu sebesar 110,32 HRB atau meningkat sekitar 25%. Namun, pada *holding time* 20 menit dengan media pendingin udara, nilai kekerasan hanya mencapai 88,9 HRB. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi waktu penahanan dan laju pendinginan sangat menentukan keberhasilan pembentukan fasa keras pada baja AISI 1045

Media pendingin memegang peran penting dalam kecepatan transformasi fasa *martensit* dan pengendalian tegangan sisa. Al Faris dan Rasyid (2023) dalam eksperimennya menggunakan oli SAE 5W-30 dan air sebagai media *quenching*. Namun diketahui bahwa oli viskos tinggi seperti SAE 140 memperlambat pendinginan hingga 3–4 kali lebih lambat dibanding air, yang berpotensi membentuk struktur bainit atau *martensit* halus Hasil menunjukkan bahwa sampel yang didinginkan dengan air mencapai kekerasan hingga 62,1 HRC namun hanya memiliki energi impak 17 J, sedangkan oli SAE 5W-30 menghasilkan kekerasan 56,7 HRC dengan ketangguhan lebih baik sebesar 28 J. Hal ini menunjukkan bahwa oli mampu memberikan keseimbangan lebih baik antara kekerasan dan ketangguhan, menjadikannya pilihan yang efisien secara praktis.

Tren penggunaan oli sintetis dalam industri perlakuan panas mengalami peningkatan seiring kebutuhan efisiensi energi dan kestabilan termal. Berdasarkan data SAE International (2023), permintaan oli sintetis dengan viskositas rendah seperti 5W-30 dan SAE 140 meningkat sebesar 25% di sektor manufaktur dalam lima tahun terakhir. Selain itu, oli jenis ini mampu menjaga kestabilan suhu pada rentang kerja 40°C hingga 150°C, dengan koefisien pendinginan rata-rata 0,05–0,07 W/cm²°C. Karakteristik ini menjadikan oli sintetis ideal untuk proses *quenching* guna mengontrol pendinginan dan meminimalisir retak.

Perubahan struktur mikro akibat perlakuan panas dapat diidentifikasi melalui pengamatan metalografi. Syaharuddin et al. (2019) melaporkan bahwa baja AISI 1045 yang didinginkan dengan oli SAE 20W menunjukkan struktur mikro berupa 65% *martensit* halus dan 35% *perlit*, sementara sampel yang didinginkan dengan air mengandung lebih dari 85% *martensit* kasar. Kekerasan sampel oli tercatat pada 55,8 HRC, dan air mencapai 60,4 HRC. Namun, distribusi tegangan dan keretakan lebih banyak ditemukan pada sampel air, mengindikasikan bahwa struktur *martensit* kasar tidak selalu menguntungkan secara teknis.

Keseimbangan antara kekerasan tinggi dan ketangguhan tinggi seringkali menjadi tantangan dalam proses *quenching*. Hawari (2020) melakukan studi menggunakan media pendingin air kelapa tua dan menunjukkan bahwa kekerasan meningkat dari 30 HRC menjadi 57 HRC setelah *quenching*, tetapi energi impaknya hanya 19 J. Ini lebih rendah dibandingkan standar industri untuk baja konstruksi yang membutuhkan minimal 25 J dalam pengujian *Charpy*. Oleh karena itu, media alternatif yang terlalu eksperimental tanpa memperhatikan sifat tangguh material bisa menurunkan performa struktural.

Penelitian oleh Sukarno, Azis, dan Vebriyadi (2024) menguji variasi temperatur 750°C, 800°C, dan 850°C terhadap kekerasan AISI 1045. Hasilnya menunjukkan bahwa pada 850°C dengan media oli, kekerasan mencapai 58 HRC dan kekuatan tarik 725 MPa. Namun, pada temperatur 750°C, kekerasan hanya mencapai 47 HRC. Penelitian ini tidak menyertakan variabel waktu tahan, sehingga menghasilkan kesimpulan terbatas. Kesenjangan seperti ini menunjukkan pentingnya pendekatan multifaktor untuk mendapatkan pemahaman lebih dalam mengenai perilaku termomekanik baja.

Amalia (2018) mengkaji kombinasi temperatur dan media pendingin tanpa memperhatikan waktu tahan. Hasilnya, *quenching* pada 830°C menggunakan air menghasilkan kekerasan 60,5 HRC namun ketangguhan hanya 18 J. Pada penggunaan oli, kekerasan hanya 55,3 HRC tetapi ketangguhan meningkat

menjadi 29 J. Data ini menunjukkan adanya trade-off yang signifikan antar parameter dan perlunya eksperimen yang menguji ketiga variabel utama secara bersamaan agar diperoleh titik kerja optimum.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh kombinasi temperatur, *holding time*, dan jenis media *quenching* (5W-30 dan SAE 140) terhadap kekerasan, ketangguhan, dan struktur mikro baja AISI 1045. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan untuk merumuskan parameter perlakuan panas yang optimal bagi industri permesinan dan otomotif. Secara teoretis, penelitian ini akan melengkapi kekosongan studi multifaktorial pada perlakuan panas baja karbon sedang, dan memperkaya kajian tentang perilaku transformasi fasa serta respons termomekanik material pada kondisi ekstrem.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan Dari Penelitian Ini Adalah Sebagai Berikut:

1. Menganalisis variasi waktu tahan (*holding time*) dan media pendingin terhadap kekerasan baja karbon sedang AISI 1045 setelah proses *quenching* menggunakan oli 5W-30 dan SAE 140.
2. Menganalisis variasi waktu tahan (*holding time*) dan media pendingin terhadap nilai ketangguhan impak baja AISI 1045 hasil proses *quenching*.
3. Menganalisis variasi waktu tahan (*holding time*) dan media pendingin terhadap perubahan struktur mikro baja AISI 1045 setelah perlakuan panas *quenching*.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terfokus dan terarah, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah baja karbon sedang tipe AISI 1045 dengan spesifikasi standar industri. Sesuai dengan kandungan komposisi yang terkandung pada baja AISI 1045.

2. Proses perlakuan panas yang digunakan adalah *full quenching*, yaitu suatu proses perlakuan panas yang melibatkan pemanasan baja hingga mencapai suhu *austenitisasi*, kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan secara cepat menggunakan media pendingin tertentu. Media pendingin yang digunakan dalam penelitian ini adalah air, oli pelumas tipe 5W-30, dan oli SAE 140
3. Variasi waktu tahan (*holding time*) yang digunakan adalah 30 menit, 60 menit dan 120 menit.
4. Penelitian ini menggunakan temperatur pemanasan, yaitu 850°C temperatur ini dipilih berdasarkan rentang suhu kritis *austenitisasi* baja AISI 1045
5. Proses pendinginan (*quenching*) dilakukan dengan media, oli pelumas tipe 5W-30, dan oli SAE 140 hingga pada suhu ruang selama waktu tetap ± 20 detik.
6. Pengujian sifat mekanik yang dilakukan meliputi:
 - Pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers Hardness Test (ASTM E92)
 - Pengujian ketangguhan menggunakan metode *Charpy* Impact Test (ASTM E23)
7. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik pada permukaan potongan spesimen setelah proses *quenching* dan etsa untuk memperjelas tampilan fasa mikro seperti *martensit*, *perlit*, atau bainit.

1.4 Sistematika Penulisan Laporan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini disusun secara sistematis dalam lima bab utama sebagai berikut:

BAB I – PENDAHULUAN, berisi uraian mengenai latar belakang permasalahan yang menjadi dasar dilakukannya penelitian ini, tujuan yang ingin dicapai, batasan masalah agar fokus penelitian tetap terarah, manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian, serta penjelasan sistematika penulisan laporan secara keseluruhan.

BAB II – TINJAUAN PUSTAKA, menyajikan teori-teori dasar dan konsep ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Bab ini memuat referensi dari

literatur-literatur sebelumnya yang mendukung pembahasan mengenai pengaruh perlakuan panas *quenching* terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur baja karbon sedang, serta informasi mengenai karakteristik media oli pelumas tipe 5W-30, dan oli SAE 140.

BAB III – METODOLOGI PENELITIAN, menjelaskan secara rinci metode yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian. Bab ini meliputi lokasi dan waktu pelaksanaan, alat dan bahan yang digunakan, prosedur penelitian, variabel yang diteliti (baik variabel bebas, terikat, maupun kontrol), serta diagram alir proses penelitian sebagai gambaran umum tahapan kerja secara sistematis.

BAB IV – HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi penyajian hasil pengujian berupa data kekerasan, ketangguhan impak, dan struktur mikro dari baja AISI 1045 setelah mengalami proses *quenching*. Pada bab ini juga dilakukan analisis dan interpretasi terhadap data yang diperoleh, serta dikaitkan dengan teori dan referensi yang relevan untuk menjawab tujuan dan rumusan masalah penelitian.

BAB V – SIMPULAN DAN SARAN, memuat simpulan akhir dari hasil penelitian yang telah dilakukan, sesuai dengan tujuan penelitian. Selain itu, pada bab ini juga diberikan saran-saran konstruktif sebagai masukan bagi penelitian selanjutnya atau aplikasi praktis di lapangan berdasarkan temuan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon Sedang

Baja karbon merupakan paduan antara besi dan karbon dengan kandungan karbon bervariasi dari 0,05% hingga 2%. Berdasarkan kadar karbonnya, baja karbon dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi. Setiap kelompok memiliki karakteristik sifat mekanik dan penggunaan yang berbeda, tergantung pada kandungan karbon dan unsur lainnya yang terkandung di dalamnya

Andreansyah dan Naubnome menguraikan bahwa baja karbon menengah atau sedang memiliki kadar karbon antara 0,3% hingga 0,6%. Baja ini menawarkan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan, sehingga banyak digunakan pada peralatan teknik berat seperti poros, roda gigi, dan pipa industri minyak dan gas. Struktur mikronya terdiri atas *ferit* dan *perlit* dalam jumlah yang lebih seimbang atau bahkan dominan *perlit* tergantung kadar karbonnya. Kombinasi ini memberikan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan keuletan, serta membuat baja ini ideal untuk perlakuan panas (*heat treatment*) seperti *quenching* dan *tempering*,

2.2 Baja Karbon AISI 1045

Baja AISI 1045 adalah baja karbon yang memiliki komposisi kandungan 0,42-0,50% C, 0,50-0,80% Mn, 0,035% S, 0,17-0,37% Si, 0,25% Ni, 0,25% Cr, 0,035% P. Paduan termasuk golongan baja karbon menengah (medium carbon steel). Baja karbon menengah jenis ini banyak digunakan sebagai komponen otomotif misalnya untuk pembuatan roda gigi, poros, dan bantalan pada kendaraan

bermotor . Baja AISI 1045 sering disebut sebagai baja karbon dikarenakan sesuai dengan pengkodean internasional, yaitu seri 10xx berdasarkan nomenklatur yang dikeluarkan oleh AISI dan SAE (*Society of Automotive Engineers*) pada angka 10 pertama merupakan kode yang menunjukkan plain carbon, selanjutnya pada kode xx setelah angka 10 menunjukkan komposisi kadar karbon pada baja AISI 1045 .Pada penerapannya, baja tersebut harus memiliki sifat ketahanan aus yang baik dikarenakan sesuai dengan fungsinya harus mampu menahan keausan akibat dari gesekan dan beban tekanan . Ketahanan aus dapat didefinisikan sebagai ketahanan suatu material terhadap pengurangan dimensi akibat dari suatu gesekan antara permukaan tertentu .

(Rifnaldi dan Mulianti, 2019) menyatakan bahwa Baja karbon AISI 1045 merupakan salah satu jenis baja karbon sedang (0,43 –0,50 %C berat) yang banyak digunakan dipasaran karena memiliki banyak keunggulan. Baja ini memiliki karakteristik : sifat mampu mesin yang baik, wear *resistance*-nya baik,dan sifat mekaniknya menengah. Dengan bantuan diagram fasa yang merupakan landasan untuk perlakuan panas bagi logam, dan diagram fasa besi-karbon diberlakukan untuk baja. Diagram fasa juga memberikan informasi penting tentang titik leleh, titik kristalisasi, Unsur dan sifat mekanik yang dapat dilihat pada tabel 2.1 dan 2.2.

Tabel 2. 1 Unsur Baja Karbon AISI 1045

Unsur	Persentase (%)
Karbon	0,42 – 0,50
Mangan	0,60 -0,90
Sulfur	Maks 0,035
Fosfor	Maks 0,040
Silican	0,15 – 0,40

(Sumber: Rifnaldi dan Mulianti 2019)

Pada tabel 2.1 menjelaskan Unsur karbon dalam AISI 1045 berkisar antara 0,42–0,50%, di mana peningkatan kandungan karbon akan berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan tarik (*tensile strength*), tetapi cenderung menurunkan keuletan (*ductility*). Unsur ini sangat berperan penting dalam menentukan kekerasan dan kekuatan struktur mikro baja. Selain karbon, unsur mangan (0,60–0,90%) juga hadir dalam jumlah yang signifikan dan berfungsi untuk meningkatkan kekuatan luluh (*yield strength*) serta membantu dalam memperbaiki struktur mikro dengan mengikat unsur sulfur yang bersifat merugikan.

Keberadaan sulfur dalam baja AISI 1045 dibatasi hingga maksimum 0,035%. Meskipun dalam jumlah kecil sulfur dapat meningkatkan kemudahan pemesinan, keberadaannya umumnya dianggap sebagai unsur pengotor karena dapat menurunkan sifat elongasi atau perpanjangan material. Hal ini membuat baja lebih rapuh jika kadarnya berlebihan. Fosfor, yang dibatasi hingga 0,040%, juga dianggap sebagai pengotor karena dapat menurunkan kemampuan material dalam mengalami deformasi plastis, yang biasa disebut dengan “reduction in area.” Maka dari itu, kadar fosfor dijaga seminimal mungkin untuk menjaga ketangguhan material.

Silikon dalam baja AISI 1045 umumnya terdapat dalam kisaran 0,15–0,40%, dan meskipun jumlahnya relatif kecil, unsur ini memiliki peran penting dalam menentukan sifat akhir baja. Salah satu fungsi utama silikon adalah sebagai agen deoksidasi, yaitu membantu menghilangkan oksigen dari lelehan baja selama proses peleburan, sehingga mengurangi cacat internal dan meningkatkan kualitas material. Selain itu, silikon juga mampu meningkatkan kekerasan (*hardness*) baja melalui mekanisme penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), yang berkontribusi pada daya tahan terhadap deformasi plastis. Dengan kandungan yang optimal, silikon dapat memperkuat struktur mikro baja tanpa mengurangi sifat keuletannya secara signifikan, menjaga keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan menyerap energi benturan.

Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Material Baja AISI 1045

Sifat Mekanik	Keterangan
Kekuatan Tarik	396 N/mm ²
Kekuatan luluh	380 N/mm ²
Elongation	16 N/mm ²
Modulus Elastisitas	200 GPa
Massa Jenis	7,89 gr/m

(Sumber: Rifnaldi dan Mulianti 2019)

Pada Tabel 2.2 disajikan karakteristik mekanik baja AISI 1045 yang menggambarkan performa material ini dalam berbagai kondisi pembebanan. Kekuatan tarik (*tensile strength*) dari baja ini mencapai 396 N/mm², menunjukkan kemampuan bahan untuk menahan gaya tarik maksimum sebelum mengalami kerusakan atau putus. Selain itu, nilai kekuatan luluh sebesar 380 N/mm² menunjukkan batas tegangan di mana baja mulai mengalami deformasi plastis. Hal ini menandakan bahwa AISI 1045 memiliki ketahanan yang cukup tinggi terhadap pembebanan tarik dan tekan yang terjadi secara bergantian.

Sifat keuletan (*ductility*) baja AISI 1045 tercermin dari nilai elongasi sebesar 16%, yang mengindikasikan bahwa baja ini masih mampu mengalami deformasi dalam jumlah signifikan sebelum akhirnya patah. Kemampuan ini menjadikannya sangat sesuai untuk komponen yang mengalami pembebanan berulang atau getaran, seperti dalam mesin atau alat transportasi. Nilai elongasi yang tinggi juga menjadi pertimbangan penting dalam menentukan fleksibilitas desain material terhadap gaya luar.

Selanjutnya, modulus elastisitas dari baja ini tercatat sebesar 200 GPa, yang menunjukkan tingkat kekakuan material. Artinya, baja AISI 1045 mampu kembali ke bentuk semula setelah menerima gaya selama tidak melewati batas

elastisnya. Nilai ini penting dalam menghitung deformasi yang terjadi saat baja diberi beban, terutama dalam desain struktural dan komponen yang memerlukan kestabilan dimensi selama operasi.

Baja AISI 1045 juga memiliki massa jenis sebesar $7,89 \text{ gram/cm}^3$, yang merupakan nilai umum bagi baja karbon menengah. Informasi ini sangat berguna dalam menentukan berat total suatu komponen dan menghitung efisiensi struktural, terutama pada aplikasi teknik yang memperhitungkan rasio kekuatan terhadap berat. Massa jenis yang konsisten juga memudahkan proses simulasi dan analisis teknik lainnya.

Dengan kombinasi sifat mekanik seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, elongasi, modulus elastisitas, dan massa jenis yang seimbang, AISI 1045 menjadi pilihan material yang sangat baik dalam berbagai aplikasi teknik. Keseimbangan ini menjadikannya unggul dalam menghadapi beban mekanik yang tinggi serta ketahanan terhadap deformasi, tanpa mengorbankan keuletan material. Oleh karena itu, baja ini banyak digunakan dalam pembuatan poros, roda gigi, baut, dan berbagai komponen mesin lainnya.

Secara keseluruhan, data dalam Tabel 2.2 menunjukkan bahwa AISI 1045 memiliki performa yang handal untuk kebutuhan teknik yang memerlukan material dengan kekuatan sedang namun tetap memiliki kelenturan dan kekakuan yang memadai. Sifat-sifat ini mendukung penggunaannya dalam sistem mekanik yang bekerja di bawah beban dinamis, serta menjadikannya salah satu baja yang populer dan ekonomis dalam industri manufaktur dan konstruksi. Keandalan sifat mekaniknya membuat AISI 1045 tidak hanya digunakan pada industri otomotif, tetapi juga dalam bidang alat berat dan teknik umum. Dengan karakteristik tersebut, material ini juga cocok untuk proses perlakuan panas guna meningkatkan kekerasannya yang akan mungkin di aplikasikan pada komponen komponen mesin atau kebutuhan lainnya.

2.3 Perlakuan Panas

Heat treatment atau perlakuan panas adalah proses mengubah struktur logam dengan cara memanaskannya dalam tungku hingga suhu tertentu, biasanya di atas suhu rekristalisasi, lalu didinginkan menggunakan media seperti udara, air, air garam, oli, atau solar. Setiap media pendingin ini memiliki kecepatan pendinginan yang berbeda-beda, sehingga dapat mempengaruhi sifat akhir dari logam tersebut. Struktur mikro logam yang terbentuk melalui proses pemanasan dan pendinginan inilah yang sangat menentukan sifat mekaniknya, seperti kekerasan, kekuatan tarik, dan ketangguhan.

Perlakuan panas umumnya dibagi menjadi dua kelompok besar berdasarkan struktur mikronya. Pertama, perlakuan panas yang menghasilkan struktur mikro dalam kondisi seimbang, seperti *annealing*, *normalizing*, dan *spherodizing*. Kedua, perlakuan panas yang menghasilkan struktur mikro tidak seimbang, contohnya *quenching*, *martempering*, dan *austempering*. Faktor yang membedakan kedua jenis perlakuan ini adalah suhu pemanasan, lama waktu tahan, dan kecepatan pendinginannya

Pada dasarnya, perlakuan panas dilakukan dengan memanaskan logam hingga mencapai fase tertentu, kemudian mendinginkannya dengan cepat agar terbentuk struktur mikro yang diinginkan. Proses ini dapat menciptakan logam yang sangat keras atau malah meningkatkan keuletannya, tergantung pada tujuan akhir dari perlakuan tersebut.

2.4 *Quenching* (Pendinginan Cepat)

Quenching merupakan salah satu tahap dalam proses perlakuan panas logam yang bertujuan untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan material, terutama baja. Proses ini melibatkan pemanasan logam hingga suhu *austenitisasi*, yaitu kisaran temperatur di mana struktur mikro berubah menjadi fasa *austenit*, kemudian diikuti

oleh pendinginan cepat menggunakan media tertentu seperti air, air garam, atau oli. Tujuan dari *quenching* adalah membentuk struktur *martensit*—struktur kristal metastabil yang sangat keras—yang terbentuk akibat kecepatan pendinginan tinggi sehingga atom karbon tidak sempat berdifusi ke posisi stabil dalam kisi besi (Haryadi et al., 2021).

Menurut Pramono (2021), pada baja AISI 1045 yang memiliki kandungan karbon sedang ($\pm 0,45\%$), proses *quenching* efektif membentuk *martensit* hingga 85% bila dilakukan pada suhu sekitar 850°C dan didinginkan dengan media air. Hal ini menunjukkan bahwa AISI 1045 merupakan baja yang ideal untuk proses perlakuan panas jenis ini karena dapat mencapai peningkatan kekerasan dari 30 HRC hingga lebih dari 60 HRC. Meskipun demikian, struktur *martensit* yang sangat keras juga bersifat rapuh, sehingga kontrol terhadap parameter *quenching* menjadi penting untuk menyeimbangkan sifat mekanik lainnya seperti ketangguhan.

2.5 Tipe-Tipe *Quenching*

Dalam metalurgi, *quenching* memainkan peran penting dalam perlakuan panas (*heat treatment*) untuk mencapai kekerasan, kekuatan, dan ketahanan aus yang lebih tinggi. Proses ini bekerja dengan cara "menangkap" atau mempertahankan struktur kristal material yang terbentuk pada suhu tinggi, sehingga mencegah terjadinya transformasi fasa yang tidak diinginkan saat pendinginan lambat. Terdapat beberapa tipe *quenching* yang diterapkan dalam industri berdasarkan media pendingin dan teknik pendinginannya di antara lain:

2.5.1 *Water Quenching* (Pendinginan Air)

Water quenching merupakan salah satu metode pendinginan tertua dan paling umum digunakan dalam proses perlakuan panas logam, terutama untuk baja karbon. Metode ini mengandalkan transfer panas yang sangat cepat dari logam ke media air, menghasilkan laju pendinginan ekstrem yang

dapat mencapai 200°C per detik pada permukaan material. Pendinginan yang sangat cepat ini memungkinkan transformasi *austenit* menjadi *martensit* secara optimal, sehingga menghasilkan kekerasan maksimal yang diinginkan pada baja karbon rendah hingga menengah yang memiliki hardenability rendah.

Meskipun memberikan kekerasan tertinggi, *water quenching* juga menghasilkan tegangan termal dan transformasi yang sangat signifikan dalam material. Tegangan sisa yang tinggi ini sering menyebabkan distorsi dimensi dan bahkan retak, terutama pada komponen dengan geometri kompleks atau variasi ketebalan yang signifikan. Penerapan *water quenching* umumnya dibatasi untuk komponen sederhana, material dengan hardenability rendah, atau situasi di mana kekerasan maksimal menjadi prioritas utama dibandingkan risiko distorsi atau retak.

2.5.2 Oil Quenching (Pendinginan Minyak)

Oil quenching menggunakan minyak mineral khusus atau minyak sintetis sebagai media pendingin, menawarkan laju pendinginan yang lebih moderat dibandingkan air dengan kisaran 30-80°C per detik tergantung jenis minyak yang digunakan. Karakteristik pendinginan yang lebih lambat ini menghasilkan tegangan termal yang lebih rendah dalam material, secara signifikan mengurangi risiko distorsi dan retak sambil tetap mampu mencapai kekerasan yang baik pada kebanyakan baja paduan dan tool steel. Viskositas dan stabilitas termal minyak *quenching* dapat direkayasa untuk memberikan performa optimal untuk jenis material tertentu.

Media minyak juga menawarkan keuntungan berupa tahap pendinginan yang lebih seragam dengan kurva pendinginan yang lebih stabil. Hal ini memungkinkan transformasi fasa yang lebih terkendali dan merata di seluruh bagian komponen, menghasilkan distribusi kekerasan yang lebih konsisten. Penggunaan *oil quenching* sangat direkomendasikan untuk baja

paduan menengah hingga tinggi yang memiliki hardenability lebih baik, komponen dengan geometri kompleks yang rentan terhadap distorsi, atau aplikasi di mana keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan.

2.5.3 *Brine Quenching* (Pendinginan Larutan Garam)

Brine quenching memanfaatkan larutan air garam (biasanya natrium klorida atau kalsium klorida) dengan konsentrasi 5-10% sebagai media pendingin yang menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan air murni. Penambahan garam dalam larutan secara drastis mengubah karakteristik perpindahan panas dengan mengurangi stage *vapor blanket* (*film boiling*) yang umumnya terbentuk sejenak pada permukaan logam panas dalam proses *quenching* dengan air. Konsentrasi garam dalam larutan dapat diatur untuk mengontrol agresivitas pendinginan sesuai dengan kebutuhan spesifik material yang diproses.

Pendinginan brine sangat efektif untuk baja karbon rendah yang memiliki *hardenability* rendah dan membutuhkan laju pendinginan ekstrem untuk mencapai transformasi *martensit* yang optimal. Namun, penggunaan metode ini juga menghadirkan tantangan berupa potensi korosi pada peralatan *quenching*, kebutuhan perawatan larutan yang lebih intensif, dan risiko retak yang lebih tinggi akibat tegangan termal yang ekstrem. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, brine *quenching* sering dikombinasikan dengan pre-heat atau tempering pasca-*quenching* untuk mereduksi tegangan sisa dan meningkatkan ketangguhan material tanpa mengorbankan kekerasan permukaan.

2.5.4 *Polymer Quenching*

Polymer quenching menggunakan larutan polimer (seperti *polyalkylene glycol*, *polyvinyl alcohol*, atau *polyacrylate*) dalam air dengan konsentrasi yang dapat disesuaikan untuk menciptakan media pendinginan dengan karakteristik antara air dan minyak. Kelebihan utama metode ini adalah

kemampuan untuk mengontrol laju pendinginan secara presisi melalui pengaturan konsentrasi polimer, suhu larutan, dan kondisi agitasi, sehingga memberikan fleksibilitas tinggi dalam proses perlakuan panas. Saat kontak dengan logam panas, polimer membentuk lapisan film pada permukaan material yang mengendalikan perpindahan panas dan menciptakan kurva pendinginan yang lebih seragam.

Pendinginan dengan media polimer menghasilkan kombinasi kekerasan dan ketangguhan yang lebih seimbang dibandingkan dengan pendinginan air atau minyak. Karakteristik ini sangat bermanfaat untuk komponen dengan geometri kompleks yang membutuhkan distribusi tegangan yang lebih merata selama proses *quenching*. Aspek lingkungan dan keamanan juga menjadi keunggulan media polimer karena umumnya bersifat biodegradable, tidak mudah terbakar, dan menghasilkan sedikit asap dibandingkan dengan minyak *quenching*, menjadikannya pilihan yang semakin populer dalam industri modern yang menekankan keberlanjutan.

2.5.5 Gas Quenching (Pendinginan Gas)

Gas *quenching* menggunakan gas inert (seperti nitrogen, helium, atau argon) sebagai media pendingin, biasanya dalam sistem tertutup dengan tekanan tinggi dan sirkulasi cepat untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Metode ini menawarkan laju pendinginan yang relatif lambat ($5\text{-}20^{\circ}\text{C}$ per detik) namun sangat terkontrol dan seragam di seluruh permukaan komponen, menghasilkan distorsi dimensional minimal dan tegangan sisa yang rendah. Sistem gas *quenching* modern dilengkapi dengan teknologi kendali aliran gas yang canggih untuk mengoptimalkan distribusi pendinginan sesuai dengan geometri komponen.

Penggunaan gas sebagai media pendingin menghasilkan permukaan komponen yang sangat bersih tanpa kontaminasi atau residu yang sering terjadi pada media cair. Keunggulan ini sangat penting untuk komponen

presisi tinggi atau aplikasi yang membutuhkan kebersihan permukaan maksimal, seperti pada industri medis atau penerbangan. Meskipun membutuhkan investasi peralatan yang lebih tinggi dan umumnya hanya cocok untuk baja paduan tinggi dengan *hardenability* baik.

2.5.6 Martempering (*Hot Quenching*)

Martempering adalah proses *quenching* dua tahap di mana material dipanaskan hingga temperatur *austenitisasi*, kemudian didinginkan cepat dalam media pendingin (biasanya garam cair atau minyak panas) yang dipertahankan pada suhu sedikit di atas garis *martensit start* (M_s) material. Material ditahan pada suhu ini hingga temperaturnya seragam di seluruh bagian, sebelum akhirnya didinginkan di udara untuk menyelesaikan transformasi *martensit*. Proses tahapan ganda ini secara signifikan mengurangi gradien suhu dan tegangan termal selama transformasi fasa, menghasilkan distorsi dan risiko retak yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan metode *quenching* konvensional.

Struktur *martensit* yang dihasilkan melalui martempering memiliki karakteristik unik berupa distribusi tegangan sisa yang lebih seragam dan level mikro-retak yang minimal. Keunggulan ini sangat berharga untuk komponen dengan bentuk rumit, variasi ketebalan signifikan, atau dimensi presisi tinggi yang tidak dapat mentolerir distorsi. Meskipun memerlukan kontrol proses yang lebih ketat dan waktu pemrosesan lebih lama, martempering sering menjadi pilihan utama untuk komponen kritis pada aplikasi aerospace, otomotif performa tinggi, dan peralatan presisi yang mengkombinasikan kebutuhan kekerasan tinggi dengan integritas struktural yang optimal.

2.5.7 Austempering

Austempering merupakan proses *quenching* isothermal di mana material dipanaskan hingga temperatur *austenitisasi* kemudian didinginkan cepat

dalam media dengan suhu yang dipertahankan di antara kisaran transformasi *martensit* dan *pearlit* (biasanya 200-400°C). Material ditahan pada suhu ini hingga transformasi *austenit* menjadi bainit selesai, sebelum didinginkan ke suhu ruang. Hasil akhir dari proses ini adalah struktur mikro bainit yang menawarkan kombinasi unik antara kekuatan tinggi dan ketangguhan superior dibandingkan dengan struktur *martensit* yang dihasilkan oleh *quenching* konvensional.

Karakteristik mekanis material hasil austempering menunjukkan keseimbangan optimal antara kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan benturan. Material dengan struktur bainit memiliki ketahanan terhadap kelelahan dan keausan yang lebih baik dalam banyak aplikasi, serta distorsi dimensi dan tegangan sisa yang minimal. Proses austempering telah menjadi pilihan utama untuk komponen yang mengalami beban dinamis tinggi seperti pegas, roda gigi, dan komponen suspensi, serta besi cor nodular (*ductile iron*) yang membutuhkan kombinasi antara ketangguhan dan ketahanan aus yang biasanya sulit dicapai dengan metode perlakuan panas konvensional.

2.6 Jenis-Jenis Oli Berdasarkan Viskositas Sebagai media pendingin

Oli merupakan salah satu elemen penting dalam menjaga kinerja dan umur panjang mesin, baik pada kendaraan bermotor maupun peralatan industri. Salah satu cara untuk mengelompokkan oli adalah berdasarkan tingkat viskositasnya, yaitu ukuran kekentalan atau kemampuan oli untuk mengalir pada suhu tertentu. Menurut penelitian (Herbirowo dkk,2017) Semakin tinggi suhu selama proses pendinginan menyebabkan shock panas dan perawatan panas interkritik, yang menyebabkan pembentukan fasa austenisasi yang lebih besar. Akibatnya, fraksi volume fasa *martensit* semakin besar, yang berarti kekerasan meningkat. Nilai

viskositas media pendingin oli memengaruhi kekerasan benturan. Nilai densitas yang lebih tinggi pada media pendingin menyebabkan laju pendinginan yang lebih cepat, yang berdampak pada peningkatan tingkat kekerasan baja. Sebaliknya, media pendingin dengan viskositas rendah memiliki kekerasan baja yang lebih rendah.

2.6.1 Oli SAE 140 (*Single Grade*)

Oli single grade merupakan jenis pelumas mesin yang memiliki satu tingkat viskositas tetap, seperti SAE 140 . Karakteristik utama dari oli ini adalah kestabilan viskositasnya pada suhu operasi tertentu, sehingga cocok digunakan pada mesin-mesin yang beroperasi dalam suhu lingkungan yang relatif konstan. Penggunaan oli ini umum dijumpai pada mesin stasioner, generator, serta kendaraan yang beroperasi di daerah beriklim tropis di mana fluktuasi suhu harian tidak terlalu ekstrem.

Salah satu keunggulan oli single grade adalah kestabilannya dalam menjaga karakteristik pelumasan pada suhu kerja tertentu. Selain itu, oli jenis ini biasanya memiliki harga yang lebih terjangkau dibandingkan dengan oli multi grade. Menurut Nukman dan Agung Prasetyo (2011) pada penelitian nya yang berjudul Pengaruh Karburisasi dengan Serbuk Batubara Semi Antrasit pada Baja Karbon Medium yang *Diquenching* dengan Pelumas SAE 140, Minyak Sawit Mentah dan Air Terhadap Kekerasan dan Ketangguhan dengan *holding time* 45, 75, dan 105 menit diperoleh bahwa kekerasan baja meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi awal sebesar 26,6 HRC, di mana nilai kekerasan setelah perlakuan mencapai 32,7 HRC pada media pelumas SAE 140, 46,9 HRC pada media CPO, dan 59,1 HRC pada media air.

Namun demikian, kekurangan utama dari oli single grade terletak pada ketidakmampuannya menyesuaikan viskositas terhadap perubahan suhu.

lingkungan. Saat suhu lingkungan menurun secara drastis, oli ini cenderung menjadi lebih kental sehingga memperlambat sirkulasi pelumasan, sementara pada suhu tinggi, kekentalan bisa turun secara drastis sehingga mengurangi efektivitas pelumasan dan pendinginan. Kondisi ini dapat meningkatkan keausan komponen mesin dan memperpendek umur mesin secara keseluruhan.

Karena keterbatasannya dalam fleksibilitas suhu, oli single grade semakin jarang digunakan pada kendaraan modern yang dirancang untuk beroperasi dalam berbagai kondisi iklim. Namun, untuk aplikasi-aplikasi tertentu seperti mesin industri tetap atau kendaraan operasional di daerah tropis dengan suhu relatif konstan, oli single grade masih tetap relevan karena memberikan kestabilan dan efisiensi biaya dalam jangka panjang.

2.6.2 Oli SAE 5W 30 (*Multi Grade*)

Oli multi grade merupakan pengembangan dari oli pelumas yang dirancang untuk dapat mempertahankan kinerja optimal dalam rentang suhu yang lebih luas. Oli ini ditandai dengan dua nilai viskositas, contohnya SAE 5W-30, di mana angka sebelum huruf “W” menunjukkan tingkat kekentalan pada suhu dingin (*Winter*), dan angka setelahnya menunjukkan viskositas pada suhu tinggi. Formulasi ini memungkinkan oli untuk tetap encer saat suhu rendah dan tetap kental saat suhu tinggi, memberikan perlindungan menyeluruh bagi mesin dalam berbagai kondisi.

Keunggulan utama dari oli multi grade adalah kemampuannya dalam memberikan pelumasan dan pendinginan yang efektif baik saat dalam kondisi dingin maupun saat beroperasi dalam suhu tinggi. Penelitian Dwi Novianto dan Drastiawati (2024) meneliti pengaruh variasi temperatur *quenching* (850°C, 900°C, 950°C) dengan *holding time* 30 menit dan media pendingin oli SAE 5W-30, SAE 10W-40, dan SAE 15W-50 pada Pada

penelitian Angga Ruci, G. (2021). Analisis Pengaruh Perlakuan Panas Artificial Aging Pada Velg Oem (Al-Si) Dengan Variasi Media Pendingin (Air, Air Es, Oli Sae 140) Terhadap Nilai Kekerasan Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kekerasan meningkat dari 52,61 BHN menjadi 60,06 BHN untuk media air dan air es, serta menjadi 55,25 BHN untuk media oli SAE 140.

Meskipun menawarkan fleksibilitas yang tinggi, oli multi grade memiliki harga yang cenderung lebih mahal dibandingkan oli single grade karena menggunakan aditif khusus untuk menjaga kestabilan viskositas. Aditif ini, seperti *polymer viscosity index improver*, berfungsi untuk mencegah penurunan performa viskositas saat suhu meningkat. Namun, dalam jangka panjang aditif ini dapat mengalami degradasi sehingga memengaruhi performa oli.

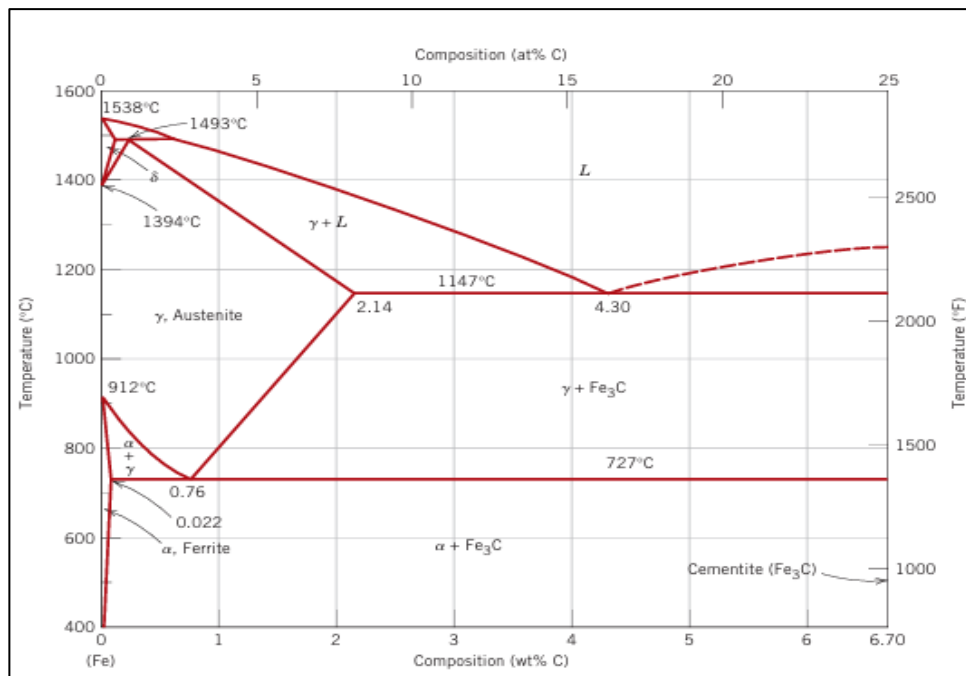
Secara keseluruhan, oli multi grade menjadi pilihan utama untuk kendaraan modern yang membutuhkan respons cepat terhadap perubahan suhu, baik dalam kondisi dingin maupun operasional berat. Kinerja adaptif ini menjadikannya lebih unggul dalam menjaga keandalan mesin dan memperpanjang usia komponen dibandingkan oli single grade, meskipun dengan biaya yang sedikit lebih tinggi.

2.7 Diagram Fe-Fe₃C

Diagram Fe-Fe₃C adalah diagram yang menampilkan hubungan antara temperatur dimana terjadi perubahan fasa selama proses pendinginan lambat dan pemanasan lambat dengan kandungan karbon (% C). Diagram fasa besi dan karbida besi Fe₃C ini menjadi landasan untuk laku panas kebanyakan jenis baja yang kita kenal. Dari diagram fasa tersebut dapat diperoleh berbagai informasi penting yang sangat berguna dalam memahami perilaku paduan logam,

khususnya paduan Fe-C (besi-karbon). Salah satu informasi yang dapat diperoleh adalah mengenai fasa-fasa yang terbentuk pada berbagai komposisi dan temperatur, terutama saat proses pendinginan lambat dilakukan. Dengan memahami hal ini, kita dapat memprediksi struktur mikro yang akan terbentuk dalam logam setelah mengalami pendinginan.

Selain itu, diagram fasa juga memberikan gambaran tentang temperatur pembekuan serta daerah-daerah pembekuan dari paduan Fe-C saat proses pendinginan lambat.. Diagram ini juga menunjukkan temperatur cair dari masing-masing paduan, yang berguna dalam menentukan titik awal pembekuan logam saat diproses dalam kondisi cair. Diagram fasa Fe-C turut menjelaskan batas-batas kelarutan atau batas kesetimbangan antara unsur karbon dan fasa-fasa tertentu seperti *austenit*, *ferit*, dan *sementit*.. Dengan mengetahui batas kelarutan ini, insinyur dapat mengontrol komposisi kimia logam agar sesuai dengan sifat mekanik yang diinginkan



Gambar 2. 1 Diagram Fe-Fe₃C
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

Penjelasan Diagram Fe-Fe₃C:

1. Pembentukan Fasa Berdasarkan Kandungan Karbon

Pada kandungan karbon maksimal 6,67 % (di ujung kanan sumbu horizontal), terbentuk sementit (Fe₃C) murni—suatu senyawa yang sangat keras namun getas. Sebaliknya, di sisi kandungan karbon rendah (mendekati 0 %) dan pada suhu kamar, besi α (*ferrit*) akan mengkristal dengan struktur BCC, bersifat relatif lunak, ulet, dan ketahanan korosinya sedang. Pada kandungan karbon sekitar 0,83 % terdapat titik eutektik, di mana pendinginan menghasilkan *perlit*—campuran berselang-seling *ferrit* (α) dan *sementit* (Fe₃C). Untuk baja dengan $C < 0,83$ % (hypoeutectoid), fasa yang terbentuk setelah melewati titik eutektik adalah *ferrit* + *perlit*; sedangkan untuk $C > 0,83$ % hingga 6,67 % (hypereutectoid), terbentuk *perlit* + *sementit*.

2. Garis-garis Transformasi Penting (A_1 , A_2 , A_3 , A_{cm} , dan A_{123})

A_1 ($T_{eu}^{tectoid} \approx 723$ °C): Batas di mana *austenit* (γ) berubah menjadi *ferrit* + *sementit* (*perlit*).

A_2 ($T_c^{currie} \approx 769$ °C): Suhu di mana besi kehilangan sifat feromagnetik dan menjadi paramagnetik.

A_3 : Temperatur maksimum di mana fasa γ berhenti ada dan sepenuhnya berubah menjadi ferrit pada kadar C tertentu (menurun seiring naiknya C).

A_{cm} : Di sinilah γ berubah langsung menjadi sementit, juga bergeser menurun pada peningkatan C.

A_{123} : Titik transformasi $\gamma \rightarrow \textit{ferrit} + \textit{sementit}$ untuk baja dengan kandungan C $> eutektik$.

3. Fokus pada Suhu 850 °C

Pada suhu 850 °C, untuk baja karbon rendah hingga sedang (0–1 % C), kita berada di dalam wilayah fasa *austenit* (γ) atau campuran γ + ferrit tergantung kandungan karbonnya yang terkandung pada baja AISI 1045 yang dapat kita jabarkan sesuai dengan spesifikasinya dapat dijelaskan yaitu antara lain sebagai berikut:

- a) $C \approx 0,45 \%$ (baja AISI 1045) $\Rightarrow$ di atas garis A_3 (sekitar $820\text{--}840^\circ\text{C}$ untuk $C \approx 0,45 \%$), maka mikrostruktur sepenuhnya *austenit* pada 850°C .
- b) Jika C sedikit lebih tinggi, mungkin masih ada sedikit *ferit*, tetapi pada 850°C hampir semua besi berada dalam bentuk *austenit* stabil.

1. *Quenching* Baja AISI 1045 dari 850°C

Baja AISI 1045 ($\pm 0,43\text{--}0,50 \%$ C) sangat umum diperlakukan panas dengan langkah:

- a) Austenitisasi: Pemanasan hingga $850\text{--}880^\circ\text{C}$ (sering dipilih 850°C) memastikan struktur mikro menjadi *austenit* homogen.
- b) *Quenching* (pendinginan cepat, misal dalam minyak atau air) memaksa transformasi *martensitik*: *austenit* berubah menjadi *martensit* — fasa supersaturated C dalam besi tetragonal yang sangat keras dan kuat.
- c) Temper (jika diperlukan) mengurangi tegangan sisa *martensit* dan menambah keuletan.

Hasilnya, baja AISI 1045 yang dipanaskan pada 850°C lalu di-*quenched* akan memperlihatkan peningkatan kekerasan ($\text{HRC} \approx 50\text{--}55$) dan kekuatan tarik tinggi, namun keuletannya lebih rendah dibanding kondisi *anneal*. Proses ini ideal untuk komponen seperti poros, gear, dan poros penekuk yang memerlukan permukaan keras namun inti masih cukup ulet.

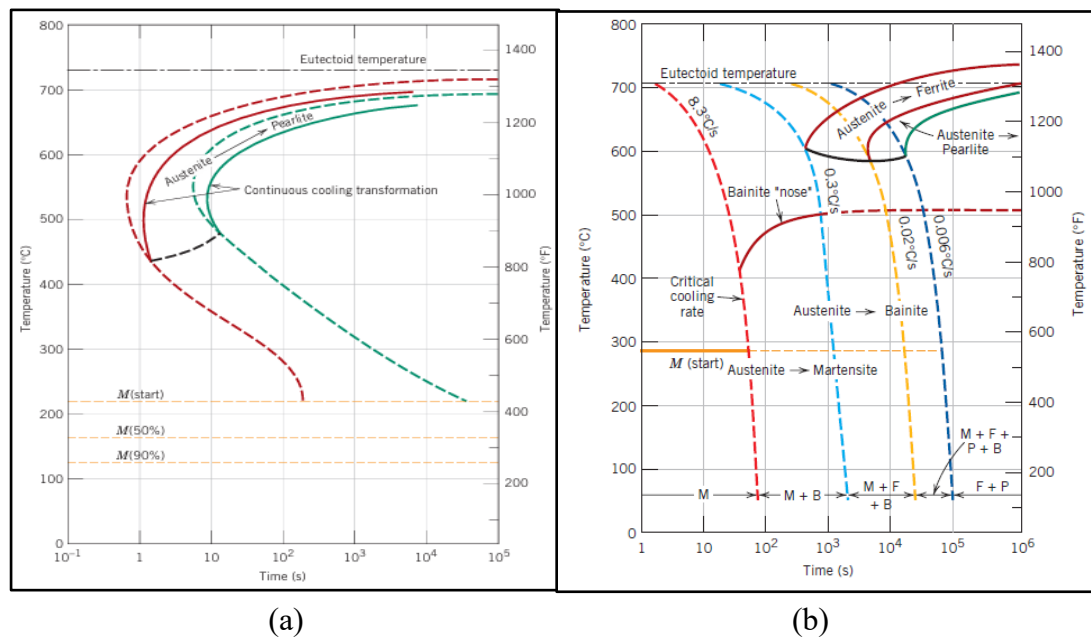
5. Intisari dan Aplikasi

- a) 850°C adalah titik aman di atas A_3 untuk baja sedang karbon, menghasilkan *austenit* murni.
- b) *Quenching* dari suhu ini memanfaatkan ketidakstabilan *austenit* untuk membentuk *martensit*, memberikan kombinasi kekerasan dan kekuatan yang diinginkan pada AISI 1045.
- c) Setelah *quenching*, tempering diperlukan untuk menghilangkan retakan mikro dan menyeimbangkan kegunaan mekanik.

Dengan demikian, mengaitkan diagram fasa Fe–Fe₃C pada garis suhu 870 °C dengan perlakuan *quenching* baja AISI 1045 menjelaskan mengapa suhu tersebut dipilih: untuk memperoleh *austenit* murni sebagai prekursor pembuatan *martensit* keras melalui pendinginan cepat.

2.8 Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT) dan Time-Temperature-Transformation (TTT)

Diagram TTT (*Time-Temperature-Transformation*) dan CCT (*Continuous Cooling Transformation*) digunakan untuk memahami perubahan fasa pada logam, khususnya baja, selama pendinginan. Diagram TTT menunjukkan transformasi fasa pada suhu tetap (isothermal), sedangkan diagram CCT menunjukkan transformasi saat logam didinginkan secara kontinu. CCT lebih sesuai untuk aplikasi industri karena mencerminkan kondisi pendinginan nyata. Kedua diagram ini penting dalam merancang perlakuan panas guna mengontrol struktur mikro dan sifat mekanik material diagram TTT dan CCT dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 (a) Diagram TTT (Time-Temperature-Transformation) dan (b) Diagram Continuous Cooling Transformation (CCT)
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

Gambar 2.2 yang ditampilkan merupakan diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) untuk paduan besi-karbon dengan komposisi eutektik. Diagram ini digunakan untuk menunjukkan bagaimana struktur mikro suatu baja berubah selama proses pendinginan kontinu dari suhu *austenitisasi* (pemanasan di atas titik kritis). Berbeda dengan diagram TTT (*Time-Temperature-Transformation*) yang menggambarkan transformasi fasa pada kondisi isothermal (suhu tetap), diagram CCT memberikan informasi yang lebih realistis karena dalam praktik, logam biasanya mengalami pendinginan terus-menerus dan bukan dipertahankan pada satu suhu tertentu.

Pada sumbu vertikal diagram ini terdapat skala temperatur, baik dalam derajat *Celsius* ($^{\circ}\text{C}$) maupun *Fahrenheit* ($^{\circ}\text{F}$), sedangkan sumbu horizontal menunjukkan waktu dalam skala logaritmik (detik). Dua jenis kurva ditampilkan: garis merah putus-putus merupakan kurva TTT yang menggambarkan transformasi isothermal, sedangkan kurva hijau menggambarkan transformasi saat pendinginan kontinu. Kurva ini menunjukkan waktu dan suhu di mana *austenit* (fase awal) mulai dan selesai bertransformasi menjadi fasa-fasa lain seperti *perlit*, *bainit*, atau *martensit*, tergantung pada kecepatan pendinginan.

Diagram ini juga menunjukkan tiga lintasan pendinginan aktual yang diberi label “*Air Cool*” (pendinginan udara), “*Oil Quench*” (pendinginan minyak), dan “*Water Quench*” (pendinginan air). Lintasan ini memperlihatkan bagaimana kecepatan pendinginan mempengaruhi struktur mikro akhir. Pendinginan lambat seperti pada *Air Cool* menyebabkan terbentuknya *perlit* kasar, sedangkan pendinginan lebih cepat seperti *Oil Quench* dapat menghasilkan *perlit* halus atau *bainit*. Sementara itu, *Water Quench* yang sangat cepat mampu melewati seluruh zona transformasi difusional, menyebabkan terbentuknya *martensit*—struktur yang sangat keras namun juga getas.

Selain itu, diagram ini menyertakan garis *Ms* (*Martensite Start*) dan *Mf* (*Martensite Finish*) yang menandai awal dan akhir pembentukan *martensit* saat

pendinginan mencapai suhu rendah. Jika laju pendinginan cukup tinggi hingga tidak memberikan *waktu bagi transformasi difusional (perlit dan bainit) untuk terjadi, maka struktur martensit* dapat terbentuk sepenuhnya. Oleh karena itu, diagram CCT sangat penting dalam bidang metalurgi dan teknik material, terutama untuk merancang proses perlakuan panas baja, memilih media pendingin yang tepat, serta mengontrol struktur mikro dan sifat mekanik akhir dari suatu komponen logam.

2.9 Uji Kekerasan

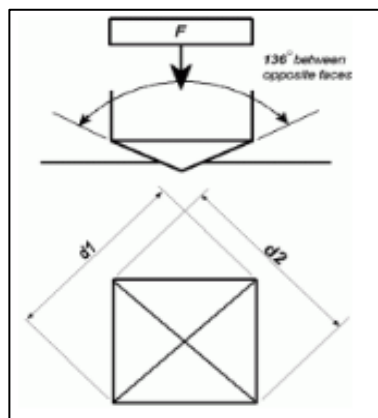
(Sulaeman dkk.,2020) menyatakan bahwa pengujian kekerasan (hardness test) adalah suatu proses yang bertujuan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap deformasi pada daerah lokal atau permukaan material, khusus untuk logam deformasi yang di maksud adalah deformasi plastis. Deformasi plastis sendiri adalah suatu keadaan dari material yang ketika diberikan gaya maka struktur mikronya tidak akan kembali ke bentuk semula. Terdapat berbagai macam uji kekerasan lekukan, antara lain: Prinsip dasar pengujian kekerasan melibatkan pemberian beban tertentu pada indenter dengan geometri spesifik untuk menciptakan deformasi permanen pada permukaan material uji, kemudian mengukur dimensi atau kedalaman indentasi yang terbentuk.

Metodologi pengujian kekerasan telah berkembang selama lebih dari satu abad, menghasilkan berbagai macam teknik standar yang dioptimalkan untuk aplikasi dan jenis material tertentu. Setiap metode uji kekerasan memiliki karakteristik tersendiri dalam hal ukuran indenter, besarnya beban yang diterapkan, prinsip pengukuran, dan skala nilai kekerasan yang dihasilkan. Pemilihan metode uji kekerasan yang tepat sangat bergantung pada jenis material, dimensi dan geometri spesimen, serta informasi spesifik yang dibutuhkan dari pengujian tersebut. Adapun pengujian kekerasan antara lain:

2.9.1 Uji Kekerasan Vickers

Metode ini menggunakan indenter berupa piramida intan dengan sudut antara permukaan yang berhadapan sebesar 136° , yang ditekan ke permukaan material dengan beban yang relatif kecil (biasanya 1 hingga 100 kgf). Setelah beban dilepaskan, kedua diagonal indentasi berbentuk persegi yang terbentuk diukur menggunakan mikroskop, dan nilai kekerasan Vickers (HV) dihitung berdasarkan rasio beban terhadap luas permukaan indentasi. Geometri indenter yang unik ini memastikan bahwa nilai kekerasan yang dihasilkan secara teoritis independen terhadap besarnya beban yang digunakan, sehingga memberikan skala kekerasan yang konsisten untuk material dari yang sangat lunak hingga sangat keras.

Kelebihan signifikan dari uji kekerasan *Vickers* adalah kemampuannya untuk mengukur kekerasan material dalam rentang yang sangat luas dengan menggunakan skala tunggal dan indenter yang sama, menghilangkan kebingungan yang mungkin timbul dari penggunaan beberapa skala seperti pada metode *Rockwell*. Metode ini juga dapat menggunakan beban yang sangat kecil (microhardness testing, beban <1 kgf) untuk menguji lapisan tipis, area kecil, atau untuk memetakan variasi kekerasan mikro dalam material..



Gambar 2. 3 Penekanan metode Vickers
(Sumber: Viyus dkk., 2020)

2.10 Pengujian Impak

Pengujian impak merupakan metode penting dalam karakterisasi material yang digunakan untuk mengevaluasi ketangguhan material atau kemampuannya untuk menyerap energi dalam kondisi beban dinamis sebelum terjadi patahan. Berbeda dengan pengujian tarik atau tekan yang menerapkan beban secara perlahan dan terus menerus, pengujian impak melibatkan pemberian beban mendadak dalam waktu sangat singkat, sehingga memberikan informasi kritis tentang perilaku material dalam kondisi pembebanan dinamis. Pengujian ini sangat relevan karena banyak komponen engineering mengalami kegagalan akibat beban kejut (*shock loading*) selama penggunaan, dan ketangguhan impak sering menjadi faktor kritis dalam pemilihan material untuk aplikasi struktural yang mengalami beban dinamis. Hasil pengujian impak biasanya dinyatakan dalam besaran energi yang diserap oleh spesimen selama proses patahan, yang mencerminkan kemampuan material untuk menahan beban mendadak.

Pengujian impak memiliki signifikansi khusus dalam mendeteksi transisi ductile-brittle pada material, terutama baja ferritik dan material BCC (*Body-Centered Cubic*) yang menunjukkan perubahan drastis dalam ketangguhan pada kisaran suhu tertentu. Pada suhu di bawah suhu transisi, material menunjukkan perilaku getas dengan penyerapan energi rendah dan patahan transgranular, sementara pada suhu di atas transisi, material berperilaku ulet dengan penyerapan energi tinggi dan deformasi plastis signifikan sebelum patah. Fenomena transisi ini memiliki implikasi penting dalam aplikasi seperti dalam industri perkapalan, pipa gas bertekanan tinggi, dan struktur lain yang beroperasi pada suhu rendah. Pengujian impak pada berbagai suhu memungkinkan insinyur menentukan suhu transisi dan memastikan bahwa komponen tidak beroperasi dalam kondisi di mana material terlalu getas. Selain itu, pengujian impak juga sangat sensitif terhadap cacat mikrostruktur, orientasi serat (*fiber*), dan kondisi permukaan, sehingga memberikan data komplementer yang berharga terhadap pengujian mekanik konvensional dalam evaluasi komprehensif performa material.

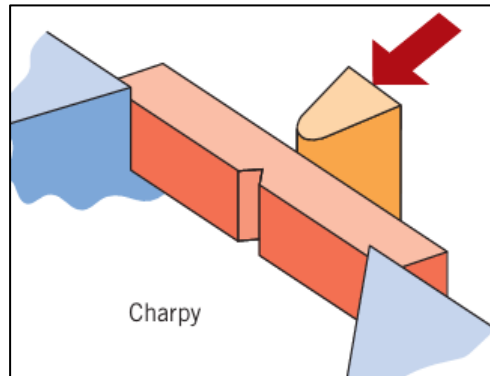
2.10.1 Pengujian Impak *Charpy*

Pengujian impak *Charpy* merupakan salah satu metode pengujian impak yang paling umum digunakan dan telah distandarisasi secara luas dalam industri dan penelitian material. Metode ini menggunakan spesimen berbentuk balok dengan takikan berbentuk V atau U di tengahnya, yang ditempatkan horizontal pada tumpuan dengan takikan menghadap ke arah berlawanan dari datangnya pendulum. Pendulum dengan berat tertentu dilepaskan dari ketinggian standar, menghantam spesimen tepat di belakang takikan, dan energi yang diserap selama proses patahan diukur dari perbedaan ketinggian pendulum sebelum dan setelah tumbukan. Standar ASTM E23 dan ISO 148 mengatur dimensi spesimen standar (biasanya $10 \times 10 \times 55$ mm dengan takikan V 45° sedalam 2 mm) serta prosedur pengujian untuk memastikan hasil yang konsisten dan dapat dibandingkan.

Keunggulan utama metode *Charpy* terletak pada kesederhanaan peralatan, kemudahan persiapan spesimen, dan interpretasi hasil yang relatif straightforward, menjadikannya pilihan utama untuk pengujian rutin dan kontrol kualitas. Pengujian *Charpy* sangat efektif dalam menentukan suhu transisi *ductile-brittle* (DBTT) pada baja dan material BCC lainnya, dengan pengujian dilakukan pada serangkaian suhu dari *cryogenic* hingga *elevated temperature*. Energi yang diserap selama patahan (*Charpy impact energy*) biasanya disajikan dalam bentuk kurva energi terhadap suhu, dengan infleksi kurva menunjukkan zona suhu transisi.

Meskipun sederhana, pengujian ini sangat sensitif terhadap variasi metalurgi seperti ukuran butir, presipitasi, segregasi batas butir, dan fitur mikrostruktur lainnya, sehingga sering digunakan untuk mengevaluasi efek perlakuan panas, proses pengelasan, dan pengerjaan mekanis terhadap ketangguhan material. Namun, metode *Charpy* memiliki beberapa keterbatasan, termasuk kesulitan mengekstraksi parameter mekanika fraktur kuantitatif dan

ketergantungan hasil pada geometri spesimen dan konfigurasi takikan. Selain itu, hasil uji *Charpy* tidak selalu merepresentasikan perilaku retak dalam kondisi layanan aktual karena kecepatan pembebanan dan kondisi batas yang berbeda secara signifikan. Interpretasi data juga dapat bervariasi antar laboratorium karena perbedaan peralatan dan prosedur pengujian.

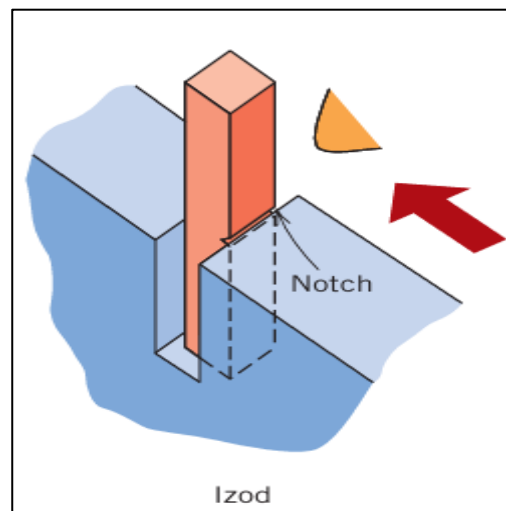


Gambar 2. 4 Pengujian Impak *Charpy*
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

2.10.2 Pengujian Impak Izod

Pengujian impak *Izod*, dinamai menurut insinyur Inggris Edwin Gilbert *Izod* yang mengembangkannya pada awal abad ke-20, merupakan metode pengujian impak alternatif yang terutama digunakan untuk material non-logam seperti polimer, komposit, dan keramik. Berbeda dengan konfigurasi *Charpy*, spesimen *Izod* dipasang secara vertikal pada penjepit cantilever dengan takikan menghadap ke arah pendulum. Pendulum menghantam spesimen pada sisi yang sama dengan takikan, dan energi yang diserap selama patahan diukur untuk menentukan ketangguhan impak material. Standar ASTM D256 mengatur dimensi spesimen standar untuk polimer (biasanya 12.7×12.7×64 mm dengan takikan V 45°) serta prosedur pengujian, sementara ISO 180 menyediakan standar internasional yang serupa dengan beberapa variasi dalam parameter pengujian.

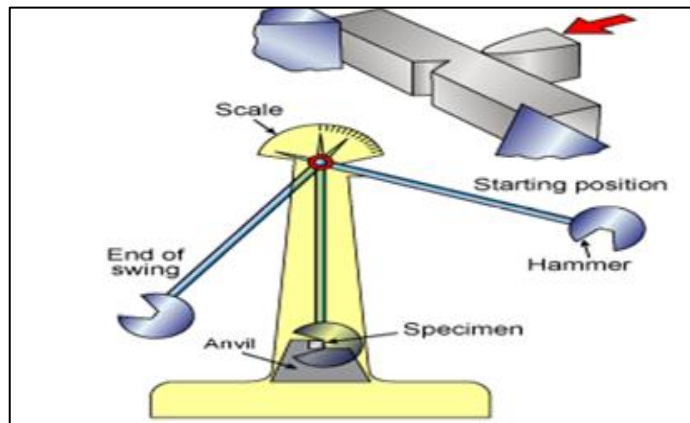
Pengujian *Izod* telah menjadi standar industri untuk evaluasi ketangguhan impak material polimer dan komposit, memberikan data penting untuk aplikasi seperti komponen otomotif, peralatan rumah tangga, dan produk konsumen lainnya yang mungkin mengalami beban kejut selama penggunaan. Konfigurasi cantilever dalam pengujian *Izod* menghasilkan pola tegangan yang berbeda dibandingkan *Charpy*, dengan komponen tegangan tarik yang lebih dominan, sehingga lebih sensitif terhadap cacat permukaan dan memudahkan inisiasi retak pada material getas. Keterbatasan utama pengujian *Izod* meliputi efek penjepit yang dapat mempengaruhi hasil pada material yang sangat elastis, serta kesulitan dalam mempertahankan kondisi penjepit yang konsisten antar pengujian.



Gambar 2. 5 Pengujian impak *Izod*
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

2.10.3 Perhitungan pengujian impak

Perhitungan kekuatan impak bertujuan untuk mencari energi impak dan hargaimpak, sebelum mencari energi impak dan harga impak harus mencari sudut β dan sudut α dengan cara melakukan pengujian, ilustrasi pengujian dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Ilustrasi Skematis Pengujian Impak
(Sumber: Handoyo,2013)

Adapun rumus yang digunakan pada pengujian impak adalah sebagai berikut:

Energi yang diserap

$$\begin{aligned}
 E &= E_p - E_m \dots\dots\dots(1) \\
 &= m \cdot g \cdot h_1 - m \cdot g \cdot h_2 \\
 &= m \cdot g (h_1 - h_2) \\
 &= m \cdot g (\lambda (1 - \cos \alpha) - \lambda (\cos \beta - \cos \alpha)) \\
 &= m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha) \\
 &= m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

E= Energi yang Diserap (Joule)

E_p = Energi Potensial

E_m = Energi Mekanik

m = Berat Pendulum (Kg)

g = Gravitasi 9,81 m/s²

h_1 = Jarak awal antara pendulum dengan benda uji (m)

h_2 = Jarak akhir antara pendulum dengan benda uji (m)

λ = Jarak lengan pengayun (m)

$\cos \alpha$ = Sudut posisi awal pendulum

$\cos \beta$ = Sudut posisi akhir pendulum

Besarnya usaha yang diperlukan untuk memukul patah benda uji adalah:

$$W = W_1 - W_2 \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

W = Usaha yang diperlukan mematahkan benda uji (Kg m).

W_1 = Usaha yang dilakukan (Kg m).

W_2 = Sisa usaha setelah mematahkan benda uji (Kg m).

besarnya harga impak dapat digunakan persamaan berikut:

$$K = \frac{W}{A} \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

K = nilai impact (Kg m/mm²)

W = Usaha yang diperlukan mematahkan uji (Kg m)

A_o = Luas penampang dibawah tatikan (mm²)

2.11 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro (metalografi) merupakan teknik fundamental dalam karakterisasi material yang memungkinkan peneliti dan insinyur mengamati, menganalisis, dan menginterpretasikan struktur internal material pada skala mikroskopis. Teknik ini melibatkan serangkaian proses persiapan spesimen yang sistematis, mulai dari pemotongan, *mounting*, *grinding*, *polishing* hingga *etching*

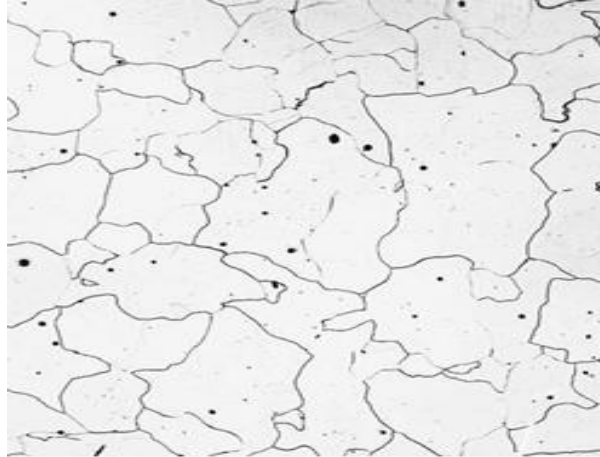
untuk mengungkapkan fitur mikrostruktur seperti butiran, batas butir, fasa, presipitat, dan berbagai cacat mikro. Struktur mikro yang terungkap melalui proses ini memberikan informasi kritis tentang komposisi material, riwayat proses termal dan mekanik yang dialami material, serta membantu memprediksi sifat-sifat material seperti kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap berbagai jenis degradasi. Pengujian struktur mikro telah menjadi alat investigasi yang tidak tergantikan dalam pengembangan material, analisis kegagalan, kontrol kualitas manufaktur, dan penelitian ilmiah material. Berikut merupakan jenis-jenis fasa dalam paduan karbon dapat dijelaskan sebagai berikut:

2.11.1 Ferit (α -Iron)

Ferit merupakan fasa yang terdiri dari larutan padat karbon dalam besi dengan struktur kristal *Body-Centered Cubic (BCC)*, juga dikenal sebagai *α -iron* atau *α -ferrite*. Dalam kondisi ekuilibrium, *ferit* dapat melarutkan karbon dalam jumlah sangat terbatas, maksimum hanya sekitar 0.022% pada temperatur 727°C dan bahkan kurang dari 0.008% pada temperatur ruangan. Struktur BCC memberikan *ferit* karakteristik magnetik (feromagnetik) pada temperatur di bawah temperatur *Curie* (770°C). Dalam pengamatan metalografi, *ferit* muncul sebagai area putih atau terang setelah etching dengan reagen standar seperti nital atau picral. Morfologi *ferit* dapat bervariasi tergantung pada komposisi paduan dan riwayat termal, dengan beberapa variasi seperti proeutectoid *ferrite* yang terbentuk langsung dari *austenit* sebelum transformasi eutectoid.

Sifat-sifat mekanik *ferit* murni meliputi kekerasan rendah (sekitar 80-90 HV), kekuatan rendah (kekuatan luluh sekitar 180 MPa), namun keuletan dan ketangguhan yang sangat baik dengan elongasi hingga 40%. Sifat-sifat ini menjadikan baja dengan kandungan *ferit* tinggi (baja *feritik*) sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan *formability* dan *weldability* yang

baik. Peningkatan kandungan *ferit* dalam baja umumnya menurunkan kekerasan dan kekuatan namun meningkatkan keuletan dan machinability..



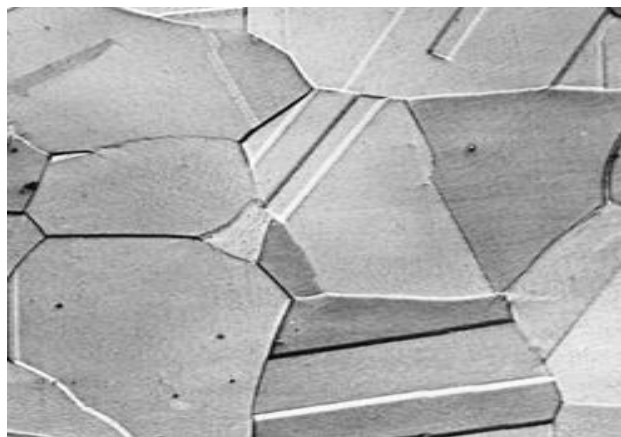
Gambar 2. 7 Struktur mikro ferrit
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

2.11.2 Austenit (γ -Iron)

Austenit adalah fasa larutan padat karbon dalam besi dengan struktur kristal *Face-Centered Cubic* (FCC), juga dikenal sebagai γ -iron. Struktur FCC yang lebih rapat memungkinkan *austenit* melarutkan karbon dalam jumlah yang jauh lebih besar dibandingkan *ferit*, hingga 2.14% pada temperatur 1147°C. Austenit stabil pada temperatur tinggi (912-1394°C untuk besi murni) dan biasanya bertransformasi menjadi *ferit* dan sementit saat didinginkan perlahan ke temperatur kamar. Namun, *austenit* dapat dipertahankan pada temperatur ruangan (*retained austenite*) melalui pendinginan cepat atau dengan penambahan elemen penstabil *austenit* seperti nikel, mangan, nitrogen, dan karbon. Dalam pengamatan metalografi, *austenit* muncul sebagai area putih atau terang dengan batas butir yang jelas, dan sering menunjukkan *twin boundaries* karakteristik setelah *etching* dengan reagen seperti *nital*, *picral*, atau *Kalling's reagent*.

Butir *austenit* biasanya ekuiaksial dengan ukuran yang bervariasi tergantung pada temperatur dan waktu *austenitisasi*.

Sifat-sifat mekanik *austenit* mencakup kombinasi kekuatan menengah hingga tinggi dengan keuletan dan ketangguhan yang sangat baik. Struktur FCC dari *austenit* tidak memiliki temperatur transisi *ductile-brittle* yang jelas, menjadikannya tetap tangguh bahkan pada temperatur sangat rendah. Austenitic stainless steel (seri 300) memanfaatkan sifat ini untuk aplikasi cryogenic. *Austenit* juga menunjukkan *work hardening rate* yang tinggi, di mana kekuatan meningkat signifikan selama deformasi plastis akibat pembentukan dislokasi dan twinning. Sifat ini dimanfaatkan dalam *Transformation-Induced Plasticity* (TRIP) steels, di mana *austenit* yang dipertahankan bertransformasi menjadi *martensit* selama deformasi, meningkatkan kombinasi kekuatan dan keuletan. Austenit bersifat paramagnetik (tidak magnetik), memberikan metode pengujian sederhana untuk mendeteksi keberadaannya. Kelemahan *austenit* meliputi ketahanan *creep* yang lebih rendah pada temperatur tinggi dibandingkan fasa *feritik*, serta potensi mengalami sensitisasi pada baja tahan karat *austenitik* akibat presipitasi karbida krom pada batas butir yang dapat menyebabkan *intergranular corrosion*.



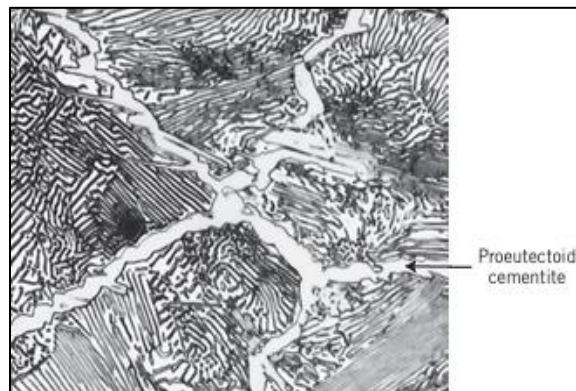
Gambar 2. 8 Struktur mikro Austenit
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

2.11.3 Sementit (Fe_3C)

Sementit adalah senyawa intermetalik besi-karbon (Fe_3C) dengan kandungan karbon 6.67% berat, juga dikenal sebagai iron *carbide* atau *cementite*. Sementit memiliki struktur kristal ortorombik kompleks dengan ikatan yang sebagian bersifat kovalen, menjadikannya sangat keras (sekitar 800-1400 HV) namun sangat getas dengan hampir tidak ada keuletan. Dalam diagram fasa Fe-C, sementit diklasifikasikan sebagai fasa metastabil yang secara termodinamika cenderung terdekomposisi menjadi besi dan grafit pada kondisi ekuilibrium jangka panjang, namun dekomposisi ini sangat lambat pada temperatur kamar sehingga sementit dianggap stabil untuk tujuan praktis. Dalam pengamatan metalografi, sementit muncul sebagai fasa putih terang setelah etching dengan nital, dengan morfologi yang sangat bervariasi tergantung pada mekanisme pembentukannya dan riwayat termal material.

Berdasarkan mekanisme pembentukannya, sementit dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis: *primary cementite* yang mengendap langsung dari cairan pada besi cor *hipereutektik*; *proeutectoid cementite* yang terbentuk dari *austenit* sebelum reaksi eutektoid pada baja hipereutektoid; dan eutektoid cementite yang merupakan bagian dari struktur *perlit*. Morfologi sementit juga sangat beragam, termasuk *massive cementite* yang terbentuk pada batas butir *austenit prior*; *Widmanstätten cementite* dengan morfologi *plate* yang tumbuh dari batas butir; dan spheroidized cementite berbentuk partikel bulat yang terbentuk selama *spheroidization annealing*. Dalam struktur *perlit*, sementit membentuk lamela atau plate yang berseling dengan *ferit*. Sementit dapat juga hadir sebagai presipitat halus dalam bainit dan sebagai partikel mikroskopis dalam *martensit tempered*. Ketika terdispersi sebagai partikel halus, sementit berkontribusi signifikan pada penguatan baja melalui mekanisme dispersion strengthening dan precipitation hardening, namun konsentrasi sementit yang tinggi dapat

meningkatkan kegetasan dan menurunkan ketangguhan material. Dalam baja paduan, elemen seperti mangan dan kromium cenderung menstabilkan sementit dan membentuk karbida kompleks, sementara elemen seperti silikon dan aluminium cenderung mendestabilkan sementit dan mempromosikan pembentukan grafit, prinsip yang dimanfaatkan dalam produksi cast iron.



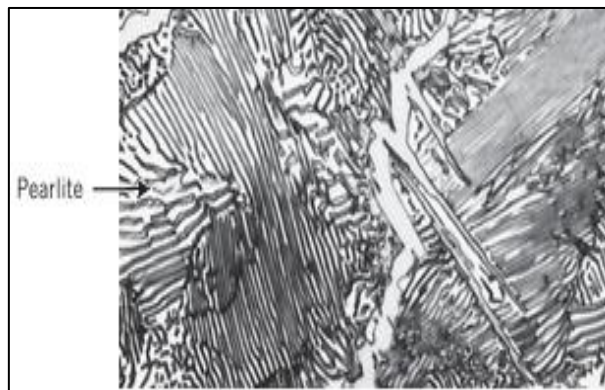
Gambar 2. 9 Struktur mikro Sementit
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

2.11.4 *Perlit*

Perlit merupakan struktur mikro lamellar yang terdiri dari lapisan-lapisan *ferit* dan sementit yang tersusun secara berselang-seling, terbentuk melalui reaksi eutektoid di mana *austenit* solid solution bertransformasi menjadi dua fasa padat. Transformasi ini terjadi pada temperatur konstan (727°C untuk sistem Fe-C biner) dengan komposisi eutektoid 0.77% C. Dalam pengamatan metalografi setelah etching dengan nital, *perlit* muncul sebagai area gelap dengan pola bergaris-garis halus atau berupa koloni dengan orientasi lamela yang berbeda-beda. Pada pembesaran rendah, koloni *perlit* terlihat sebagai area gelap, sementara pada pembesaran tinggi struktur lamellar dapat terlihat jelas. Jarak antar lamela (*interlamellar spacing*) merupakan parameter mikrostruktur kunci yang sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan selama transformasi eutektoid, dengan pendinginan lebih cepat menghasilkan jarak antar lamela yang lebih kecil.

Berdasarkan morfologi dan mekanisme pembentukannya, *perlit* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis. *Coarse pearlite* terbentuk pada laju pendinginan lambat dengan jarak antar lamela sekitar 0.4-0.7 μm , menghasilkan kekerasan sekitar 200-250 HB. *Fine pearlite* terbentuk pada laju pendinginan lebih cepat dengan jarak antar lamela sekitar 0.1-0.2 μm , menghasilkan kekerasan sekitar 250-320 HB.

Degraded pearlite memiliki struktur lamellar yang kurang teratur dan muncul ketika transformasi terjadi pada temperatur di bawah temperatur eutektoid namun cukup tinggi untuk memungkinkan difusi karbon. *Divorced pearlite* terbentuk ketika lamela sementit tidak kontinu dan muncul sebagai partikel terpisah dalam matriks *ferit*, biasanya terjadi pada komposisi baja dengan karbon rendah atau setelah perlakuan termal tertentu.



Gambar 2. 10 Struktur mikro Perlit
(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

2.11.5 *Martensit*

Martensit adalah fasa yang terbentuk melalui transformasi non-difusional (*displacive*) dari *austenit* ketika didinginkan dengan cepat di bawah temperatur *martensit start* (M_s), yang berikisar antara 500°C untuk baja karbon rendah hingga di bawah temperatur ruangan untuk baja paduan tinggi tertentu. Transformasi ini melibatkan perubahan struktur kristal dari FCC (*austenit*) menjadi struktur tetragonal body-centered (*Body-Centered*

Tetragonal atau BCT), dengan karbon terperangkap dalam posisi interstisial, menciptakan distorsi kisi kristal yang signifikan. Dalam pengamatan metalografi setelah etching dengan nital atau pikral, *martensit* muncul sebagai area dengan tekstur jarum atau *lath* yang saling berpotongan dengan orientasi berbeda-beda, sering disebut sebagai "needle-like" atau "lath-like" structure.

Lath martensite memiliki kekerasan sekitar 350-550 HV tergantung pada kandungan karbon. *Plate martensite* (atau disebut juga *acicular martensite*) terbentuk pada baja dengan karbon tinggi ($>0.6\%$ C) dan terdiri dari plate-plate yang saling berpotongan dengan midrib karakteristik dan twin internal dengan orientasi kristalografi spesifik. *Plate martensite* dapat mencapai kekerasan sangat tinggi (550-900 HV) namun juga sangat getas. Pada baja dengan kandungan karbon menengah (0.4-0.6% C), campuran *lath* dan *plate martensite* sering ditemukan secara bersamaan. *Mixed martensite* ini menunjukkan transisi bertahap antara *morfologi lath* dan *plate* dengan perubahan kandungan karbon.



Gambar 2. 11 Struktur mikro *Martensit*

(Sumber : Calister dan Rethswisch, 2009)

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Waktu dan tempat penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Agustus 2025 sampai bulan november 2025 di Laboratorium Material Teknik Mesin, Universitas Lampung. Bahan yang akan digunakan adalah baja *AISI 1045*. Adapun prosedur dalam pengujian ini yaitu proses *Quenching* dengan pengujian kekerasan dan impak.

3.2 Bahan yang Digunakan

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

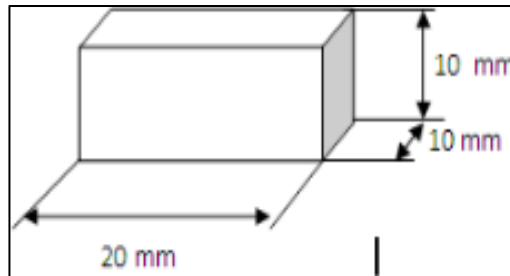
1. Baja AISI 1045

Baja AISI 1045 adalah spesimen yang akan digunakan untuk penelitian yang dilakukan.



Gambar 3. 1 Baja AISI 1045

2. Spesimen Uji Kekerasan

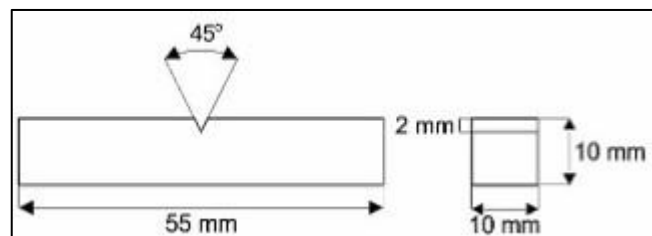


Gambar 3. 2 Spesimen uji kekerasan

Spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan disesuaikan dengan standar ASTM E92, dengan ukuran dan bentuk seperti gambar 3.2.

3. Spesimen Uji Impak

Spesimen yang digunakan untuk pengujian impact disesuaikan dengan standar ASTM E-23, dengan ukuran dan bentuk seperti gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Spesimen Uji Impak standar ASTM E-23

3.3 Alat yang digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. *Furnace*

Furnace digunakan dalam proses perlakuan panas, dimana spesimen akan dipanaskan dengan variasi temperatur yang telah ditentukan dan kemudian didinginkan didalam furnace sampai mencapai suhu ruangan. Furnace ini terdapat di Laboratorium Grafi yang berada di SMK SMTI Bandar Lampung.



Gambar 3. 4 *Furnace*

Tabel 3. 1 Spesifikasi Furnace

Model	<i>Barnstead Thermolyne Thermofisher 4800 Series Muffle Furnace F48025-60-80</i>
<i>Power Rating</i>	120 Volts
<i>Hertz</i>	50/60Hz
<i>Amps</i>	15 watt
<i>Phase</i>	1
<i>Temperature Range</i>	<i>Continues : 1093°C Intermittent : 1200°C</i>
<i>Dimensions in Inches</i>	<i>Chamber : 7 (17,8) W X 5 (12,7) X 10 (25,4) D Overall : 13,25 (33,7) W X 19 (48,3) H X 19,5 (49,5) D</i>

2. *Hardness Tester*

Alat uji *Hardness Tester* digunakan dalam pengujian kekerasan dengan metode *Vickers*, yang mengandalkan prinsip penekanan intan berbentuk piramida segitiga (*square-based pyramid*) ke permukaan material dengan beban tertentu. Pengujian ini memungkinkan evaluasi kekerasan mikro hingga makro dengan tingkat akurasi yang tinggi, khususnya pada material dengan struktur mikro yang heterogen atau komponen berdimensi kecil. Alat ini tersedia dan dapat diakses di Laboratorium Material Teknik Mesin, Universitas Lampung. Dengan alat ini, nilai kekerasan *Vickers* (HV) dapat diperoleh dari perhitungan gaya tekan dan luas indentasi, yang kemudian digunakan untuk analisis sifat mekanik dan ketahanan aus dari berbagai jenis logam dan paduan.



Gambar 3. 5 *Hardness Tester*

Tabel 3. 2 Spesifikasi *Hardness Tester*

Model	Hardness Testing Equipment Via Grumello 57-24127 bergamo Italy
N	3237 CO
Modello	A100 Load Min 3 kgf Max 187,5 kgf

3. Profile Projektor

Profile projector (*Optical comparator/shadowgraph*) digunakan untuk mengukur diagonal dari jejak indentasi spesimen uji kekerasan. Alat ini terdapat di Laboratorium Metrologi Industri Teknik Mesin Universitas Lampung



Gambar 3. 6 *Profile Projektor*

Tabel 3. 3 Spesifikasi Profile Projector

<i>Model</i>	<i>PJ-3000 Series</i>	
<i>Protactor Screen</i>	<i>Effective diameter</i>	<i>306mm(12'')</i>
	<i>Screen material</i>	<i>Fine ground glass</i>
	<i>Reference line</i>	<i>Staggered cross and crossshair</i>
	<i>Angle display (LED)</i>	<i>Resolution: 1 or 0.01 (switchable), Range: 370 Functions: Absolute/incremental mode switching, Zero Set</i>
<i>Projection Lens</i>	<i>10 X</i>	
<i>Magnification accuracy</i>	<i>Contour Illumination</i>	<i>±0.1% or less</i>
	<i>Surface illumination</i>	<i>±0.15% or less</i>
<i>Surface illumination</i>	<i>Light source</i>	<i>Halogen bulb(24V, 150W)</i>

	<i>Optical system</i>	<i>Vertical illumination with a half-reflection mirror</i>
	<i>Functions</i>	<i>Adjustable condenser lens, Oblique reflection mirrors(options for 10X and 20X lenses)</i>
<i>Power Supply</i>		<i>100/110/120/220/240V AC (Switchable), 50/60Hz</i>

4. Gerinda Potong

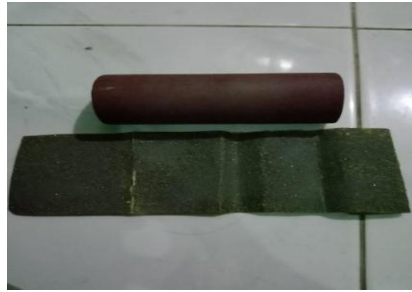
Mesin potong logam digunakan untuk membentuk dimensi yang diinginkan dari spesimen yang akan digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. 7 Gerinda Potong

5. Amplas

Amplas berfungsi sebagai penghalus permukaan spesimen agar permukaan menjadi halus dan bersih. Selain itu dapat memperjelas butir agar hasil pengetsaan maksimal dan hasil pengamatan struktur mikro tampak jelas. Tingkatan amplas yang digunakan adalah 80, 120, 240, 320, 500, 1000, 1500, dan 2000.



Gambar 3. 8 Amplas

6. Autosol

Fungsi dari autosol adalah untuk mengkilapkan logam pada spesimen yang akan digunakan untuk penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 3. 9 Autosol

7. *Impact Testing Machine*

Impact Testing Machine merupakan alat yang digunakan untuk pengujian beban kejut yang diberikan pada spesimen. Pengujian impak ini dilakukan dengan menggunakan metode *charpy* yang mana dengan membuat takikan persis ditengah spesimen.



Gambar 3. 10 Impact Testing Machine

Tabel 3. 4 Spesifikasi Impact Testing Machine

Model	RMU <i>Testing Equipment</i>
Pendulum <i>Energy</i>	300 J <i>Charpy</i> – Div. 1 J 150 J <i>Charpy</i> – Div. 0,5 J 165 J <i>Izod</i> – Div. 2,5 J
<i>Rising angel</i>	160°
<i>Distance between centers of pendulum spesimen</i>	380 mm
Pendulum momen	0.5 J PL = 0.258 Nm
	1 J PL = 0.516 Nm
	2 J PL = 1.031 Nm
	4 J PL = 2.062 Nm
	5 J PL = 2.578 Nm
<i>Dial scale</i>	0 – 0.5 J minimum <i>scale</i> = 0.005 J
	0 – 1 J minimum <i>scale</i> = 0.01 J
	0 – 2 J minimum <i>scale</i> = 0.02 J
	0 – 4 J minimum <i>scale</i> = 0.04 J
	0 – 5 J minimum <i>scale</i> = 0.05 J
<i>Corner dimension ofstriking edge</i>	30 <i>degree</i>
<i>Round angel radius ofstriking edge</i>	R = 2 mm
<i>Specimen</i>	<i>Conform to ISO180</i>

8. Mikroskop olympus BX53M

Mikroskop optik merupakan salah satu alat utama dalam analisis metalografi yang digunakan untuk mengamati dan memahami perubahan struktur mikro pada benda uji. Melalui mikroskop ini, peneliti dapat melihat detail struktur internal logam atau material lainnya yang tidak dapat diamati dengan mata telanjang. Perubahan struktur mikro, seperti pertumbuhan butir, fasa-fasa baru yang terbentuk, hingga adanya cacat mikro seperti porositas atau retakan halus, dapat diidentifikasi dengan jelas menggunakan mikroskop optik.

Dengan bantuan mikroskop optik, karakteristik mikrostruktural dapat dianalisis untuk menentukan kualitas dan performa suatu material. Adapun pemebesaran yang dapat di lihat yaitu 50 kali, 100 kali, 200 kali dan 500 kali dan seterusnya tergantung ketersediaan lensa.



Gambar 3. 11 Mikroskop olympus BX53M

Tabel 3. 5 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, 500x, 1000 x
Kamera mikroskop	- 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	- 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 Pengambilan PRECiV : Akuisisi
-----------------	--

9. Oli SAE 5W30

Oli SAE 5W-30 adalah jenis pelumas mesin kendaraan yang dirancang untuk bekerja optimal pada berbagai kondisi suhu. Angka **"5W"** menunjukkan tingkat viskositas oli saat suhu dingin (W = winter), artinya oli ini tetap cair dan mudah mengalir saat mesin dinyalakan di pagi hari atau di lingkungan bersuhu rendah. Hal ini sangat penting untuk melindungi komponen mesin dari keausan akibat gesekan saat start awal. Sementara itu, angka **"30"** menunjukkan tingkat kekentalan oli saat suhu mesin mencapai suhu operasional normal, yaitu sekitar 100°C.



Gambar 3. 12 Oli 5W30

10. Oli SAE 140

SAE 140 adalah jenis oli dengan viskositas tunggal atau single grade, yang berarti kekentalannya tidak berubah secara signifikan terhadap suhu. Angka "140" menunjukkan tingkat kekentalan oli pada suhu tinggi, yang tergolong sangat kental dibandingkan oli mesin biasa. Oleh karena itu, SAE 140 umumnya tidak digunakan sebagai oli mesin, melainkan lebih sering dipakai sebagai oli gardan atau transmisi pada kendaraan. Oli ini dirancang untuk melindungi komponen mekanis yang bekerja dalam kondisi beban berat dan gesekan tinggi..



Gambar 3. 13 Oli SAE 140

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 Impak

Melakukan penyesuaian bentuk spesimen dari bentuk plat ke bentuk yang telah ditentukan, yaitu panjang 55 mm, lebar 10 mm dan tinggi 10 mm, kemudian dilanjutkan dengan membuat takikan 2 mm dan

sudut dan sudut 45°. Penyesuaian bentuk dapat dilakukan dengan menggunakan gerinda potong.

2) Spesimen Pengujian Kekerasan

Potong bahan baja AISI 1045 yang masih utuh dari pabrik menggunakan mesin gerinda. Spesimen baja AISI 1045 hasil potongan berbentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 20 mm, lebar 10 mm dan tebal/tinggi 10 mm. Haluskan permukaan dengan menggunakan amplas, dan autosol agar specimen tampak mengkilap.

3.4.2 Perlakuan Panas

Adapun tahapan perlakuan panas yang dilakukan pada baja AISI 1045 adalah sebagai berikut :

- 1) Baja AISI 1045 yang sudah sesuai dengan dimensi dimasukkan kedalam tungku pemanas (*furnace*) untuk dipanaskan dengan temperatur pemanasan 850°C.
- 2) Setelah temperatur baja telah mencapai temperatur *austenitnya*, dilakukan penahanan temperatur yang telah ditentukan, waktu penahanan *holding Time* 30, 60, dan 120 menit.
- 3) Spesimen yang sudah dipanaskan kemudian didinginkan secara cepat di dalam media pendingin sampai mencapai suhu ruangan.

3.4.3 Pengujian

Pengujian pada baja AISI 1045 dilakukan dengan beberapa tahapan antara lain :

- a. Pengujian impak dengan menggunakan metode *Charpy* dengan *universal impact tester*. Adapun tahapan dari pengujian impak ini adalah :

- 1) Melakukan kalibrasi pada alat pengujian impak untuk meminimalisir kesalahan perhitungan.

- 2) Meletakkan spesimen pada meja uji berukuran standar $55\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ dengan notch (lekukan) tipe V pada bagian tengah specimen yang akan diuji.
 - 3) Mengangkat pendulum pada meja uji impak.
 - 4) Melepaskan tuas pada mesin uji impak.
 - 5) Melakukan pengereman setelah pendulum mencapai ketinggian maksimum.
 - 6) Menentukan jenis perpatahan yang terjadi.
 - 7) Melakukan analisis pada perpatahan.
 - 8) Menghitung energi impak yang terjadi.
 - 9) Lakukan semua langkah diatas pada semua specimen yang akan dilakukan pengujian impak
- b. Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *Vickers* dengan mesin *hardness tester*. Adapun tahapan pengujian kekerasan ini adalah:
- 1) Mengatur beban dari alat uji yaitu yang sebesar 50 kgf
 - 2) Memasang indenter berbentuk *pyramid* intan yang beralas bujur sangkar yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan adalah 136° .
 - 3) Letakkan baja AISI 1045 pada meja uji dari alat. Kemudian mengatur handle alat uji hingga indenter menyentuh permukaan specimen.
 - 4) Memutar handle hingga jarum dari skala minor menunjukkan angka 0.
 - 5) kemudian tarik tuas beban berlawanan arah jarum jam dan tunggu hingga 10 detik, lalu tarik Kembali tuas searah jarum jam.
 - 6) Menurunkan handle landasan hingga indenter tidak lagi menyentuh specimen uji kekerasan.

- 7) Kemudian ukur diagonal hasil indentasi dengan menggunakan alat *profile proyektor* dan mencatatnya.
- 8) Lakukan semua langkah diatas pada semua *specimen*.

3.4.4 Pengamatan Struktur Mikro

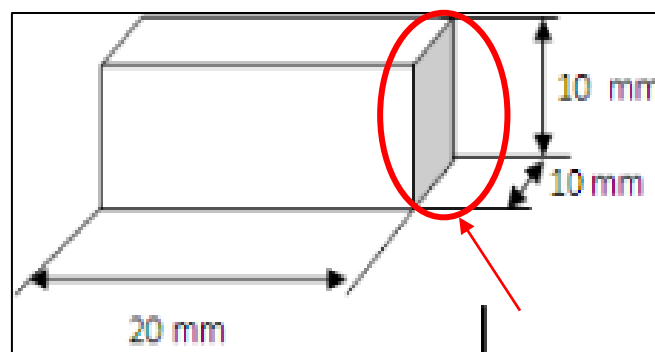
Pengujian struktur mikro bertujuan untuk menganalisa permukaan lapisan spesimen setelah melalui proses *quenching* dengan cara melihat strukturnya menggunakan mikroskop dengan pembesaran yang sudah ditentukan.

Berikut tahapan pengujian struktur mikro pada baja AISI 1045:

- 1) Langkah pertama adalah memotong bagian spesimen baja AISI 1045 yang akan digunakan untuk pengujian struktur mikro. Pemotongan harus dilakukan secara hati-hati untuk menghindari terjadinya perubahan struktur akibat panas berlebih atau deformasi mekanik pada permukaan spesimen. Bagian yang dipilih untuk diamati adalah daerah yang dianggap mewakili kondisi material setelah proses *quenching*. Bagian potongan dapat dilihat pada gambar 3.14 yang ditunjuk panah.
- 2) Proses pengamplasan dilakukan secara bertahap menggunakan kertas amplas dengan tingkat kehalusan yang semakin tinggi, dimulai dari amplas kasar hingga mencapai amplas dengan tingkat kehalusan 2000. Pengamplasan dilakukan secara satu arah dan bergantian arah pada setiap pergantian tingkat kehalusan amplas untuk memastikan goresan dari amplas sebelumnya benar-benar hilang. Selama proses ini, spesimen juga dapat dibasahi dengan air untuk mengurangi panas dan mencegah terjadinya goresan yang terlalu dalam
- 3) Menggosok permukaan spesimen baja AISI 1045 dengan kain poles

yang diberi autosol agar permukaan mengkilap. Pemolesan dilakukan secara perlahan dan merata sampai tidak terlihat lagi goresan-goresan halus akibat proses pengamplasan sebelumnya

- 4) Permukaan spesimen yang telah halus dan mengkilap kemudian dilakukan proses etsa menggunakan larutan nital, yaitu campuran 95% alkohol dan 5% asam nitrat. Proses etsa dilakukan dengan cara meneteskan atau mengoleskan larutan nital pada permukaan spesimen selama beberapa detik. Tujuan dari proses etsa ini adalah untuk menampakkan batas butir dan perbedaan fasa pada struktur mikro baja
- 5) Bagian yang telah di etsa diletakkan pada kamera mikrostruktur untuk dilihat strukturnya dengan perbesaran 100 kali dan 500 kali.
- 6) Fokuskan lensa sehingga gambar terlihat jelas di layar monitor.
- 7) Simpan foto struktur mikro pada baja AISI 1045.
- 8) Amati gambar struktur mikro.
- 9) Analisis gambar struktur mikro.



Gambar 3. 14 Bagian potongan yang digunakan struktur mikro

3.5 Pengambilan data

Pengambilan data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.5.1 Pengujian Kekerasan

Tabel 3. 6 Hasil Pengujian Kekerasan

Material	Suhu <i>Quenching</i>	Media Pendingin	<i>Holding time</i>	Beban (Kgf)	Spesimen	Kekerasan (HV) Kg/mm2	Rata-rata (HV) Kg/mm2
Baja AISI 1045			Raw material	50	Raw material 1		
					Raw material 2		
					Raw material 3		
	850°C	Oli SAE 5W-30	30 menit		Spesimen 1		
					Spesimen 2		
					Spesimen 3		
			120 menit		Spesimen 1		
					Spesimen 2		
					Spesimen 3		
		Oli SAE 140	30 menit		Spesimen 1		
					Spesimen 2		
					Spesimen 3		
			120 menit		Spesimen 1		
					Spesimen 2		
					Spesimen 3		

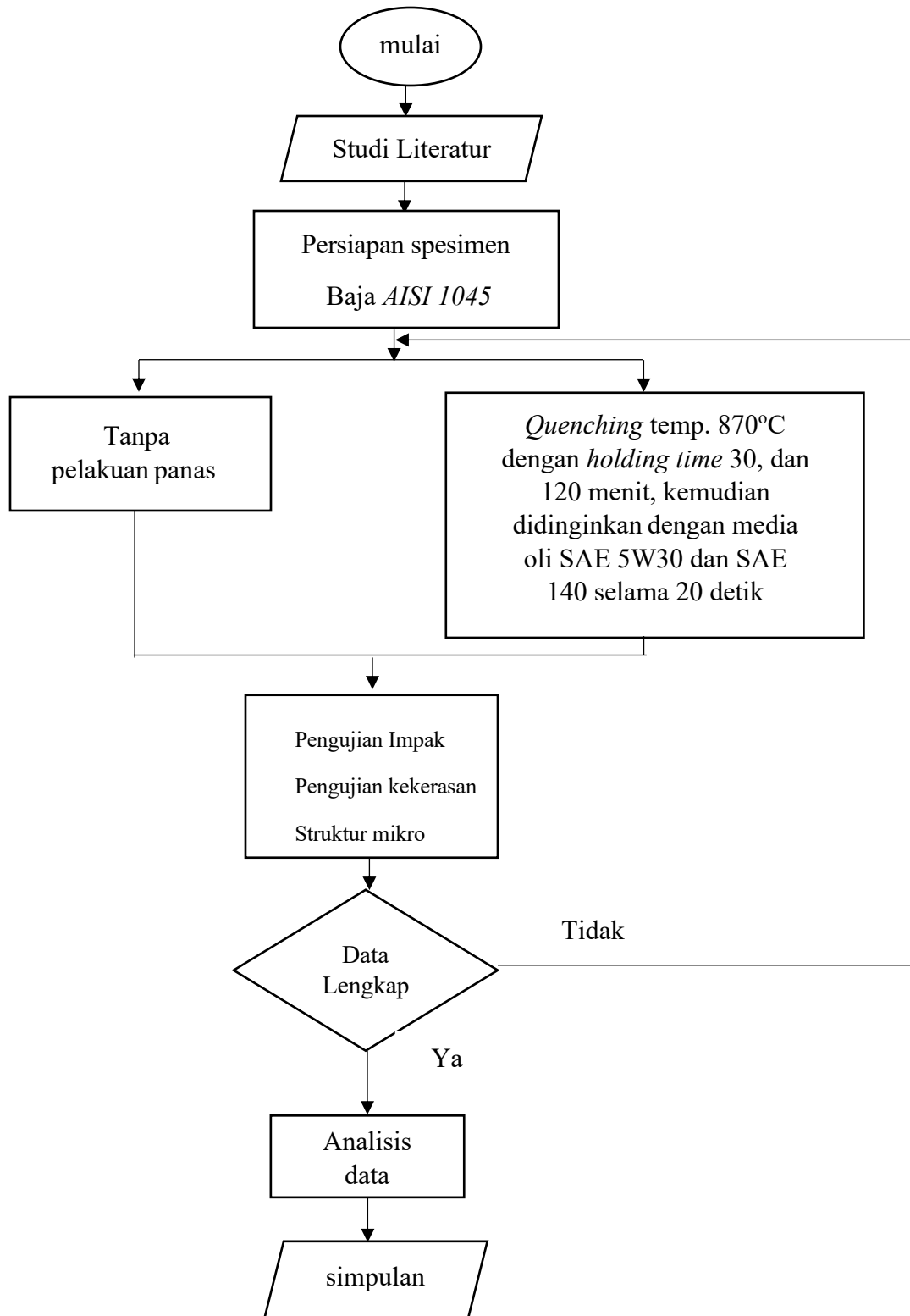
3.5.1 Pengujian impak

Tabel 3. 7 Tabel Pengujian Impak

Material	Suhu <i>Quenching</i>	Media Pendingin	<i>Holding time</i>	Spesimen	Energy E (Joule)	Harga impak (HI)	Rata – rata J/mm ²
Baja AISI 1045	850°C		Raw material	Raw material 1			
				Raw material 2			
				Raw material 3			
		Oli SAE 5W-30	30 menit	Spesimen 1			
				Spesimen 2			
				Spesimen 3			
			120 menit	Spesimen 1			
				Spesimen 2			
				Spesimen 3			
		Oli SAE 140	30 menit	Spesimen 1			
				Spesimen 2			
				Spesimen 3			
			120 menit	Spesimen 1			
				Spesimen 2			
				Spesimen 3			

3.6 Diagram alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang telah didapatkan setelah dilakukan penelitian pengaruh variasi temperatur *quenching* pada baja AISI 1045 terhadap kekerasan, ketangguhan bahan dan struktur mikro adalah sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, dapat disimpulkan bahwa variasi waktu tahan (*holding time*) dan media pendingin berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kekerasan baja AISI 1045 setelah proses *quenching*. Material awal memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 200,7852 Kg/mm². Setelah *quenching* menggunakan oli SAE 5W-30, kekerasan meningkat seiring bertambahnya *holding time*, yaitu menjadi 216,2696 Kg/mm² (30 menit), 219,9307 Kg/mm² (60 menit), dan mencapai nilai tertinggi 237,0531 Kg/mm² (120 menit). Jika dibandingkan dengan material awal, terjadi kenaikan masing-masing sebesar 7,71% pada 30 menit, 9,53% pada 60 menit, dan 18,06% pada 120 menit. Sementara itu, penggunaan oli SAE 140 juga menunjukkan peningkatan kekerasan menjadi 212,1970 Kg/mm² (30 menit), 215,0223 Kg/mm² (60 menit), dan 227,9741 Kg/mm² (120 menit), dengan persentase kenaikan terhadap material awal sebesar 5,68%, 7,09%, dan 13,54%. Hasil ini menegaskan bahwa media pendingin dengan viskositas lebih rendah (oli SAE 5W-30) serta waktu tahan yang lebih lama menghasilkan laju pendinginan yang lebih efektif, sehingga transformasi *austenit* ke *martensit* berlangsung lebih optimal dan memberikan peningkatan kekerasan yang lebih signifikan dibandingkan penggunaan oli dengan viskositas lebih tinggi

2. Hasil pengujian impak menunjukkan bahwa proses *quenching* menyebabkan penurunan nilai ketangguhan dibandingkan material awal, serta nilai impak semakin menurun dengan bertambahnya *holding time*. *Raw material* memiliki nilai energi serap tertinggi sebesar 0,4025 J/mm², menandakan ketangguhan yang sangat baik. Setelah *quenching* menggunakan oli SAE 5W-30, nilai impak menurun menjadi 0,3545 J/mm² (30 menit), 0,2557 J/mm² (60 menit), dan 0,2271 J/mm² (120 menit). Jika dibandingkan dengan material awal, terjadi penurunan energi serap masing-masing sebesar 11,93% (30 menit), 36,47% (60 menit), dan 43,58% (120 menit). Pada media oli SAE 140, nilai impak tercatat sebesar 0,3733 J/mm² (30 menit), 0,2623 J/mm² (60 menit), dan 0,2423 J/mm² (120 menit). Persentase penurunan terhadap *raw material* adalah 7,25% (30 menit), 34,83% (60 menit), dan 39,80% (120 menit). Hasil ini menunjukkan bahwa oli SAE 140 dengan laju pendinginan yang relatif lebih lambat mampu mempertahankan ketangguhan lebih baik dibandingkan oli SAE 5W-30 pada setiap variasi waktu tahan, meskipun secara umum peningkatan *holding time* tetap menyebabkan penurunan energi serap akibat meningkatnya fraksi *martensit* yang bersifat lebih getas. Keterkaitan antara kekerasan dan ketangguhan pada penelitian ini memperlihatkan hubungan yang berbanding terbalik. Semakin lama *holding time*, kekerasan meningkat signifikan (hingga 18,06% pada SAE 5W-30 dan 13,54% pada SAE 140 dibandingkan material awal), sedangkan ketangguhan justru menurun hingga lebih dari 40% pada kondisi tertentu. Fenomena ini sejalan dengan teori transformasi fasa pada baja karbon sedang, di mana peningkatan pembentukan *martensit* akibat pendinginan cepat akan meningkatkan kekerasan, namun pada saat yang sama menurunkan kemampuan material dalam menyerap energi impak.
3. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa variasi *holding time* dan media pendingin menyebabkan perubahan fasa yang signifikan pada baja AISI 1045. Pada kondisi *raw material*, struktur mikro didominasi oleh kombinasi *ferit* dan

perlit, yang menghasilkan kekerasan sedang ($200,7852 \text{ Kg/mm}^2$) dan ketangguhan tinggi ($0,4025 \text{ J/mm}^2$). Setelah *quenching* menggunakan oli SAE 5W-30, struktur mikro didominasi oleh *martensit* berbentuk jarum (*lath martensite*) dengan sisa *ferit*, yang sejalan dengan peningkatan kekerasan hingga $237,0531 \text{ Kg/mm}^2$ dan penurunan nilai impak hingga $0,2271 \text{ J/mm}^2$ pada *holding time* 120 menit. Pada *quenching* menggunakan oli SAE 140, terbentuk struktur campuran *martensit* dan *ferit* dengan morfologi *martensit* yang lebih kasar akibat laju pendinginan yang lebih lambat, menghasilkan kekerasan maksimum $227,9741 \text{ Kg/mm}^2$ dan nilai impak $0,2423 \text{ J/mm}^2$. Dengan demikian, perubahan struktur mikro dari *ferit-perlit* menjadi *martensit-perlit* menjadi faktor utama yang mengontrol peningkatan kekerasan dan penurunan ketangguhan baja AISI 1045 setelah proses *quenching*.

5.2 Saran

Adapun saran yang penulis berikan untuk mendukung penelitian selanjutnya yaitu :

1. Untuk penelitian lanjutan, disarankan menambahkan variasi temperatur austenisasi selain $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga pengaruh suhu pemanasan terhadap pembentukan fasa *martensit*, kekerasan, dan ketangguhan dapat dianalisis secara lebih komprehensif. Variasi temperatur ini penting untuk menentukan kombinasi parameter perlakuan panas yang paling optimal bagi baja AISI 1045.
2. Pengujian sifat mekanik tambahan, seperti uji tarik dan uji kelelahan (*fatigue*), perlu dilakukan agar karakteristik mekanik baja AISI 1045 dapat dievaluasi secara menyeluruh dan aplikatif terhadap kondisi kerja nyata pada komponen mesin.
3. Analisis struktur mikro yang lebih mendalam menggunakan metode lanjutan seperti *Scanning Electron Microscope* (SEM) atau uji *X-ray Diffraction* (XRD) disarankan untuk mengidentifikasi morfologi *martensit* secara lebih detail serta memastikan fasa yang terbentuk setelah *quenching*.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Faris, M. S., & Rasyid, A. H. A. (2023). Pengaruh variasi media pendingin terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan baja AISI 1045. *Jurnal Teknik Mesin*, Universitas Negeri Surabaya
- Angga Ruci, G. (2021). *Analisis Pengaruh Perlakuan Panas Artificial Aging Pada Velg Oem (Al-Si) Dengan Variasi Media Pendingin (Air, Air Es, Oli Sae 140) Terhadap Nilai Kekerasan (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta)*.
- Andreansyah, M., Anjan, R. D., & Naub544bv nome, V. (2024). Pengaruh Proses Heat Treatment (Quenching dan Tempering) Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon Menengah. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(1), 7864-7872.
- Amalia, A. N. (2018). Perlakuan panas hardening dengan variasi temperatur pemanasan, waktu tahan, dan media pendingin pada peningkatan kekerasan baja AISI 1045 [Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. ITS Repository.
- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2009). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- 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*, 12(1), 45–53.
- Hawari, M. I. (2020). *Pengaruh temperatur dan holding time pada proses hardening dengan media pendingin air kelapa tua terhadap kekerasan baja AISI 1045* [Laporan Penelitian]. Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Novianto, D. R., & Drastiawati, N. S. (2024). PENGARUH VARIASI TEMPERATUR QUENCHING DAN MEDIA PENDINGIN OLI PADA MATERIAL BAJA AISI 4140 TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO. *Jurnal Teknik Mesin*, 13(02), 137-142.
- Pramono, A. (2021). Karakteristik struktur mikro hasil proses hardening baja AISI 1045 media *quenching* untuk aplikasi sprocket rantai. *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, 17(1), 8–14

- Rifnaldy, R., & Mulianti, M. (2019). pengaruh perlakuan panas hardening dan tempering terhadap kekerasan (hardness) baja AISI 1045. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 1(4), 950-959
- Syaharuddin, R., Ahmad, A., Muh, S. R., & Istan, H. (2019). Pengaruh variasi *quenching* bertingkat pada baja AISI-1045 dengan menggunakan media pendingin oli SAE-20W dan air terhadap sifat mekanik dan struktur mikro. *SINERGI: Jurnal Ilmiah Teknologi dan Manajemen*, Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Sukarno, N. A., Azis, A., & Vebriyadi, H. (2024). Pengaruh variasi suhu terhadap sifat kekerasan baja AISI 1045 pada proses heat treatment dengan media pendingin oli. *Perwira Journal of Science and Engineering*, 4(1), 22–29.
- Wibisono, A. T., & Rochiem, I. R. (2021). *Analisis pengaruh variasi temperatur dan holding time tempering terhadap kekerasan baja AISI 1045 yang di-hardening* ITS Repository.
- Yusuf, M. (2018). Analisis Kinerja Pelumas Multi Grade Terhadap Efisiensi Pelumasan Mesin Bensin. *Jurnal Teknik Mesin Otomotif*, 5(2), 45–52.
- Yuwita, P. E., Habib, A., & Faila, R. N. (2024). Studi Pengaruh Variasi Media Pendingin Quenching dan Waktu Penahanan pada Proses Heat Treatment terhadap Kekerasan Baja AISI 1045. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 19(1), 77-84.